

L'INCERTITUDE SUR LA DISTANCE DE LA PREMIERE ATTAQUE DE L'ADVERSAIRE JOUE T'ELLE SUR LA PRISE DE DECISION DU SABREUR ?

Françoise Natta, Philippe Nouillot, Thomas Ducourant

▶ **To cite this version:**

Françoise Natta, Philippe Nouillot, Thomas Ducourant. L'INCERTITUDE SUR LA DISTANCE DE LA PREMIERE ATTAQUE DE L'ADVERSAIRE JOUE T'ELLE SUR LA PRISE DE DECISION DU SABREUR ?. [Rapport de recherche] Rapport de projet de recherche N°02-053, Institut National du Sport et de l'Education Physique (INSEP). 2008. hal-01936428

HAL Id: hal-01936428
https://insep.hal.science//hal-01936428

Submitted on 27 Nov 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.

Décembre 2008

Rapport de projet de recherche N°02-053
Mission Recherche de l'INSEP

L'INCERTITUDE SUR LA DISTANCE DE LA PREMIERE ATTAQUE DE L'ADVERSAIRE JOUE T'ELLE SUR LA PRISE DE DECISION DU SABREUR ?



Françoise NATTA[1]

Collaborateur scientifique : P. NOUILLOT[2]

Collaborateur sportif du projet : T. DUCOURANT[1]

Travail effectué par

Laboratoire Mouvement Action et Performance de l'INSEP

En collaboration avec

[1] INSEP, Paris, France

[2] GEDIAPS, Université Paris 12, Créteil, France

Téléchargement sur le site : http://sciences.campus-insep

Remerciements

Merci aux sabreurs de l'équipe de France

Merci à leur entraîneur Christian Bauer

Merci à leurs entraîneurs de clubs

Merci au Ministère de la Santé, de la Jeunesse, des Sports et de la Vie associative pour son soutien financier

Les données préliminaires de ce rapport ont donné lieu au DEA de Thomas Ducourant : « Initiation de l'action chez l'escrimeur en milieu d'incertitude » soutenu en 2001 à l'Université Paris XI.

Nomenclature

Protocole

U : session avec incertitude, s'applique au sabreur
C : session avec certitude, s'applique au sabreur
F : condition de distance appliquée par l'adversaire, une marche enchainée d'une fente
M : condition de distance appliquée par l'adversaire, 2 marches enchainées d'une fente
R : condition de distance appliquée par l'adversaire, une marche enchainée d'une retraite
1/2 : réponse quantifiée du sabreur en une marche, enchaînée d'une demi-fente ou d'une demi-marche ;
F : réponse quantifiée du sabreur en une marche et fente ;
M : réponse quantifiée du sabreur en deux marches ;
D : réponse quantifiée du sabreur en une défense ;
S : réponse quantifiée du sabreur en une attente avant de partir ;
J : réponse quantifiée du sabreur comportant un saut
PF : issu de la plateforme de force
Vi : issu de la vidéo

Indicateurs temporels (t)

t : instant d'apparition d'un événement (en seconde)
tn : instant normalisé en fonction de la durée du mouvement, sans le temps de réaction (en pourcentage)
tr : instant relatif décompté à partir du début du mouvement volontaire, t0 (en seconde)

Indices liés aux changements d'appui d'après les images vidéo

HOF : lever (Off) du talon (Heel) avant (Front)
TOF : lever (Off) des pointes de pieds (Tip) avant (Front)
HCF : poser (Contact) du talon (Heel) avant (Front)
TCF : poser (Contact) des pointes de pieds (Tip) avant (Front)
TOR : lever (Off) des pointes de pieds (Tip) arrière (Rear)
TCR : poser (Contact) des pointes de pieds (Tip) arrière (Rear)
O2 : lever (off) du pied avant ou arrière pour le second mouvement (2)

Indices liés aux changements d'appui d'après le déplacement du centre des pressions

-1 : début des phénomènes dynamiques
0 : lever du pied avant (début du mouvement volontaire)
1 : poser du pied avant
2 : lever du pied arrière
3 : poser du pied arrière
4 : début du second mouvement
5 : premier double appui du second mouvement

Autres indices

Tous les événements repérés pour connaître l'instant auquel ils surviennent (e.g. t_Vmax_pv)

Durées (Δ)

Δn : durée normalisée en pourcentage de la durée totale du mouvement
Δ_mvt : durée du mouvement du lever du pied avant jusqu'au poser du pied arrière (entre t_HOF et t_TCR)
Δtr : durée de la phase posturale en double appui
Δfront : durée de la phase de déplacement de la jambe avant
Δstance1 : durée de la phase de double appui pendant la marche
Δrear : durée de la phase de déplacement de la jambe arrière
Δstance2 : durée de la phase en double appui après la première marche

Distances (d)

d-1 : distance entre les pieds initiale
d1 : distance entre les pieds après déplacement avant
d3 : distance entre les pieds après déplacement arrière

dWrist : distance entre le poignet armé et le tronc

Angles (α)

α_a : angle entre l'axe de l'arme et la verticale
α_t-v : entre l'axe du tronc et la verticale
α_jv : angle de la jambe avant
α_jr : angle de la jambe arrière
α_Arm : angle du bras non-armé
α_b-t : angle entre le bras armé et le tronc
α_b-av : angle entre le bras et l'avant-bras armé

Indices

Tous les indicateurs temporels qui précisent à quel instant est mesuré l'angle (e.g. **αHOF**)
d : mesuré au début de la modification angulaire (e.g. **αd_b-t**)
max et **min** : angles maximal et minimal atteints (e.g. **αmax_jv**)
αouv_b-t : angle d'ouverture entre le bras et le tronc (mesuré entre l'angle au début de la modification angulaire et l'angle maximal atteint)
αall_b-ab : angle d'allongement entre le bras et l'avant-bras (mesuré entre l'angle au début de la modification angulaire et l'angle maximal atteint)

Vitesses (V) et accélérations (A)

Indices (**V.. et A..**)

max et **min** : valeurs maximale et minimale atteintes (e.g. **Vmax_pv**)
y : du centre de masse issu des données de la plateforme de force selon l'axe antéropostérieur
z : du centre de masse issu des données de la plateforme de force selon l'axe vertical
Vz : vitesse verticale du CoM ;
Vy : vitesse antéropostérieure du CoM,

Segment ou point évalué (**V.. ..**)

Tous les indicateurs temporels qui précisent à quel instant est mesurée la valeur (e.g. **Vy_t0**)
d : valeur au début de la variation
pv : du pied avant
pr : du pied arrière
a : de l'arme (sabre)
gz : du centre de masse reconstruit d'après les marqueurs articulaires et le modèle anthropométrique choisi selon l'axe vertical
gx : du centre de masse reconstruit d'après les marqueurs articulaires et le modèle anthropométrique choisi selon l'axe antéropostérieur

Forces (R) et centre des pressions selon l'axe antéropostérieur (yP)

Δ : force verticale déduite du poids du corps (e.g. ΔRz)

Indice 1

z : selon l'axe vertical
y : selon l'axe antéropostérieur

Indice 2

max et **min** : valeurs maximale et minimale atteintes (e.g. Rymax)
d : valeur au début de la variation
n : normalisé en fonction de la taille pour le centre des pressions, selon le poids du corps pour les forces
d- : au début du freinage
f- : à la fin du freinage
Tous les indicateurs temporels qui précisent à quel instant est mesurée la valeur (e.g. **Ry_t0**)

1. Revue de questions 3
1.1. L'escrime 3
1.2. Escrime et exploration visuelle 5
1.3. Ajustements Posturaux Anticipateurs 5
1.4. Effets de l'entraînement 6
1.5. Contrainte attentionnelle 6
1.6. Tâche de pointage 7
1.7. Adaptation du mouvement 8
2. Hypothèses et objectifs 8
3. Matériels et méthodes 9
3.1. Sujets 9
3.2. Définition des termes 10
3.3. Matériels 10
3.3.1. Méthodes d'enregistrement vidéo 10
3.3.2. Plateforme de force et contacteur 12
3.3.3. Connectique 13
3.4. Acquisition des données 13
3.5. Protocole 14
3.5.1. Conditions expérimentale 14
3.5.2. Consignes aux sabreurs 16
3.5.3. Position des pieds en posture initiale 16
3.5.4. Description du début de l'action en escrime 16
4. Etude de l'adversaire cible 17
4.1. Introduction 17
4.2. Traitement des données 18
4.3. Posture initiale 19
4.3.1. Reproductibilité de la posture initiale 19
4.3.2. Une posture initiale non « informative » 19
4.4. Premiere marche 20
4.5. Résumé des résultats sur la premiere marche de « l'adversaire » 27
5. Catégorisation de l'ensemble des réponses apportées par l'escrimeur 28
5.1. Analyse de la session avec incertitude 28
5.2. Analyse de la session avec certitude 31
6. Etude du sabreur en condition avec incertitude 33
6.1. Traitements statistiques des données du sabreur 33
6.2. Chronologie des « événements » de la première marche du sabreur 33
6.2.1. Chronologie des changements d'appuis 33
6.2.2. Chronologie des pics de vitesse et d'accélération 35
6.2.3. Chronologie des changements angulaires 37
6.2.4. Durées des phases 38
6.3. Amplitude des angles remarquables 40
6.4. Vitesses et accélérations 41
6.5. Ecart inter pieds 43
6.6. Dynamique globale 43

6.6.1. Centre des pressions 44
6.6.2. Centre de masse 48
6.7. Recherche d'un sous-modèle pour l'ensemble des variables 52
7. Etude du sabreur en condition avec certitude 56
7.1. Sous-modèle pour discriminer la distance 56
7.2. Ajustements posturaux anticipateurs 59
8. Comparaison des deux sessions 61
8.1. Effets distance 61
8.1.1. Sous-modèle qui maximalise la séparation des conditions de distance 61
8.1.2. Résultats de la Manova pour l'effet distance 65
8.2. Effets session 67
8.2.1. Sous-modèle qui maximalise la séparation des conditions de sessions 67
8.2.2. Résultats de la Manova pour l'effet session 69
8.3. Effets croisés distance-session 71
8.4. Effets sujet 72
8.4.1. Variables présentant seulement un effet sujet 73
8.4.2. Variables ne présentant aucun effet sujet 75
9. Discussion 78
9.1. Informations fournies au sabreur par un adversaire expert 78
9.2. Résultats qualitatifs 79
9.3. Organisation du sabreur en condition avec incertitude 79
9.4. Organisation du sabreur en condition avec certitude 81
9.5. Organisation motrice du sabreur selon la distance 83
9.6. Organisation motrice du sabreur selon la connaissance ou non du déplacement de l'adversaire 85
9.7. Stratégies individuelles 87
10. Conclusions et perspectives 87
11. Bibliographie 90

1. REVUE DE QUESTIONS

1.1. L'ESCRIME

L'escrime est un sport d'opposition composé de trois armes : le fleuret, l'épée et le sabre (Photo 1). Ces spécialités sont dominées par des règles précises pour chacune d'entre elles. Les différences observées concernent la morphologie de l'arme qui détermine la manière de toucher l'adversaire (soit de la pointe, soit du tranchant de l'arme), la surface valable, les règles concernant l'attaque (la convention).



De gauche à droite :
sabre
fleuret
épée
gants
masque

Photo 1. Matériel d'escrime

Au fleuret et au sabre, cette convention dit que l'attaque est prioritaire (l'attaque correspond à un moyen de prendre l'ascendant face à l'adversaire) ; à l'épée, il n'y a pas de convention (le premier qui touche marque le point). La contrainte conventionnelle implique des choix tactiques, à savoir : faut-il prendre l'initiative le plus tôt possible au risque d'être contré ? Ou bien, faut-il laisser l'adversaire prendre l'initiative pour le contrer ? Ces possibilités demandent une forte adaptabilité du mouvement à effectuer. L'adaptation peut porter sur le temps de réaction, la prise d'information et concerne la relation dialectique posture / mouvement.
Le sabre est une arme d'estoc (pointe) et de taille (tranchant), conventionnelle, légère (500 g) et de longueur définie (105 cm maximum). Le sabre requiert une grande rapidité d'exécution de la part des protagonistes afin d'atteindre un objectif bien spécifique qui est de toucher l'adversaire (assimilé à une tâche de pointage) en respectant la convention. La somme des touches permet de remporter la victoire. Les règles de l'escrime au fleuret sont expliquées dans la vidéo de la Fédération Internationale d'Escrime (F.I.E.) (1988), et dans le règlement de la F.I.E. Ces règles sont les mêmes pour le sabre.
Pendant un match, les escrimeurs évoluent sur une piste de 14 m de long pour 2 m de large et de hauteur infinie : elle est considérée comme un volume. Si un tireur quitte les limites arrière de la piste, il est considéré comme touché. De cette règle découle la

nécessité de posséder au moins un pied (au sol ou non) dans l'espace de jeu. Ainsi, un escrimeur qui fait un saut sur place se trouve toujours à l'intérieur de la piste (Photo 2).



Photo 2. Une situation d'assaut

Avant une phase de jeu, les sabreurs sont séparés d'une distance de 4 m qui est la distance de mise en garde. Dès le début de l'assaut, celle-ci évolue par le déplacement des tireurs (vers l'avant ou vers l'arrière), que nous définissons comme la succession et la coordination d'actions segmentaires effectuées en vue de la réalisation du but à atteindre. Dans notre étude, il s'agira de porter une attaque. Le but premier de ces déplacements est de se positionner à une distance qui est propre à chacun (selon la morphologie du sujet, le style, le choix tactique …) pour réaliser une attaque (au moins une marche et une fente coordonnées à un allongement du bras armé). Pour éviter une attaque, l'escrimeur peut écarter le fer adverse (parade), ou l'esquiver en se plaçant hors distance ; ces deux possibilités redonnent le bénéfice de la priorité (le droit d'attaquer). L'attaquant peut alors soit mal ou ne pas apprécier l'action de l'adversaire, soit l'intégrer en ajoutant un déplacement vers l'avant ou contourner la parade. Ces choix s'opèrent rapidement et la manière de réaliser ces choix serait automatisée par l'entraînement. La prise de décision est travaillée quotidiennement à l'entraînement. Ceci suggère que l'entraînement des experts consiste en un apprentissage de séquences gestuelles automatiques (Brindle et al., 1999). La distance entre les tireurs constitue donc une incertitude spatiale, temporelle et événementielle.

Au sabre, on suppose que les escrimeurs décident d'un mouvement à effectuer avant de commencer la phase de jeu (choix d'une action ou stratégie). Ils partent d'une position statique (position de garde : posture initiale). Au cours du mouvement volontaire, survient souvent la nécessité d'adapter cette séquence motrice pendant sa réalisation. Cependant, dans certains cas de figures, il est impossible pour l'escrimeur de s'adapter pour plusieurs raisons : il ne connaît pas la réponse à la situation créée par l'action adverse ; il n'a pas détecté l'information pertinente ; il ne peut pas physiquement ou techniquement ajuster

son geste… La prise d'information joue un rôle essentiel dans le processus d'adaptation et nous sommes amenés à nous demander quelles sont les informations pertinentes à prendre en compte pour optimiser l'adaptation. Quelle est la part de la vision dans la prise de décision ? Quelle est l'influence de l'incertitude événementielle et temporelle sur la performance ? Cette adaptation est-elle reproductible dans une même situation ?

1.2. ESCRIME ET EXPLORATION VISUELLE

D'après Papin (1987), des exercices effectués en salle d'armes permettent de mettre en évidence qu'une exploration visuelle de l'adversaire sert à déterminer la position du corps de cet adversaire par rapport à sa propre arme et de prendre conscience que tel mouvement permettra à coup sûr de toucher telle ou telle partie du corps mémorisée antérieurement. De plus, il semble que le niveau d'expertise de l'escrimeur implique un comportement d'exploration visuelle propre (Bard, 1982). Les experts diffèrent des novices par des comportements dans lesquels ils sélectionnent plus rapidement des informations pertinentes. Les études de Bard (1982) portant sur l'épée montrent que l'escrimeur capte l'information visuelle à proximité de la coquille de l'arme (partie métallique protégeant la main). L'information que le sujet va chercher a pour but de réduire l'incertitude contenue dans l'objectif du mouvement adverse et dépend de ses connaissances a priori. On peut alors se demander si ces résultats concernant l'exploration visuelle en épée sont valables également pour le sabre, une autre spécialité de l'escrime.
Il semble que la tâche demandée soit de pointer dans un déplacement volontaire réalisé à grande vitesse (Do et Yiou, 1999). Ces auteurs identifient une double tâche : se déplacer et toucher. Mais, est-il possible de dire que la tâche serait de toucher en se déplaçant ?

1.3. AJUSTEMENTS POSTURAUX ANTICIPATEURS

Il est démontré que des phénomènes dynamiques appelés ajustements posturaux anticipateurs (APAs) précèdent l'exécution du mouvement volontaire (Belen'kii et al., 1967 ; Bouisset et Zattara, 1981 ; Zattara et Bouisset, 1986) et que ceux-ci représentent le conditionnement du mouvement à suivre (Zattara et Bouisset, 1986) et / ou anticipent la perturbation que va produire le mouvement (Chong et al., 1999). Le mouvement serait composé d'une commande posturale et d'une commande liée au mouvement propre (Massion, 1990). La fonction des APAs serait de coordonner l'activité volontaire et l'activité posturale. Les APAs dépendraient de la stratégie de pointage, de la position, de la charge, de la géométrie corporelle et de la surface du support (van der Fits et al., 1998). Ils seraient planifiés en détail et dépendraient des conditions expérimentales (Benvenuti et al., 1997 ; Burleigh et Horak, 1996). Les ajustements posturaux sont détectables par des déplacements du centre des pressions, des déplacements du centre de masse et des activations plus ou moins précoces de muscles non directement impliqués dans le mouvement à venir.
Les APAs auraient en escrime une origine centrale (Do et Yiou, 1999). On sait également que la position initiale du centre de masse affecte les APAs (Mille et Mouchnino, 1998).

Selon Massion (1990), comme l'escrime est un cas de mouvement volontaire réalisé à une certaine vitesse, on peut parler d'ajustements posturaux anticipateurs et non d'ajustements posturaux préparateurs.

1.4. EFFETS DE L'ENTRAINEMENT

Selon Massion (1990) : « L'entraînement sportif a pour effet de modifier et de transformer les coordinations posturo-cinétiques préexistantes pour les rendre plus efficaces et améliorer la performance. »
Les travaux de Yiou et Do (2000) montrent que dans un mouvement simple en escrime (soit fente, soit touche), les experts présentent des résultats similaires à ceux des sujets non entraînés, et que seul un mouvement global plus complexe (fente et touche) permet de les différencier. Ces conclusions ne rejoignent pas celles de Massion (1990) qui dit : « Un résultat intéressant de l'entraînement est qu'il retentit non seulement sur l'acte moteur réalisé dans les conditions de contraintes maximales, mais que son effet se manifeste également dans l'exécution de mouvements plus simples, pourvu que ces mouvements aient été spécifiquement entraînés. Il est dès lors possible d'envisager d'évaluer l'effet d'un entraînement, non pas à partir des conditions des performances maximales mais à partir de mouvements relativement simples, réalisés par ailleurs sans difficulté par les sujets non entraînés. Autrement dit, l'entraînement sportif modifie non seulement les gestes sportifs mais aussi les gestes du sportif pourvu que ces derniers appartiennent à la même famille que ceux qui ont été entraînés ». Ces derniers travaux ne s'appliquent peut-être pas à l'escrime ou dans l'entraînement du tireur expert.

1.5. CONTRAINTE ATTENTIONNELLE

Certains changements posturaux imposés au poignet, dans un mouvement de flexion-extension de l'index, augmentent la charge attentionnelle à tel point que le sujet ne peut plus répondre à une cadence de mouvements définie par des signaux sonores (Carson et al., 1999). D'après ces travaux nous serions tentés de nous demander si la position du poignet du côté de l'arme lors de la « garde » en escrime affecte la maniabilité du sabre.
Rossi et al. (1992) démontrent que les escrimeurs Italiens possèdent une réponse rapide face à une incertitude sonore, ce qui implique que ces escrimeurs décodent rapidement ce type d'information. On se demande s'il peut en être de même pour des informations visuelles (évolution d'une distance).
Kerlirzin et al. (1999) montrent qu'il est possible de construire une trajectoire strictement verticale de la main lors d'une tâche d'élévation d'objet. Ces constructions de trajectoires seraient d'origine périphérique. Peut-on observer les mêmes résultats selon les autres axes et dans ce cas l'escrimeur serait-il capable de contrôler la trajectoire de sa main lors de l'allongement du bras ?
Flanders et al. (1999) affirment que lors d'une tâche de pointage la coordination tête-oeil-main joue un rôle important pour l'exécution du mouvement et que la direction du regard sert de référence pour le contrôle moteur. La tête jouerait le rôle d'une centrale inertielle

(Berthoz, 1997). Grasso et al. (1999) ajoutent que les réponses posturales sont organisées en fonction de la représentation interne de la direction de la tête (direction de référence plutôt liée au regard).
Existe-t-il une posture idéale permettant une performance optimale ? Les APAs permettent-ils de prédire le ou les mouvements à suivre dans un milieu à forte incertitude ? Les APAs sont-ils communs à tous les sujets ?
Le but de l'escrime étant de toucher son adversaire sur une surface précise, il est pertinent de l'inclure dans le paradigme expérimental. Des outils de mesure expérimentaux (Singer, 1968) et spécifiques ont été conçus pour mener des études en escrime tels que le METERES et l'ARVIMEX (Moreaux et al. 1987) ; ils permettent de quantifier les temps de réaction, les temps de mouvement, les temps de latence motrice. Ces outils sont constitués d'un certain nombre de diodes qui s'allument de façon plus ou moins aléatoire et qui représentent en quelque sorte la cible à atteindre. Ils composent une incertitude spatiale de la cible à une distance donnée. Nougier et al. (1990) ont montré que le temps de mouvement est plus long quand la demande de précision est grande et que les escrimeurs experts possèdent une haute flexibilité attentionnelle quand ils ne savent pas a priori où le stimulus visuel va se produire. Un temps de mouvement plus long permettrait de s'adapter au cours du mouvement. Dans l'expérimentation proposée, nous nous intéresserons à une cible donnée (la tête de l'adversaire) mais cette cible sera mouvante selon le protocole.

1.6. TACHE DE POINTAGE

Concernant les tâches de pointage, nous savons que le signal préparatoire diminue le temps de réaction et que le temps de réaction dépend du temps séparant les signaux préparatoire et effecteur (Bock et Eversheim, 2000). Or les commandements de l'arbitre peuvent s'apparenter successivement à un signal préparatoire (« Etes-vous prêts ? ») puis à un signal effecteur (« Allez ! »). Suite à ce dernier, le tireur est libre dans son choix d'action (il peut attaquer ou ne pas attaquer). Bien que la rapidité de réaction ne soit pas le seul choix stratégique possible (le sujet peut rester sur place, reculer ou avancer sans attaquer), c'est celui que nous imposerons dans nos consignes. Il existe également des stratégies propres à l'individu pour pointer et élever le bras vers la cible (van der Fits et al., 1998). Ces stratégies se distinguent par l'activation en premier soit du *deltoid anterior* soit du *biceps brachialis*. Cette non uniformité pose un problème pour dater le début du mouvement du bras en escrime.
Martin et al. (2000) ont montré que, selon que la cible se situe soit dans l'espace de préhension, soit en-dehors de cet espace dans un milieu incertain, le tronc est fortement impliqué en flexion et qu'il y a une modification du programme de trajectoire de la main. Par ce comportement, le sujet adopte une posture intermédiaire sur laquelle toutes sortes de mouvements du bras peuvent être ancrées. Nous nous attacherons à vérifier s'il en est de même dans le cas de l'escrime. La flexion du tronc permet un déplacement horizontal du centre de masse moins important que lors de l'allongement du bras. Or, d'une manière empirique, les entraîneurs de sabre ont tendance à affirmer que la bascule du tronc vers l'avant lors d'un mouvement de fente et d'allongement du bras (attaque) constitue un

défaut technique ne permettant aucun enchaînement d'actions par la suite. Il serait pertinent de vérifier cette hypothèse par des moyens scientifiques.

1.7. ADAPTATION DU MOUVEMENT

Dans notre étude, il faut réagir à un stimulus sonore. On suppose alors qu'il se produit chez les sujets des processus préparatoires avant l'arrivée du stimulus et des processus de réaction déclenchés par le stimulus. Une telle qualification des processus n'est vraie que si la réponse est effectivement déclenchée par le stimulus et non par une cadence fixe entre les signaux. Ceci implique que le stimulus survienne avec une incertitude temporelle. Chen et al. (1998) formulent l'hypothèse que l'incertitude diminue et modifie le seuil de discrimination visuelle de la vitesse de déplacement.
Dans une tâche de temps de réaction de choix, l'incertitude concerne la nature du signal à venir, et ce stimulus indique la réponse à donner. Dans des études concernant ce type de tâche, Sekuler et al. (1990) concluent que le système visuel a besoin d'un délai minimum pour optimiser le temps de réaction à un stimulus. Ainsi, lorsqu'un objet se déplace pendant un temps compris entre 500 et 700 ms, le système visuel perçoit plus vite un changement de direction que dans des durées plus courtes. Il semble donc que ce délai constitue le minimum nécessaire à l'adaptation visuelle mais qu'il dépend fortement de la tâche à effectuer. D'après Proteau et al. (1983), dans une tâche de temps de réaction de choix, en connaissant la probabilité de survenue d'un événement dans une zone spatiale précise, il est possible d'obtenir un temps de réaction plus court et aussi d'anticiper la réponse en se plaçant préférentiellement dans cette partie de la zone. Il s'agirait alors d'une adaptation comportementale avant le déclenchement du mouvement et non d'une adaptation au cours du mouvement.
Cependant, il est important de noter que la littérature n'abonde pas en expérimentations où le sujet répond à un stimulus provoqué par un autre sujet, celui-ci influençant son comportement.
En situation complexe d'escrime, nous n'avons pas de résultats scientifiques concernant la vraie nature du stimulus à l'origine d'une éventuelle adaptation. Est-ce le déplacement dans l'espace d'une partie particulière du corps, du corps en général, ou la vitesse de ces déplacements… ?

2. HYPOTHESES ET OBJECTIFS

Le but de notre étude consiste à tenter de répondre aux deux questions suivantes : 1) l'escrimeur choisit-il une action au préalable ; 2) son geste s'adapte t-il au cours du mouvement en tenant compte du mouvement adverse ?
Les APAs sont des phénomènes nécessaires à l'initiation du mouvement. Ils seraient spécifiques du mouvement à venir. Ainsi, si les APAs sont identiques, nous pensons que le début du mouvement, *i.e.* la première marche, devrait être identique. L'incertitude, quant au mouvement de l'adversaire, présente pour nous un élément essentiel. Nous pensons que les sujets, lorsqu'ils sont placés dans des conditions d'incertitude, vont montrer des

similitudes dans les premiers instants du mouvement qu'ils produisent. Ceci serait révélateur de leur intention. Pourra-t-on dans ces mêmes conditions observer des différences sur la suite du mouvement alors révélatrices d'une possible adaptation ?
La distance qui sépare les escrimeurs au cours de l'assaut est sans cesse en évolution, elle est la conséquence des actions qu'ils produisent. Nous sommes amenés à penser que l'escrimeur qui connaît par avance le mouvement de son adversaire serait capable d'estimer sa position finale. Cette situation avec certitude constituera les conditions stables de notre étude qui permettront d'analyser le comportement de nos sujets et la stratégie qu'ils utilisent lorsque la distance de la cible varie.
De plus, malgré le vécu, le niveau de pratique et l'entraînement quotidien des athlètes, dans l'ensemble très similaires, nous pensons pouvoir repérer des stratégies individuelles.

3. MATERIELS ET METHODES

3.1. SUJETS

Nous étudierons l'initiation du déplacement de l'escrimeur face à un **adversaire réel**.
Les sujets sont 6 volontaires (3 droitiers et 3 gauchers), tous membres de l'équipe de France de sabre. Ils s'entraînent deux fois par jour à l'Institut National des Sports et de l'Education Physique (INSEP). Les sujets ne connaissent ni le protocole expérimental, ni le but de l'expérience, et n'ont jamais eu d'expérience préalable avec le matériel utilisé. Les personnes testées lors des expérimentations sont en bonne santé et ne présentent aucune pathologie. L'adversaire reste la même personne pour tous les sujets afin d'obtenir une bonne reproductibilité des essais.

Sujet	latéralité	Age (an)	taille (m)	poids (N)	longueur jambes (m)	écart entre les pieds (garde) (m)	écart normalisé (/ longueur jambes) (%)	poids du sabre (N)	poids masque (N)
1	gaucher	22	1.92	785.58	1.170	0.300	25.6	4.7	10.2
2	gaucher	21	1.93	853.90	1.210	0.360	29.8	4.7	10.2
3	droitier	24	1.83	807.60	1.130	0.420	37.2	1.6	12.6
4	droitier	25	1.95	958.20	1.175	0.420	35.7	3.9	11.8
5	droitier	23	1.74	683.60	1.010	0.285	28.2	7.8	15.7
6	gaucher	22	1.83	727.50	1.040	0.325	31.3	4.7	13.3
	moyenne	22.8	1.867	802.73	1.123	0.352	31.3	4.6	12.3
	écart-type	1.47	0.081	96.91	0.080	0.059	4.4	2	2.1
adv	droitier	23	1.750	847.60	1.050	0.400	38.1	3.9	12.6

Tableau 1. Caractéristiques des sujets

De 1 à 6 : les sabreurs étudiés ; adv : adversaire cible unique pour l'ensemble des expérimentations ; m : mètre ; N : Newton ; écart : distance horizontale entre les pieds en posture initiale.

Les sujets (Tableau 1) présentent des caractéristiques relativement homogènes. Le groupe se côtoie quotidiennement, est entraîné par les mêmes personnes et suit le même programme d'entraînement.

3.2. DEFINITION DES TERMES

Nous appellerons « pas » l'action qui consiste à déplacer le pied avant. Nous appellerons « marche » le déplacement du pied avant suivi du déplacement du pied arrière. La nomenclature « marche » ne correspond donc pas ici à sa définition classique (dans le sens « marche » différent de « course ») mais au résultat final après déplacement de deux appuis. Au cours d'une même action, l'escrimeur peut alors effectuer une ou deux marches (*e.g.* marche-marche-fente). La « retraite » est un déplacement vers l'arrière à l'opposé de la « marche ».
Lors de la marche en escrime, les pieds ne se croisent jamais. Ainsi, le pied situé en arrière, en posture initiale, restera toujours en arrière du pied avant, quelle que soit la situation. Le règlement pénalise, au sabre, le croisement des pieds vers l'avant (autorisé dans un déplacement dirigé vers l'arrière).
Les termes ainsi définis sont employés dans le vocabulaire de l'escrime. Pour cette raison, nous les conservons dans notre étude.
Nous nommerons « adversaire », l'escrimeur complice qui applique le protocole expérimental selon les conditions de distance. Cet adversaire est toujours le même afin de s'assurer de la reproductibilité des conditions expérimentales.

3.3. MATERIELS

Nous utilisons :
- une plateforme de force et son amplificateur ;
- 4 caméras vidéo numériques ;
- des spots éclairant l'espace de capture vidéo ;
- un volume en tiges métalliques permettant de calibrer l'espace d'expérimentation (cage de calibration) ;
- un contacteur (sous le pied avant de l'escrimeur testé) permettant de dater précisément le décollement du pied ;
- un système de synchronisation qui déclenche l'acquisition des données de la plateforme de forces, qui allume aussi un système de diodes permettant de synchroniser les caméras entre elles, et qui délivre un signal carré enregistré en parallèle des voies de plateforme et le signal sonore du départ de l'action, via un haut parleur.

3.3.1. Méthodes d'enregistrement vidéo

Les deux adversaires sont vêtus d'une combinaison noire, portent un masque, leurs chaussures d'escrime (adaptées à la pratique) et leur sabre. Des marqueurs lumino-réfléchissants sont placés aux articulations comme l'exige le modèle anthropométrique de Winter (1990). Grâce à ce modèle, il est alors possible de situer le centre de masse de chacun des segments et ensuite de construire le centre de masse global du sujet. Le sujet porte 25 marqueurs.

Ces marqueurs sont visibles sur les enregistrements vidéo effectués par : 1) trois caméras (25Hz) orientées vers le sujet de l'expérience permettant une reconstruction en 3 dimensions de son mouvement et 2) une orientée sur l'adversaire (2 dimensions), permettant de contrôler le respect du protocole expérimental. L'obturateur électronique des caméras (shutter) est réglé manuellement pour une vitesse d'obturation de 1/1000e pour avoir une bonne définition des marqueurs sur l'image.
Des diodes sont reliées entre elles par un câble de liaison, positionnées devant chaque caméra et commandées par l'émetteur qui envoie un signal électrique. Ce signal permet d'allumer les trois diodes au même moment pendant une durée de 2 s. Ainsi, la même image pourra être identifiée pour chaque caméra soit au début, soit à la fin de l'allumage des diodes.

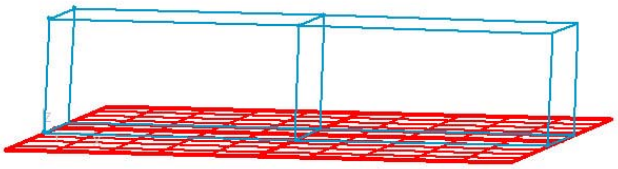


Figure 1. Cage de calibration

Les dimensions de la cage de calibration sont les suivantes : 4.06 m de long (2 fois 2.03 m), 1.03 m de large et 1.98 m de haut.

Trois projecteurs d'une puissance de 2000 watts ont été installés pour obtenir une concentration maximale de lumière sur l'ensemble des marqueurs.
Des rideaux noirs ont été placés à l'opposé du champ des caméras pour augmenter le contraste lumineux.
L'étalonnage vidéo nécessite au minimum 11 points afin de déterminer les 11 constantes de la DLT (Direct Linear Transformation)[1] pour chaque caméra utilisée lors des manipulations expérimentales. Pour ce faire, il faut disposer d'un objet de contrôle ou de calibration dont on connaît précisément les coordonnés 3D de plusieurs points dans un repère défini comme repère de contrôle. L'étalonnage des images enregistrées par les caméras a été réalisé à l'aide d'un parallélépipède possédant 12 repères de calibration (Figure 1). Ces repères sont revêtus d'un matériau réfléchissant (Scotch-lite®). Ce parallélépipède délimite le volume à l'intérieur duquel les escrimeurs effectueront leurs

[1] La DLT fût mise au point pour tout type de caméra. L'algorithme de reconstruction DLT permet, à partir des prises de vue d'un même point réalisées à l'aide d'au moins deux caméras, de reconstruire les coordonnées 3D de ce point. La DLT est utilisée pour déterminer des trajectoires 3D de points à partir de films (24 images par seconde) ou de vidéo (25 images par seconde pour le format vidéo européen et 30 images par seconde pour le format asiatique et américain). Une reconstruction 3D est alors appliquée sur chaque image ce qui permet ainsi de déterminer les trajectoires 3D des points filmés. L'utilisation de dispositifs permettant la numérisation d'images vidéo successives facilite le calcul des coordonnées x, y, z des objets étudiés en mouvement. La méthode de DLT a ensuite été appliquée au domaine de la biomécanique. L'analyse vidéo 3D est ainsi devenue un moyen peu coûteux et relativement précis d'étude de la dynamique du geste sportif. Par exemple, l'étude de Shapiro, (1978) démontra la validité de la méthode pour des mouvements dynamiques, en filmant la chute libre d'une balle de golf et en comparant l'accélération de cette dernière avec celle de la pesanteur. L'écart entre l'accélération mesurée de la pesanteur et celle théorique fût inférieur à 5 %.

déplacements. En effet, il est nécessaire, dans un souci de précision et de qualité des mesures, de placer les points de contrôle de façon homogène dans l'espace d'évolution du sportif. La reconstruction 3D des coordonnées ne sera correcte que dans le volume étalonné (qui est défini par les points de contrôle). En dehors de celui-ci, les erreurs iront en augmentant au fur et à mesure de l'éloignement du volume calibré. L'axe des Y correspond à celui de la direction principale des déplacements.

3.3.2. Plateforme de force et contacteur

La plateforme de force[2] utilisée pour l'étude est de marque AMTI, modèle LG6-4-4000 (Figure 2). Elle possède des jauges de contraintes qui forment six ponts de Wheatstone et a été réglé avec une fréquence d'échantillonnage de 500 Hz. Ses dimensions sont de 121,92 cm x 60,96 cm (Photo 3). La particularité principale de la plateforme de force utilisée lors de l'étude se situe au niveau de son emplacement. En effet, elle est directement intégrée dans la piste d'un stade couvert et elle est recouverte du même tartan synthétique. Ceci permet de ne pas perturber les sportifs lorsqu'ils réalisent leurs mouvements. Lors du calibrage de l'appareil, l'épaisseur du rajout synthétique a été prise en compte pour le calcul de la ligne de base. Ceci permet donc l'analyse des appuis en situation réelle de réalisation d'actions motrices. Cette plateforme est suffisamment grande pour enregistrer une marche entière. L'incertitude des mesures des forces est de ± 4 N.
Pour chaque athlète, une mesure en position immobile a été effectuée sur le plateau pour obtenir le poids du corps.
Les informations de poussée sur le sol sont couplées à la datation du lever du pied avant lors du début de l'action. Cette dernière est obtenue à l'aide d'un *contacteur*. Ce capteurs de pressions de type « tout ou rien » permet de dater l'information au moment de la perte de contact avec le capteur. Le contacteur est formé d'une plaque ronde et déformable sous laquelle est disposé, au niveau central, le capteur.

[2] Lors de l'exécution de mouvements possédant comme base d'appui le sol, il est possible d'enregistrer des informations provenant de la pose du ou des appuis. Ces signaux concernant la cinétique sont l'expression des forces résultantes lors des appuis. La mesure de ces dernières peut s'effectuer avec un outil spécifique : *la plateforme de force* qui permet de recueillir, à chaque instant de la phase d'appui, les composantes latérales (Fx), antéro-postérieures (Fy) et verticales (Fz) de la force exercée par l'athlète sur le sol, ainsi que les moments de force associés (Mx, My et Mz). Cet outil permet ainsi, par calcul, une analyse cinématique globale des mouvements complexes chez l'être humain. En d'autres termes, il permet l'étude des déplacements du centre de masse et du centre des pressions lors de l'appui. La description d'une plateforme de force peut être schématisée par un plateau immobile formé d'un cadre métallique suspendu à des capteurs tri-axiaux. Sur cette armature vient se positionner une plaque rigide. Tout cet ensemble est fixé à une armature rigide permettant de l'isoler des vibrations provenant de son environnement extérieur. Cet outil est raccordé à l'aide d'un câble souterrain à un amplificateur (gain : 1000) puis à un boîtier de connections. Les signaux analogiques sont alors acheminés vers l'unité centrale du système de capture d'image, ce qui permet une acquisition des données en simultanée.

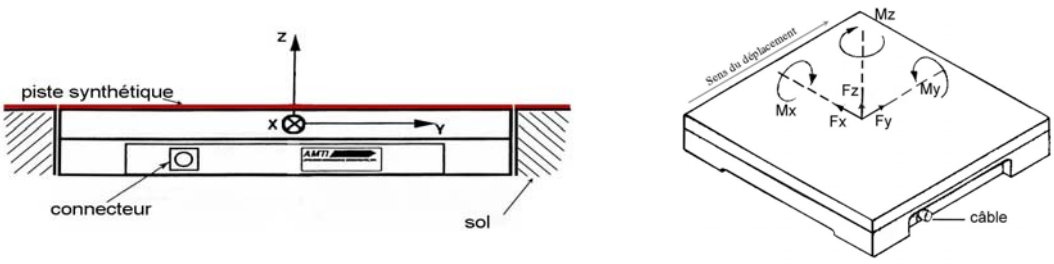


Figure 2.Vue schématique de profil et de ¾ dessus de la plateforme de force AMTI intégrée au sol

F : force externe, M : moment de force ; x, y, z : respectivement, composantes latérale, antéropostérieure et verticale.

Le contacteur produit un signal électrique lorsqu'il n'est plus chargé (perte de contact du pied avec le sol). Il a ainsi été possible de dater précisément le lever du pied avant.



Photo 3. Plateforme de force

3.3.3. Connectique

Les signaux analogiques provenant de la plateforme de force et du contacteur sont amplifiés et acheminés vers l'unité centrale.

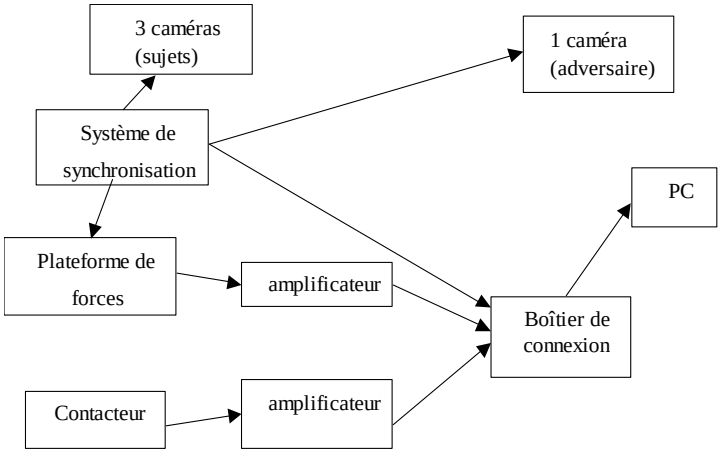


Figure 3. Schéma de la connectique utilisée lors des expérimentations

Chacun de ces signaux est enregistré avec une fréquence d'échantillonnage de 500 Hz. Afin de permettre l'enregistrement simultané de tous ces signaux (plateforme de force, contacteur et signal de départ), un boîtier de connections a été conçu (
Figure 3). Il a permis l'acquisition des huit signaux analogiques, dont six pour la plateforme, en simultané.

3.4. ACQUISITION DES DONNEES

Les données (forces et moments) de la plateforme sont enregistrées par le logiciel BEDAS-2 propre à la plateforme AMTI. Les coordonnées du centre des pressions sont ensuite calculées au moyen des forces et moments enregistrés par la plateforme de force, ainsi :

$$xP = \frac{My}{Rz} \text{ et } yP = -\left(\frac{Mx}{Rz}\right) \qquad \text{Équation 1}$$

xP et yP : coordonnées du centre des pression ; Mx et My : composantes du moment résultant sur les axes x et y, Rz : force selon l'axe vertical.

Les films vidéo sont numérisés grâce à la carte MIRO DC 30+ et ADOBE PREMIERE 5.1. Les marqueurs lumino-réfléchissants sont ensuite pointés manuellement trame par trame, la fréquence des images passe donc à 50 Hz, grâce au logiciel SNAP 3.2. Caméra par caméra, un fichier 3D est reconstruit à partir de ces données grâce au logiciel DLT 2.0. Une modélisation est appliquée au personnage en trois dimensions dans 3D VIEW. Les paramètres cinématiques sont calculés dans le logiciel DYNAVIEW. SNAP 3.2, DLT 2.0, 3D VIEW et DYNAVIEW sont des programmes du software 3D VISION (Biometrics).
L'adversaire est filmé également par une caméra qui servira à la reconstruction en deux dimensions. Ces données cinématiques sont utilisées pour vérifier le respect du protocole.

3.5. PROTOCOLE

3.5.1. Conditions expérimentale

Le protocole comporte deux sessions. Chaque session est composée de trois conditions de distance qui sont **exécutées par l'adversaire** et répétées 8 fois de façon aléatoire (Tableau 2).
La première session (U) est dite « avec incertitude » : le sujet ne connaît pas à l'avance le comportement de l'adversaire (les mouvements). La seconde session (C) est dite « avec certitude », c'est à dire que le sujet connaît à l'avance le mouvement de l'adversaire. Ces mouvements constituant les trois conditions de distance sont les suivants :
1) la condition M (deux marches-fente) représente le plus grand déplacement effectué par l'adversaire. Pour la tâche de touche, le sujet test devrait réaliser un petit déplacement corporel, car l'adversaire avance beaucoup sur lui (Photo 4) ;
2) la condition R (marche-retraite) représente une situation où le sujet adversaire revient approximativement à sa position de départ. Le sujet test aurait donc la nécessité d'effectuer un grand déplacement car l'adversaire revient à son emplacement initial (Photo 5) ;
3) la condition F (marche-fente) est une condition intermédiaire où le sujet adversaire avance mais moins qu'en condition M et plus qu'en condition R. Le sujet test devrait effectuer un déplacement également intermédiaire (Photo 6).
Ces mouvements sont employés quotidiennement lors des différents entraînements et sont donc très bien connus par tous les sujets (la condition est tirée au sort, permettant d'éviter les effets de l'apprentissage et de répartir les effets de la fatigue entre les conditions).

Session	Distance longue Condition M	Distance intermédiaire Condition F	Distance courte Condition R
Avec incertitude (U)	deux marches-fente	marche-fente	marche-retraite
Avec certitude (C)	deux marches-fente	marche-fente	marche-retraite

Tableau 2. Plan expérimental

Sous le talon du pied avant, nous installons le contacteur permettant de dater avec précision le début du décollement du pied.



Photo 4. Chronophotographie de l'enchaînement deux marches-fente (M)



Photo 5. Chronophotographie de l'enchaînement marche-retraite (R)



Photo 6. Chronophotographie de l'enchaînement marche-fente (F)

L'adversaire est situé à 4 mètres du sujet (Figure 4), ce qui représente la distance réglementaire de « mise en garde ». L'expérimentateur lui indique la condition à effectuer dans la première session (avec incertitude) sans l'annoncer au sujet. Dans la seconde session (avec certitude), il l'annonce également au sujet.
Une personne jouant le rôle de l'arbitre donne les commandements officiels de l'escrime : « en garde », « êtes-vous prêts ? ». Le « allez » est remplacé par le signal sonore, qui allume également les diodes, ainsi qu'un signal électrique de type carré (permettant de synchroniser les différents signaux).

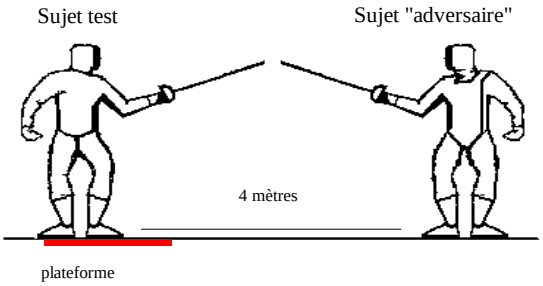


Figure 4. Position initiale du sujet testé et de l'adversaire

Le sabreur testé débute son action en étant placé sur une plateforme de force, le sujet adversaire est le « complice » de l'expérimentateur, c'est lui qui applique les conditions de distance. Ils sont séparés initialement d'une distance réglementaire de 4 mètres.

3.5.2. Consignes aux sabreurs

Afin de limiter la complexité des situations, nous avons contraint les sujets au respect de deux consignes : 1) réagir le plus vite possible au signal sonore ; 2) attaquer l'adversaire à la tête (seule cette partie du corps étant protégée) dans le respect des règles de l'escrime.
Un temps de repos est accordé entre les essais.

3.5.3. Position des pieds en posture initiale

Le sujet est en position « en garde » sur la plateforme de force, les pieds en L, légèrement écartés (Figure 5). Le pied avant pointe vers l'avant et le pied arrière est à sa perpendiculaire. La position spécifique à chaque sujet sera toujours la même au début de chaque essai (nous traçons des repères au sol). D'après le tableau des caractéristiques des sujets, la moyenne de l'écart entre les pieds est proche de 1/3 de la longueur des jambes, malgré des différences individuelles.



Figure 5. Position « en garde » de l'escrimeur

3.5.4. Description du début de l'action en escrime

L'escrimeur commence généralement une action par une marche telle qu'elle est définie au préalable (Figure 6). Puis, il effectue soit une seconde marche (selon la distance le séparant de l'adversaire), soit une attaque (fente), soit une retraite (pour se mettre hors distance, s'il est menacé). Cependant, ce début n'est pas exclusif, il existe d'autres modalités pour initier une action. Ces dernières seront écartées d'une partie de notre étude.

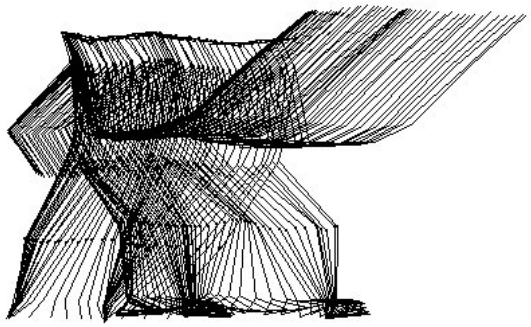


Figure 6. Kinogramme de la marche en escrime

4. ETUDE DE L'ADVERSAIRE CIBLE

4.1. INTRODUCTION

Cette étude comportait une cible vivante, appelé « l'adversaire » afin de se rapprocher au mieux des conditions réelles de pratique compétitive. Il s'agissait d'un sabreur de niveau national identique pour toutes les expérimentations. C'est lui qui appliquait le protocole des conditions de distances. Le protocole des sessions avec certitude ou incertitude s'appliquait aux sujets étudiés. L'adversaire a donc effectué, à chaque expérimentation, 16 essais (huit plus huit) pour chaque condition de distance dans un ordre aléatoire, tiré au sort.

Avant d'analyser les données des autres sabreurs, il était absolument nécessaire de s'assurer de la reproductibilité de notre « complice ». En effet, si les mouvements qu'il effectuait pour une même condition, s'étaient avérés différents dans leur organisation spatio-temporelle, nous n'aurions pas pu considérer que les sabreurs étudiés effectuaient bien huit essais pour une même condition expérimentale.

Tous les essais de l'adversaire sont filmés de profil à 50 Hz. Quinze marqueurs sont placés sur : le masque (1 sur le CG du masque repéré à l'avance), l'arme (1 sur la pointe) et sur certains points anatomiques du corps du sujet (épaule arrière, coude arrière, thorax, bassin, talon avant, les 2 poignets, les 2 genoux, les 2 chevilles et les 2 pointes de pied). L'adversaire portait une tenue noire moulante pour un meilleur contraste des cibles et une meilleure précision de positionnement. L'ensemble des essais de la première et de la dernière expérimentation est analysé, soit 96 essais. En effet, si les mouvements de

l'adversaire » sont non-différents malgré plusieurs semaines entre ces deux séries, on peut formuler l'hypothèse que son expertise dans l'activité lui permet d'être reproductible sur les déplacements de base qui ont été choisi dans le protocole.

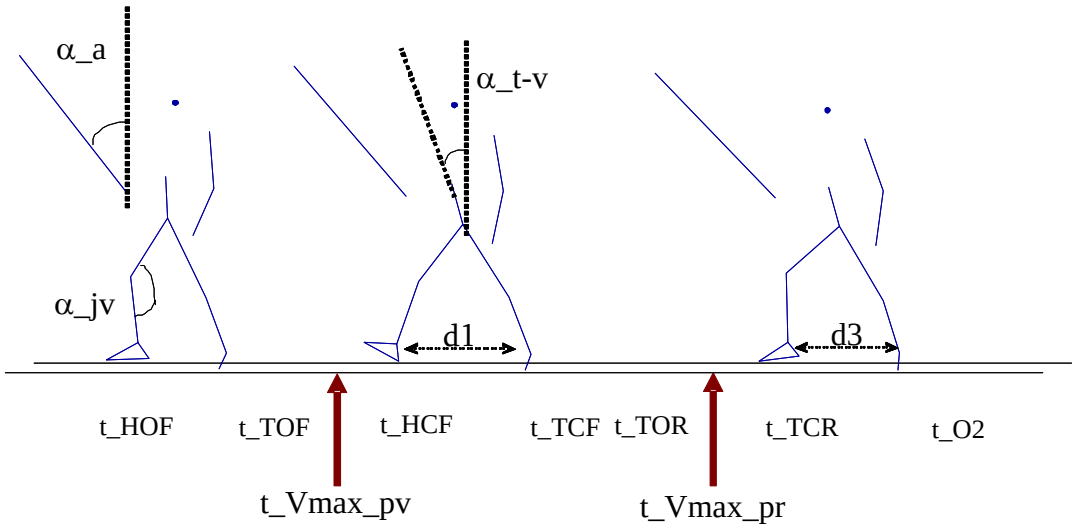


Figure 7 : Variables mesurées au cours de la première marche de « l'adversaire »

Les trois figures sont des exemples de représentation « fil de fer » obtenus à partir des marqueurs enregistrés, à gauche en posture initiale, au centre après déplacement du pied avant, à droite après déplacement du pied arrière ; d1 : distance entre les pieds après déplacement avant ; d3 : distance entre les pieds après déplacement arrière ; α_a : angle entre l'axe de l'arme et la verticale, α_t-v : angle entre l'axe du tronc et la verticale ; α_jv : angle de la jambe avant ; t_Vmax_pv : représentation chronologique de l'instant auquel apparaît la vitesse maximale du pied avant ; t_ Vmax_pr : représentation chronologique de l'instant auquel apparaît la vitesse maximale du pied arrière ; t : instant d'apparition d'événements liés aux appuis ; HOF : lever du talon avant ; TOF : lever des pointes de pieds avant ; HCF : poser du talon avant ; TCF : poser des pointes de pied avant ; TOR : lever des pointes de pieds arrière ; TCR : poser des pointes de pieds arrière ; O2 : lever du pied avant ou arrière pour le second mouvement.

Les objectifs de cette partie d'étude sont donc : 1) valider un protocole avec une cible vivante ; 2) repérer des variables discriminant la première marche ; 3) formuler des hypothèses sur les variables qui seraient repérables par l'autre sabreur.

4.2. TRAITEMENT DES DONNEES

Les principales variables étudiées (
Figure 7) ne concernent que la première marche qui est présente pour les trois enchaînements d'action retenus : marche-marche-fente, marche-fente, marche-retraite. Ces variables sont : distance entre les pieds (d), angle de la jambe avant (α_jv), angle du sabre avec la verticale (α_a) et angle du tronc avec la verticale (α_t-v), à différents instants en rapport avec les changements d'appui (de -1 : posture initiale à 02 : requitter un appui pour l'action suivante). Nous avons aussi analysé les pics de vitesse de la pointe de pied avant (Vmax_pv) et de la pointe de pied arrière (Vmax_pr). Des tests t pour échantillons

indépendants et pour échantillons appareillés ont été effectués, ainsi qu'une Analyse en Composantes Principales[3] (ACP) avec rotation (varimax normalisé).

4.3. POSTURE INITIALE

Nous avons analysé les caractéristiques de la posture initiale de l'adversaire. Nous voulons vérifier si sa géométrie corporelle est bien identique au début de chaque action, quelle que soit la série expérimentale, ou la condition de distance. Les variables étudiées sont celles qui donnent les grandes lignes de positionnement du système sabreur-arme. En d'autres termes, il s'agissait de regarder si la posture était reproductible d'une série à une autre, mais aussi d'une condition à une autre, afin de s'assurer qu'aucune information visuelle n'était fournie aux autres sabreurs quant au mouvement qui allait suivre.

4.3.1. Reproductibilité de la posture initiale

Variables	moy série 1	moy série 6	t	P	E-T série 1	E-T série 6
d_{-1} (cm)	36.2	35.8	0.770	0.443	2.8	2.4
α_{-1}_jv (°)	145.1	144.2	0.719	0.474	6.4	5.4
α_{-1}_a (°)	40.8	40.8	0.026	0.979	2.1	2.4
α_{-1}_t-v (°)	10.8	11.5	-1.278	0.205	3.1	1.9

Tableau 3 : Comparaison des variables de la posture initiale entre la première et la dernière série

Moyennes et écart-types pour la première série expérimentale (série 1) et la dernière (série 6) de, l'écart entre les pieds (d_{-1}), l'angle de la jambe avant (α_{-1}_jv), l'angle que forme le sabre avec la verticale (α_{-1}_a) et l'angle que forme le tronc avec la verticale (α_{-1}_t-v). Valeurs du test t et du p qui n'est jamais significatif.

Un test t de Student entre les valeurs de la première série et de la dernière série ne montre aucune différence significative pour l'écart entre les deux pieds (d_{-1}Foot) qui est 36 cm, l'angle de la jambe avant (α_{-1}_jv) qui est de 145°, l'angle que forme le sabre avec la verticale, *i.e.* son inclinaison (α_{-1}_a) qui est de 41° et l'angle que forme le tronc avec la verticale (α_{-1}_t-v) qui est de 11° (Tableau 3).
Un expert est donc capable de se positionner de manière identique dans les grandes lignes de sa géométrie corporelle pour une posture appartenant à son répertoire d'activité et ceci à plusieurs semaines d'intervalle.

[3] L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode statistique multifactorielle utilisée pour résumer l'information apportée par un grand nombre de variables numériques. Elle transforme en distances euclidiennes des proximités statistiques entre éléments. La liaison entre deux variables est mesurée par le coefficient de corrélation linéaire. Les variables initiales sont remplacées par des combinaisons linéaires de celles-ci : les « Composantes Principales ». Une Composante Principale (CP) peut être considérée comme le représentant d'un groupe de variables liées entre elles

4.3.2. Une posture initiale non « informative »

Des variables supplémentaires ont été analysées (Figure 8) pour vérifier que l'adversaire ne fournissait aucune information aux autres sabreurs dès sa position initiale quant à la séquence d'actions qui allait suivre. Nous avons quantifié (Tableau 4) la distance horizontale qui sépare le poignet portant l'arme du tronc (d_{-1}_t-v), l'angle que forme la jambe arrière (α_{-1}_jr) et l'angle que forme le bras non-armé (α_{-1}Arm) en position statique de départ.

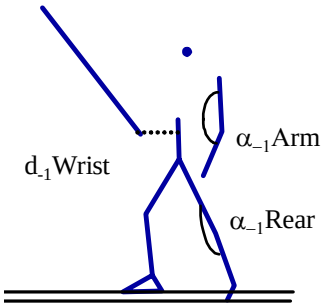


Figure 8 : Variables complémentaires mesurées en posture initiale

Variables	moy	E-T
α_{-1}_jr (°)	173.8	2.6
α_{-1}Arm (°)	150.2	5.0
d_{-1}Wrist (cm)	22.1	2.7

Tableau 4 : Variables complémentaires mesurées en posture initiale

moy : moyenne ; E-T : écart-type ; α_{-1}_jr : angle de la jambe arrière ; α_{-1}Arm : angle du bras non-armé ; d_{-1}Wrist : distance entre le poignet armé et le tronc.

Un ensemble de tests t de Student entre les valeurs de chaque condition de distance, deux à deux, et pour chacune des deux séries expérimentales analysées ne montre aucune différence significative (Tableau 5).

Variables	Série	F *vs* M		F *vs* R		M *vs* R	
		t	p	t	P	t	p
α_{-1}_jr	1e	0.111	0.912	-0.921	0.365	-1.192	0.243
	6e	0.297	0.769	0.322	0.750	0.007	0.995
d_{-1}Wrist	1e	0.330	0.744	0.967	0.342	0.713	0.481
	6e	1.521	0.141	1.330	0.194	-0.144	0.887
α_{-1}Arm	1e	1.089	0.285	0.682	0.501	-0.429	0.671
	6e	-0.059	0.953	-1.448	0.158	-1.040	0.308

Tableau 5 : Tests t de Student entre les conditions de distance pour différentes variables de la posture initiale

α_{-1}_jr : angle de la jambe arrière ; α_{-1}Arm : angle du bras non-armé ; d_{-1}Wrist : distance entre le poignet armé et le tronc ; F : marche-fente ; M : marche-marche-fente ; R : marche-retraite.

Un escrimeur expert est donc capable de se positionner à l'identique au départ de séquences d'actions différentes. Les sabreurs étudiés, positionnés en face de cet adversaire, ne peuvent donc prendre aucune information visuelle qui leur permettrait d'anticiper l'action qu'il va effectuer.

4.4. PREMIERE MARCHE

Parmi toutes les variables mesurées (Tableau 5), celles qui présentent le plus de différences entre les trois conditions de distance sont :

- la distance entre les deux pieds à l'instant de la pose du talon avant (d1) et à l'instant de la pose de la pointe de pied arrière (d3) ;
- l'angle entre le tronc et la verticale à l'instant de la pose du talon avant (αHCF_t-v), à l'instant de la pose de la pointe de pied avant (αTCF_t-v) et à l'instant du décollement de la pointe de pied arrière (αTOR_t-v) ;
- l'angle de la jambe avant à l'instant de la pose de la pointe de pied avant (αTCF_jv), à l'instant de la pose de la pointe de pied arrière (αTCR_jv) et à l'instant du décollement d'un appui pour l'action suivant la première marche (α02_jv) ;
- l'instant de ce dernier événement (t_02) ;
- les pics de vitesse du pied avant (Vmax_pv), du pied arrière (Vmax_pr) et les instants auxquels ils surviennent (t_Vmax_pv et t_Vmax_pr).

Variables	M		F		R	
	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T
d1 (cm)	75.08	4.15	88.50	7.15	77.63	13.42
d3 (cm)	29.78	8.91	20.71	8.05	44.80	5.02
αHCF_t-v (°)	17.90	2.58	20.76	2.70	15.21	1.77
αTCF_t-v (°)	18.90	2.45	22.19	3.35	15.51	2.03
αTOR_t-v (°)	19.18	2.05	21.43	2.98	15.48	1.82
αTCF_jv (°)	149.25	5.10	138.13	7.49	152.48	2.85
αTCR_jv (°)	137.34	7.96	119.11	7.04	144.53	3.58
α02_jv (°)	130.24	7.23	118.11	7.44	137.90	4.11
t_O2 (s)	0.591	0.048	0.660	0.047	0.873	0.141
Vmax_pv ($m.s^{-1}$)	2.30	0.19	2.66	0.28	2.52	0.25
t_Vmax_pv (s)	0.177	0.014	0.201	0.029	0.175	0.028
Vmax_pr ($m.s^{-1}$)	4.29	0.72	5.78	0.56	2.75	0.26
t_Vmax_pr (s)	0.506	0.043	0.582	0.047	0.572	0.062

Tableau 5 : Valeur moyenne et écarts-type des variables étudiées dans la 1ère marche de l'adversaire

M : condition marche-marche-fente ; F : condition marche-fente ; R : condition marche-retraite ; moy : moyenne ; E-T : écart-type ; dFoot : écart entre les pieds ; α_t-v : angle tronc-verticale ; α_jv : angle de la jambe avant ; t : instant ; Vmax : pic de vitesse, pv : de la jambe avant, pr : de la jambe arrière ; HCF : poser du talon avant ; TCF : poser des pointes de pieds avant ; TOR : lever des pointes de pieds arrière ; TCR : poser des pointes de pieds arrière ; O2 : lever du pied avant ou arrière pour le second mouvement.

En revanche, afin de nous assurer que la première marche était reproductible pour la même condition de distance, nous avons effectué une série de tests t de Student sur ces mêmes variables entre la première et la dernière série expérimentale. Aucun des tests, sur aucune variable, et dans aucune condition de distance, n'a montré de différence significative. L'expert est donc capable de reproduire une séquence motrice appartenant à son répertoire d'expertise de manière identique dans son organisation spatio-temporelle.
Pour analyser les différences entre les conditions expérimentales pour les valeurs des variables de la première marche, nous avons effectué une Analyse en Composantes

Principales avec l'ensemble de ces variables en variables actives. Nous observons d'ores et déjà sur la matrice des corrélations (Tableau 6) que la plupart des variables présentent, deux à deux, une corrélation significative entre elles[4]. Les corrélations sont systématiquement positives pour un même angle à différents instants et systématiquement négatives entre les angles du tronc et les angles de la jambe avant. Le pic de vitesse du pied avant ne présente des corrélations négatives qu'avec les angles de la jambe avant alors que le pic de vitesse du pied arrière présente des corrélations négatives avec ce même angle mais aussi avec t_O2 et d3.

	t_Vmax_pv	Vmax_pv	d1	αHCF_t-v	αTCF_jv	αTCF_t-v	αTOR_t-v	t_Vmax_pr	Vmax_pr	d3	αTCR_jv	t_O2
t_Vmax_pv	1											
Vmax_pv	0.10	1										
d1	0.15	0.60	1									
αHCF_t-v	0.37	0.30	0.39	1								
αTCF_jv	-0.41	-0.41	-0.56	-0.70	1							
αTCF_t-v	0.42	0.36	0.43	0.83	-0.73	1						
αTOR_t-v	0.41	0.30	0.38	0.79	-0.67	0.93	1					
t_Vmax_pr	0.56	0.00	0.07	0.03	-0.22	0.01	-0.06	1				
Vmax_pr	0.37	0.26	0.47	0.76	-0.82	0.78	0.75	0.11	1			
d3	-0.42	0.05	-0.25	-0.63	0.74	-0.65	-0.63	-0.29	-0.88	1		
αTCR_jv	-0.33	-0.41	-0.56	-0.66	0.85	-0.71	-0.66	-0.16	-0.87	0.69	1	
t_O2	0.14	0.01	-0.12	-0.41	0.24	-0.40	-0.44	0.67	-0.52	0.35	0.37	1
αO2_jv	-0.31	-0.41	-0.52	-0.67	0.83	-0.71	-0.67	-0.07	-0.81	0.62	0.94	0.40

Tableau 6 : Matrice des corrélations entre les variables de la 1er marche pour toutes les conditions de distance

dFoot : écart entre les pieds ; α_t-v : angle tronc-verticale ; α_jv : angle de la jambe avant ; t : instant ; Vmax : pic de vitesse, pv : de la jambe avant, pr : de la jambe arrière ; HCF : poser du talon avant ; TCF : poser des pointes de pied avant ; TOR : lever des pointes de pieds arrière ; TCR : poser des pointes de pieds arrière ; O2 : lever du pied avant ou arrière pour le second mouvement. En rouge : les coefficients de corrélation significatifs à p<05.

L'Analyse en Composantes Principales (ACP1) montre trois composantes principales (ou axes factoriels) qui résument 81% de la variance (Tableau 7). La première composante

[4] On procède axe par axe pour définir les composantes principales. L'examen du plan factoriel permet de visualiser les corrélations entre les variables et d'identifier des groupes d'individus ayant pris les mêmes valeurs pour les mêmes variables. Dans le cercle des corrélations, les variables fortement corrélées avec un axe vont contribuer à la définition de cet axe. Cette corrélation se lit directement sur le graphique puisqu'il s'agit de la coordonnée du point-variable sur l'axe. On s'intéresse par conséquent aux variables présentant les plus fortes coordonnées (ce qui les situe proches du cercle de corrélations) et l'on interprétera les composantes principales en fonction des regroupements de certaines de ces variables et de l'opposition avec les autres. Le nuage des variables est donc situé sur une sphère de rayon 1. Le cosinus de l'angle formé par les vecteurs représentant deux variables, obtenu en calculant le produit scalaire entre ces deux vecteurs, est égal au coefficient de corrélation entre ces deux variables.
La valeur propre (ou l'inertie liée à un facteur) est la variance des coordonnées des points-individus sur l'axe correspondant. C'est un indice de dispersion du nuage des individus dans la direction définie par l'axe. Dans une analyse normée, la somme des inerties est égale au nombre de variables et donc l'inertie moyenne vaut 1. Chaque axe étant une combinaison particulière des variables d'origine, on s'intéresse en général aux axes ayant une inertie « notablement » supérieure à la moyenne. Les pourcentages d'inertie des axes définissent les « pouvoirs explicatifs » des facteurs : ils représentent la part de la variance (ou inertie) totale prise en compte par chaque facteur.

(55% de la variance) est majoritairement représentée par le pic de vitesse du pied arrière, les angles du tronc et de la jambe avant aux différents instants de changement d'appui et la distance entre les pieds au poser de la jambe arrière. La seconde composante (15% de la variance) est majoritairement représentée par les trois temps que nous avons retenus et la troisième composante (11% de la variance) est majoritairement représentée par le pic de vitesse du pied avant et la distance entre les pieds au poser de la jambe avant.

Variables	Composantes		
	1	2	3
Vmax_pr	0.94	-0.05	-0.16
αTCR_jv	-0.91	-0.03	-0.10
αTCF_jv	-0.90	-0.14	-0.08
αTCF_t-v	0.89	-0.08	-0.06
αO2_jv	-0.89	0.04	-0.11
αTOR_t-v	0.85	-0.14	-0.12
αHCF_t-v	0.84	-0.09	-0.10
d3	-0.79	-0.13	0.45
t_Vmax_pr	0.12	0.95	-0.09
t_O2	-0.44	0.80	0.22
t_Vmax_pv	0.46	0.62	-0.22
t_Vmax_pv	0.42	0.03	0.81
d1	0.58	0.04	0.62

Tableau 7 : Coordonnées des points variables sur les trois premiers axes factoriels de l'ACP1

Variables actives, dFoot : écart entre les pieds ; α_t-v : angle tronc-verticale ; α_jv : angle de la jambe avant ; t : temps ; Vmax : pic de vitesse, pv : de la jambe avant, pr : de la jambe arrière ; HCF : poser du talon avant ; TCF : poser des pointes de pied avant ; TOR : lever des pointes de pieds arrière ; TCR : poser des pointes de pieds arrière ; O2 : lever du pied avant ou arrière pour le second mouvement.

La représentation des variables sur le cercle des corrélations dans le plan des deux premières composantes principales (Figure 9) illustre bien que les angles du tronc et de la jambe s'opposent sur la première composante, avec la distance entre les pieds à l'instant du poser arrière du même côté que les angles de la jambe (côté négatif) et le pic de vitesse du pied arrière du même côté que les angles du tronc (côté positif) mais que l'instant de survenue de ce pic est quasiment indépendant des précédentes variables puisque placé du côté positif de l'axe 2 et formant un presque angle droit avec elles. En revanche, les autres variables de temps et les deux distances entre les pieds se situent davantage comme des compromis entre deux axes (1 et 2 pour les temps ; 1 et 3 pour les distances).

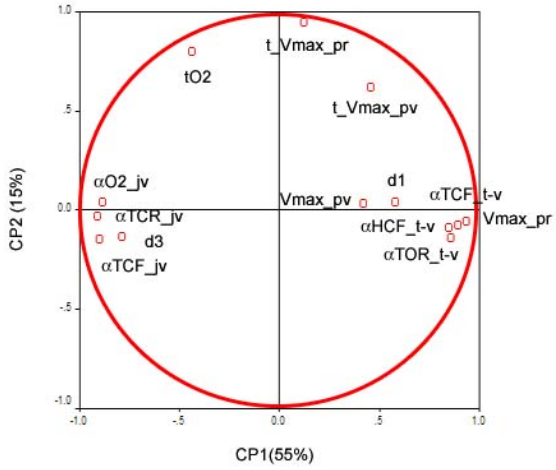


Figure 9 : Cercle des corrélations dans le plan des deux premières composantes principales (ACP1)

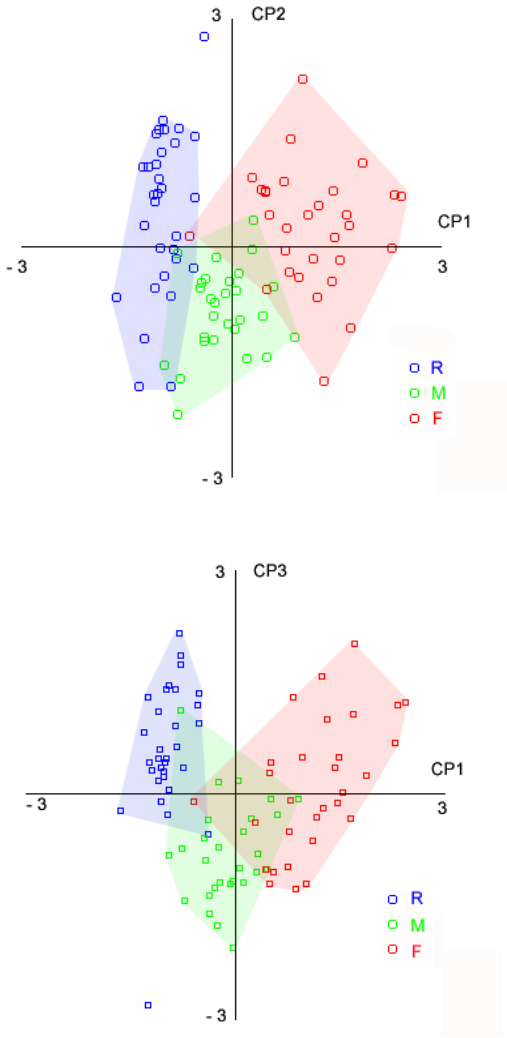


Figure 10 : Cartes factorielles issues de l'ACP1

En haut : dans le plan constitué des axes factoriels 1 et 2 ; en bas : dans le plan constitué des axes factoriels 1 et 3. R : condition de retraite ; M : condition d'attaque longue ; F : condition d'attaque courte.

Les cartes factorielles[5] issues de cette analyse (Figure 10) montrent que les essais de la condition marche-fente s'opposent aux essais de la condition marche-retraite sur le premier axe factoriel et que sur cet axe, c'est la condition marche-marche-fente qui est intermédiaire. Sur l'axe 2, les essais des conditions F et R sont très étalés, alors que les essais de la condition M sont surtout situés du côté négatif de cet axe. Sur l'axe 3, même si l'on note une assez grande dispersion de tous les essais, on remarque aussi qu'il existe une tendance à l'opposition entre les essais F et R du côté positif et les essais M du côté négatif.
Dans cette ACP1 nous avons mis trois instants comme variables actives, ces instants sont très bien représentés sur l'axe deux qui résume 15% de la variance. Afin de mieux comprendre l'organisation des autres variables, nous analyserons une seconde Analyse en Composantes Principales (ACP2) dans laquelle nous prenons les mêmes variables actives que pour l'ACP1, sans les trois valeurs de temps.

Variables	Composantes		
	1	2	3
Vmax_pv	0.93	-0.19	-0.19
αTCF_t-v	0.91	-0.07	0.34
αTCF_jv	-0.90	-0.04	0.24
α02_jv	-0.87	-0.07	0.18
αTOR_t-v	0.87	-0.13	0.39
αHCF_t-v	0.86	-0.11	0.27
d3	-0.78	0.48	0.29
Vmax_pr	0.44	0.82	0.15
d1	0.59	0.61	-0.28

Tableau 8 : Coordonnées des points variables sur les trois premiers axes factoriels de l'ACP2

Cette nouvelle Analyse en Composantes Principales (ACP2) montre deux composantes principales (Tableau 8) qui résument 80% de la variance. La première composante (65% de la variance) est majoritairement représentée par le pic de vitesse du pied arrière, les angles du tronc et de la jambe avant aux différents instants de changement d'appui et la distance entre les pieds au poser de la jambe arrière comme dans l'ACP1. La seconde composante (15% de la variance) est majoritairement représentée par le pic de vitesse du pied avant, la distance entre les pieds au poser de la jambe avant se trouve être situé entre les deux axes.

[5] L'examen du plan factoriel permet de visualiser les corrélations entre les variables et d'identifier des groupes d'individus ayant pris les mêmes valeurs pour les mêmes variables. Les individus qui contribuent le plus à la détermination de l'axe sont les plus excentrés et l'examen des coordonnées factorielles ou la lecture du graphique suffit à interpréter les facteurs dans ce cas. La représentation graphique des individus sur le plan factoriel permet d'apprécier leur répartition et de repérer des zones de densités plus ou moins fortes.

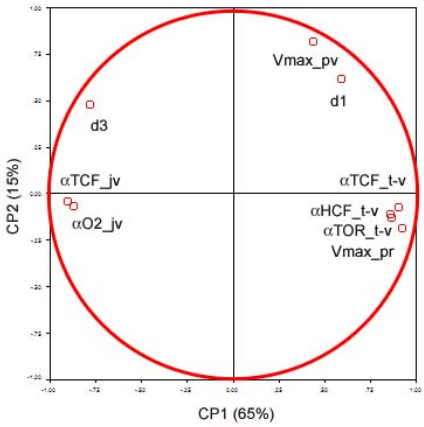


Figure 11 : Cercle des corrélations dans le plan des deux premières composantes principales (ACP2)

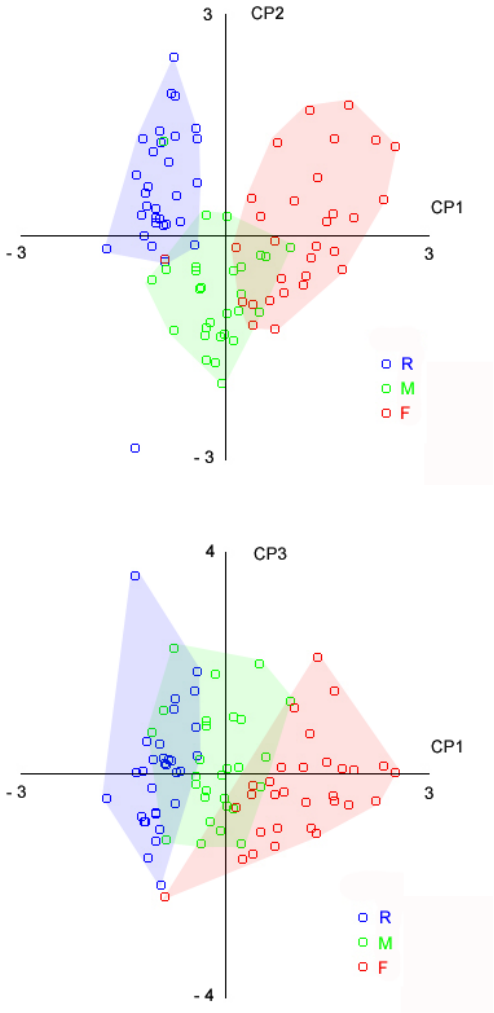


Figure 12 : Cartes factorielles issues de l'ACP2

En haut : dans le plan constitué des axes factoriels 1 et 2 ; en bas : dans le plan constitué des axes factoriels 1 et 3. R : condition de retraite ; M : condition d'attaque longue ; F : condition d'attaque courte.

La représentation des variables sur le cercle des corrélations dans le plan des deux premières composantes principales (Figure 12) confirme les résultats de l'ACP1, les angles du tronc et de la jambe s'opposent sur la première composante, avec la distance entre les

pieds à l'instant du poser arrière du même côté que les angles de la jambe (côté négatif) et le pic de vitesse du pied arrière du même côté que les angles du tronc (côté positif). Les deux distances entre les pieds se situent aussi davantage comme des compromis entre les deux axes, plus sur l'axe 1 pour d3 et plus sur l'axe 2 pour d1. Le pic de vitesse du pied avant étant la seule variable nettement située sur l'axe 2, côté positif.
La carte factorielle dans le plan principal (CP1-CP2) issue de cette analyse (Figure 12) montre des nuages de points qui se différencient plus nettement que pour l'ACP1 : les essais de la condition marche-fente s'opposent toujours aux essais de la condition marche-retraite sur le premier axe factoriel et sur cet axe, c'est toujours la condition marche-marche-fente qui est intermédiaire. Sur l'axe 2, les essais des conditions F et R sont moins étalés, surtout pour la condition R qui s'opposent plus nettement aux essais de la condition M situés du côté négatif de cet axe. La carte factorielle dans le plan CP1-CP3 confirme que la troisième composante qui représente 7% de la variance, ne distingue en rien les conditions de distance.

4.5. RESUME DES RESULTATS SUR LA PREMIERE MARCHE DE « L'ADVERSAIRE »

Les différents instants que nous avons analysés sont tous situés du côté positif de l'axe 2 de l'ACP1. Sur cet axe, seuls les essais de la condition marche-marche-fente (M) sont regroupés du côté négatif de cet axe. C'est donc dans cette condition que la durée de la première marche (t_O2) est la plus courte et que les pics de vitesse de chaque pied surviennent les plus tôt, de manière systématique. Les essais des autres conditions font apparaître des temps plus longs pour marche-fente (F) et marche-retraite (R), sauf pour t_Vmax_pv dans cette dernière condition mais moins homogènes que pour M. L'instant de survenue du pic de vitesse du pied avant est une variable qui peut être perceptible par l'escrimeur situé en face et cet événement survient très tôt dans le mouvement (R : 175 ms ; M : 177 ms), mais une seule de ces conditions est une attaque, l'escrimeur peut donc anticiper seulement si la première marche est courte en durée, il va devoir faire face à une attaque longue. Dès le retour du pied arrière, il n'y a plus aucune ambiguïté, le pic de vitesse du pied arrière survenant beaucoup plus tard en condition de retraite (572 ms) qu'en condition d'attaque longue (506 ms).
L'ACP2 montre que les angles de la jambe sont très liés dans le même sens et opposés aux angles du tronc qui sont eux aussi très liés. Lorsque le buste (α_t-v) est plus penché vers l'avant, dès le poser du talon avant (instant HCF) qui s'effectue loin (d1), comme dans les essais de la condition F, la jambe avant (α_jv) est très pliée et cette géométrie corporelle perdurera jusqu'à la fin de la première marche (jusqu'à l'instant O2). Dans cette condition, le corps se projette vers l'avant et va vite, particulièrement au retour du pied arrière (Vmax_pr) qui se pose près du pied avant (d3). Cette intention du corps vers l'avant, perceptible également, indique très tôt à l'escrimeur qu'il va faire face à une attaque, mais courte cette fois-ci.
La répartition des essais dans le premier plan factoriel de l'ACP2, montre que ce sont les essais de la condition R qui sont les plus opposés aux essais de la condition F sur l'axe 1, mais ce sont les essais de la condition M qui sont le plus opposés sur l'axe 2. Les conditions F et R sont donc les plus distinctes en termes de géométrie corporelle et de vitesse du pied

arrière. Les conditions M et F sont les plus distinctes en termes de vitesse du pied avant et les conditions M et R sont les plus distinctes en termes de durée de la marche, comme nous l'avons vu précédemment.
En résumé, si l'escrimeur perçoit que la géométrie du corps de l'adversaire s'organise dans une projection vers l'avant, il peut s'attendre à une attaque courte, si la géométrie est plus érigée, il peut s'attendre, soit à une attaque longue, soit à une retraite. C'est la perception du retour de la jambe arrière qui permettra de trancher entre les deux. Des informations, perceptibles par l'escrimeur, semblent donc disponibles entre 200 et 500 ms après le début du mouvement de l'adversaire (auquel il faut ajouter les 140 à 160 ms du temps de réaction pour compter à partir du signal de départ) pour déterminer quel enchaînement d'actions suivra la première marche de l'adversaire.

5. CATEGORISATION DE L'ENSEMBLE DES REPONSES APPORTEES PAR L'ESCRIMEUR

Ce travail consiste à analyser la première marche de l'escrimeur, face à un adversaire-cible qui effectue une série de mouvements selon trois conditions de distance : deux marches-fente, marche-fente ou marche-retraite. Nous avons montré dans la partie précédente que : 1) cet adversaire cible, qui est un expert, est capable de reproduire à l'identique (dans les grandes lignes de sa géométrie corporelle) la première marche qui débute une série de mouvements appartenant à son répertoire de mouvements de base, que ces essais se succèdent ou non dans une même série expérimentale ou non, validant ainsi notre protocole expérimental ; 2) il fournit, dès le début du premier pas, des indicateurs temporels, d'organisation de sa géométrie corporelle ou de vitesses, susceptibles d'informer l'escrimeur quant à la suite de son enchaînement d'actions.
Afin, d'éclairer par la suite, les résultats issus de l'analyse de la première marche de l'escrimeur, nous avons d'abord codifié l'ensemble des réponses que les six sabreurs ont fournis (6 sabreurs x 2 sessions expérimentales x 3 conditions x 8 essais = 288 réponses). Pour analyser ces réponses, nous avons conservé le codage des deux premiers mouvements.
Ces réponses peuvent se décomposer en : 1) une marche, enchaînée d'une demi-fente ou d'une demi-marche (1/2) ; 2) une marche et fente (F) ; 3) deux marches (M) ; 4) une défense (D) ; 5) une attente avant de partir (S) ; 6) des mouvements comportant un saut (J).

5.1. ANALYSE DE LA SESSION AVEC INCERTITUDE

Les trois conditions de distance étaient effectuées par l'adversaire cible pour les 24 premiers essais sans que l'escrimeur n'ait aucune connaissance du protocole. Cette première session est appelée avec incertitude (U). Les 24 essais suivants, l'escrimeur était informé des mouvements qui allaient être effectués par la cible. Cette deuxième session est appelée avec certitude (C). Nous analyserons d'abord la première session expérimentale avec incertitude, (Tableau 9).

Conditions	Réponses					
	1/2	F	M	D	S	J
UF	31	2	11	0	1	3
UM	27	3	9	1	3	5
UR	0	0	42	1	0	5

Tableau 9 : Récapitulatif des réponses, session expérimentale U

Réponses dans la session avec incertitude (U) face à F : une attaque courte ; à M : une attaque longue ; à R : une retraite ; 1/2 : réponse en une marche, enchaînée d'une demi-fente ou d'une demi-marche ; F : réponse en une marche et fente ; M : réponse en deux marches ; D : réponse en une défense ; S : réponse en une attente avant de partir ; J : réponse comportant un saut.

Nous cherchons à savoir, si le type de réponses fourni par l'escrimeur est indépendant ou non des conditions expérimentales appliquées par l'adversaire cible. Par exemple, est-ce que les 31 réponses débutant par une marche, puis une demi-marche ou une demi-fente, lorsque l'adversaire effectue une attaque en F, ou les 27 mêmes réponses face à une M, ou les 42 réponses débutant par deux marches lorsque l'adversaire effectue une retraite, sont le fruit du hasard ou pas. Pour cela, nous devons d'abord calculer les effectifs théoriques qui seraient ceux pour lesquels la réponse serait indépendante de la condition de distance (Tableau 10).

Conditions	Réponses					
	1/2	F	M	D	S	J
UF	19.3	1.7	20.7	0.7	1.3	4.3
UM	19.3	1.7	20.7	0.7	1.3	4.3
UR	19.3	1.7	20.7	0.7	1.3	4.3

Tableau 10 : Effectifs théoriques, session expérimentale U

Réponses dans la session avec incertitude (U) face à F : une attaque courte ; à M : une attaque longue ; à R : une retraite ; 1/2 : réponse en une marche, enchaînée d'une demi-fente ou d'une demi-marche ; F : réponse en une marche et fente ; M : réponse en deux marches ; D : réponse en une défense ; S : réponse en une attente avant de partir ; J : réponse comportant un saut.

Sur ce tableau (Tableau 10) à 18 cellules, nous avons 12 cellules qui ont un effectif théorique inférieur à 5, soit plus de 20% (tolérance de Fisher). Nous ne pouvons donc pas, avec ces données, effectuer un test du Chi-2, qui teste l'indépendance entre les catégories de réponses et les conditions. Nous allons donc regrouper certains types de réponses de façon pertinente (Tableau 11). Les essais marche 1/2 et marche-fente ont été regroupés sous l'appellation « attaque courte » ; les essais deux marches et comportant un saut ont été regroupés sous l'appellation « attaque longue » et les essais défense ou attente ont été ici retirés (soit 6 essais sur 144), en considérant que le protocole n'était pas respecté, puisque la consigne pour tout les escrimeurs était « cherchez à toucher au masque en attaquant dès le signal sonore ».

Conditions	Réponses	
	Attaque courte	Attaque longue
UF	33	14
UM	30	14
UR	0	47

Tableau 11 : Récapitulatif des réponses regroupées, session expérimentale U

Réponses dans la session avec incertitude (U) face à F : une attaque courte ; à M : une attaque longue ; à R : une retraite ; attaque courte : regroupement des réponses en une marche enchaînée d'une demi-fente ou d'une demi-marche et des réponses en une marche et fente ; attaque longue : regroupement des réponses en deux marches et des réponses comportant un saut.

Ici, tous les effectifs théoriques sont supérieurs à 5, ce qui nous autorise à utiliser le test d'indépendance du Chi-2 (Tableau 12). Les résultats permettent de conclure à un rejet de l'hypothèse nulle avec une valeur du P nettement inférieure à 1% (P <.000). Il existe donc un lien entre la variable « condition » et la variable « réponse ».

Il s'agit maintenant, à l'aide d'un test de Chi-2 local, de tenter d'identifier les relations entre modalités-conditions et modalités-réponses, prises deux à deux (Tableau 13). Les résultats montrent que pour chaque cellule du tableau, il existe une relation entre chaque condition et chaque réponse.

Conditions	Réponses	
	Attaque courte	Attaque longue
UF	21.46	25.54
UM	20.09	23.91
UR	21.46	25.54

Tableau 12 : Effectifs théoriques regroupés, session expérimentale U

Réponses dans la session avec incertitude (U) face à F : une attaque courte ; à M : une attaque longue ; à R : une retraite ; attaque courte : regroupement des réponses en une marche enchaînée d'une demi-fente ou d'une demi-marche et des réponses en une marche et fente ; attaque longue : regroupement des réponses en deux marches et des réponses comportant un saut.

Afin de qualifier le sens et de quantifier l'intensité des relations, nous allons utiliser le Pourcentage d'Ecart à l'indépendance Maximal (Tableau 14) : le P.E.M. (Cibois P.[6]).

Conditions	Réponses	
	Attaque courte	Attaque longue
UF	0.0031	0.0031
UM	0.0278	0.0278
UR	0.0000	0.0000

Tableau 13 : Valeurs des P (x 100), session expérimentale U

Réponses dans la session avec incertitude (U) face à F : une attaque courte ; à M : une attaque longue ; à R : une retraite ; attaque courte : regroupement des réponses en une marche enchaînée d'une demi-fente ou d'une demi-marche et des réponses en une marche et fente ; attaque longue : regroupement des réponses en deux marches et des réponses comportant un saut.

Conditions	Réponses	
	Attaque courte	Attaque longue
UF	45%	-45%
UM	41%	-41%
UR	-100%	100%

Tableau 14 : Pourcentage d'Ecart à l'indépendance Maximal, session expérimentale U

Réponses dans la session avec incertitude (U) face à F : une attaque courte ; à M : une attaque longue ; à R : une retraite ; attaque courte : regroupement des réponses en une marche enchaînée d'une demi-fente ou d'une demi-marche et des réponses en une marche et fente ; attaque longue : regroupement des réponses en deux marches et des réponses comportant un saut.

Les résultats montrent que les relations sont fortes sur le plan de l'intensité. Le sens des relations indique que lorsque l'adversaire effectue une retraite (R), il y a 100% d'attraction pour une réponse de l'escrimeur en attaque longue. Lorsque l'adversaire effectue une attaque courte (F), il y a 45% d'attraction pour une réponse en attaque courte et lorsque l'adversaire effectue une attaque longue (M), il y a 41% d'attraction aussi pour une attaque courte. Ainsi, par le descriptif des mouvements, nous savons que, au plus tard, au deuxième mouvement de son enchaînement, l'escrimeur a évalué avec pertinence la

[6] Cibois P. *L'analyse des enquêtes quantitatives,* Paris, PUF, 2007, 128 p.

nature de l'enchaînement de son adversaire, puisque sa réponse est adaptée : **il attaque court, si l'adversaire attaque court ou long et il attaque long, si l'adversaire défend.** Ceci, alors que les deux sabreurs débutent en même temps et sans que l'escrimeur ait une connaissance a priori de l'intention de l'adversaire. On peut, d'ores et déjà affirmer, que, dès la fin de la première marche, l'escrimeur a perçu l'intention de l'adversaire et qu'il adapte son enchaînement en cours d'action, qu'il ait débuté son premier pas avec un parti pris différent ou le même. Les résultats des prochains chapitres devraient nous éclairer sur ce point.

5.2. ANALYSE DE LA SESSION AVEC CERTITUDE

Obtient-on les mêmes résultats que précédemment lorsque l'escrimeur connaît à l'avance l'enchaînement que va exécuter l'adversaire ? En d'autres termes : les résultats de la session avec certitude sont-ils les mêmes que ceux de la session avec incertitude ?

Conditions	Réponses					
	1/2	F	M	D	S	J
CF	26	6	7	0	1	8
CM	19	1	7	3	6	12
CR	0	0	36	0	3	10

Tableau 15 : Récapitulatif des réponses, session expérimentale C

Réponses dans la session avec certitude (C) face à F : une attaque courte ; à M : une attaque longue ; à R : une retraite ; 1/2 : réponse en une marche, enchaînée d'une demi-fente ou d'une demi-marche ; F : réponse en une marche et fente ; M : réponse en deux marches ; D : réponse en une défense ; S : réponse en une attente avant de partir ; J : réponse comportant un saut.

Comparativement à la session expérimentale U, nous observons une augmentation des réponses comportant un saut et des réponses débutant par une attente (Tableau 15). Ces derniers n'étant pas analysés par la suite (non respect du protocole expérimental), nous pouvons nous interroger sur ce résultat. En effet, alors qu'il ne semble pas surprenant que les réponses comportant un saut augmentent, puisque l'escrimeur connaît l'enchaînement d'actions de l'adversaire, il ne prend pas un véritable risque à s'élancer « résolument vers l'avant ». En revanche, l'attente, semble un comportement opposé au précédent.
L'explication qui peut être avancée, si notre hypothèse de départ se confirme (débuter l'action avec un a priori, donc lancer une séquence programmée et s'adapter en cours d'enchaînement), est que avec certitude, l'adaptation s'avérera inutile, l'escrimeur peut donc débuter plus tard mais programmer la séquence entière. La suite des résultats devrait pouvoir nous permettre d'étayer ou d'invalider cette nouvelle hypothèse.
L'analyse des réponses regroupées (Tableau 16), montre clairement que l'augmentation des réponses comportant un saut fait augmenter le nombre de réponses en « attaque longue » au détriment des « attaques courtes ». Ici aussi, tous les effectifs théoriques sont supérieurs à 5, ce qui nous autorise à utiliser le test d'indépendance du Chi-2 (Tableau 17). Les résultats permettent, là encore, de conclure à un rejet de l'hypothèse nulle avec une valeur du *P* nettement inférieure à 1% (P <.000). Il existe donc encore un lien global entre la variable « condition » et la variable « réponse ».

En revanche, le test de Chi-2 local, montre que la relation entre chaque condition et chaque réponse n'est plus vraie (Tableau 18). En effet, il n'existe plus d'attraction entre la condition en attaque longue (M) exécutée par l'adversaire et une réponse particulière (attaque courte ou longue) de l'escrimeur.

Conditions	Réponses	
	Attaque courte	Attaque longue
	32	15
CM	20	19
CR	0	46

Tableau 16 : Récapitulatif des réponses regroupées, session expérimentale C

Conditions	Réponses	
	Attaque courte	Attaque longue
CF	18.52	28.48
CM	15.36	23.63
CR	18.12	27.88

Tableau 17 : Effectifs théoriques regroupés, session expérimentale C

Conditions	Réponses	
	Attaque courte	Attaque longue
CF	0.0001	0.0001
CM	7.0270	7.0270
CR	0.0000	0.0000

Tableau 18 : Valeurs des *P* (x 100), session expérimentale C

Conditions	Réponses	
	Attaque courte	Attaque longue
CF	47%	-47%
CM	NS	NS
CR	-100%	100%

Tableau 19 : Pourcentage d'Ecart à l'indépendance Maximal, session expérimentale C

Réponses dans la session avec certitude (C) face à F : une attaque courte ; à M : une attaque longue ; à R : une retraite ; attaque courte : regroupement des réponses en une marche enchaînée d'une demi-fente ou d'une demi-marche et des réponses en une marche et fente ; attaque longue : regroupement des réponses en deux marches et des réponses comportant un saut.

Pour les deux autres conditions (F et R), le P.E.M. montre que les relations restent fortes sur le plan de l'intensité (Tableau 19). Le sens des relations indique que, comme lors de la session avec incertitude, si l'adversaire effectue une retraite (R), il y a 100% d'attraction pour une réponse de l'escrimeur en attaque longue et lorsque l'adversaire effectue une attaque courte (F), il y a 47% d'attraction pour une réponse en attaque courte. Ainsi, en session avec certitude, **l'escrimeur attaque court, si l'adversaire attaque court, il attaque long, si l'adversaire défend mais, sa réponse peut être indifféremment une attaque courte ou longue si l'adversaire attaque long.** Ces résultats, très proches de ceux de la session expérimentale avec incertitude, confortent nos hypothèses précédentes. En effet, si les enchaînements d'actions sont les mêmes en situation avec incertitude qu'avec certitude (dans deux conditions), c'est vraisemblable qu'avec incertitude, l'escrimeur a perçu l'intention de l'adversaire dès la fin du premier pas et qu'il adapte son enchaînement en cours d'action.

6. ETUDE DU SABREUR EN CONDITION AVEC INCERTITUDE

Les résultats précédents laissent à penser que le sabreur est capable de percevoir dès la première marche de son adversaire, l'enchaînement d'actions que va effectuer ce dernier : attaque longue, attaque courte ou retraite. Cette adaptation est « visible » d'après le descriptif des actions dès le deuxième mouvement qu'il effectue puisque celui-ci est adapté pour réduire la distance le séparant de l'adversaire. Pouvons-nous trouver des ajustements, en amont du deuxième mouvement du sabreur, *i.e.* au cours de sa première marche ?

6.1. TRAITEMENTS STATISTIQUES DES DONNEES DU SABREUR

Différents tests statistiques ont été utilisés dans cette partie de l'étude : 1) tests *t* de Student pour échantillons indépendants et pour échantillons appareillés ; 2) Anova à deux facteurs (6 sujets x 3 distances) ; 3) Analyse Factorielle Discriminante (AFD)[7] 3) Anova à trois facteurs (6 sujets x 3 distances x 2 sessions) ainsi que des tests Post-Hoc (LSD de Fischer) pour les deux Anova.

6.2. CHRONOLOGIE DES « EVENEMENTS » DE LA PREMIERE MARCHE DU SABREUR

Les événements que nous avons étudiés sont : 1) les changements d'appuis ; 2) des modifications angulaires ; 3) des pics d'accélération et de vitesse.

6.2.1. Chronologie des changements d'appuis

	t_HOF		t_TOF		t_HCF		t_TOR		t_TCR		t_O2		Δ_mvt	
	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T
UF	0.36	0.12	0.43	0.13	0.69	0.14	0.81	0.16	0.99	0.17	1.03	0.18	0.63	0.08
UM	0.38	0.12	0.45	0.12	0.70	0.12	0.84	0.15	1.00	0.14	1.05	0.14	0.62	0.06
UR	0.38	0.12	0.46	0.12	0.72	0.13	0.83	0.16	1.04	0.17	1.09	0.19	0.66	0.08

Tableau 20 : Chronologie des événements liés aux appuis

t : instant en seconde ; F : (front) pied avant ; R : (rear) pied arrière ; O2 : lever du pied avant ou arrière pour débuter le second mouvement ; H : (heel) talon ; T : (tip) pointe de pied ; O : (off) lever : C : (contact) poser ; mvt : mouvement du début du lever du talon avant jusqu'au début du second mouvement ; moy : moyenne ; E-T : écart-type ; U : session avec incertitude ; F : face à une marche et fente ; M : face à une marche, marche et fente ; R : face à une marche retraite ; en rouge : valeurs significativement différente à P <0,05.

[7] L'analyse Factorielle Discriminante permet d'étudier les relations entre une variable qualitative et un ensemble de variables explicatives quantitatives. Elle permet de déterminer les variables explicatives les plus discriminantes vis-à-vis des classes déterminées ; de déterminer à quel groupe appartient un individu à partir de ses caractéristiques et de valider une classification lorsque celle-ci est faite en amont de l'analyse discriminante. Du point de vue des calculs, l'analyse discriminante est très proche de l'analyse de variance (Anova). Nous disposons d'une matrice des covariances et variances totales, ainsi que d'une matrice des covariances et variances intra-classes regroupées. Ces deux matrices sont alors comparées par des tests du F multivariés afin de déterminer s'il existe ou non des différences significatives (au regard de toutes les variables) entre les groupes.

La variabilité interindividuelle est telle (Figure 13) qu'aucun instant d'apparition des événements ne montre de différence significative (Tableau 20). En effet, même si la consigne était de réagir le plus vite possible au signal de départ, les sabreurs ne se trouvent pas habituellement dans une tâche de temps de réaction et ainsi le début du mouvement, repéré ici d'après le lever du talon avant (HOF) est très variable d'un sabreur à un autre (*e.g.* S04 *vs* S06). Tous les autres instants liés aux événements concernant les appuis présentent la même gamme d'écarts-types (entre 120 et 190 ms). En revanche, la durée du mouvement (Δ_mvt) est différente significativement lorsque le sabreur est face à une attaque longue (UM) ou à une retraite (UR), 0,62 s *vs* 0,66 s, (*t* pour échantillons appareillés = 2,2573, *P* = 0,029). A partir du signal de départ, la première marche dure environ une seconde (t_TCR).

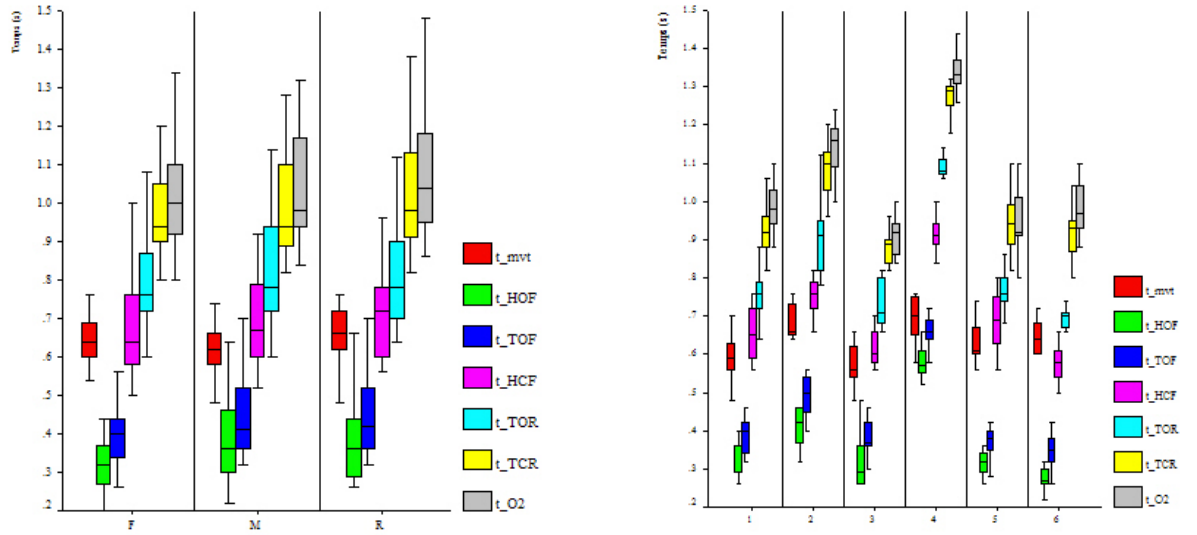


Figure 13 : Chronologie des événements liés aux appuis

A gauche : valeurs par condition de distance, session avec incertitude ; à droite : valeurs par sujets ; traits horizontaux : moyennes ; traits verticaux : écarts-types ; étendue du rectangle : étendue interquartile ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; autres légendes : voir tableau 21.

Les instants normalisés en pourcentage de la durée du mouvement, du signal de départ au poser du pied arrière (Tableau 21), montrent des différences significatives pour le lever du talon arrière (tn_TOR) selon la distance appliquée par la cible : le sabreur présente cet événement plus tardivement lorsqu'il fait face à une attaque, qu'elle soit courte ou longue, que lorsqu'il fait face à une retraite (*t* pour échantillons appareillés entre UF et UR = 3,9616, *P* = 0,000 ; entre UM et UR, *t* = 4,2643, *P* = 0,000 ; *t* pour échantillons indépendants entre UF et UR, *t* = 3,5115, *P* = 0,001 ; entre UM et UR, t = 3,9156, *P* = 0,000). Les valeurs normalisées présentent beaucoup moins de variabilité individuelle (Figure 14), ceci signifie que les sabreurs présentent des phases à l'intérieur de leur première marche qui gardent les mêmes proportions, bien que S05 semble « atypique » avec un déplacement du pied avant qui occupe une plus grande proportion dans le mouvement que les autres sabreurs et un déplacement du pied arrière qui occupe une moins grande proportion.

	tn_TOF		tn_HCF		tn_TOR		tn_O2	
	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T
UF	10.5	3.4	51.7	5.0	71.7	3.8	106.0	6.3
UM	11.1	3.9	52.1	6.3	74.1	6.4	108.0	5.1
UR	11.0	2.7	51.5	6.0	68.0	3.5	107.2	3.9

Tableau 21 : Chronologie normalisée des événements liés aux appuis

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; tn : instants normalisés en pourcentage de la durée du mouvement représentant 100% ; en bleu : chaque valeur est significativement différente de la valeur en rouge ; autres légendes : voir légende de la figure 21.

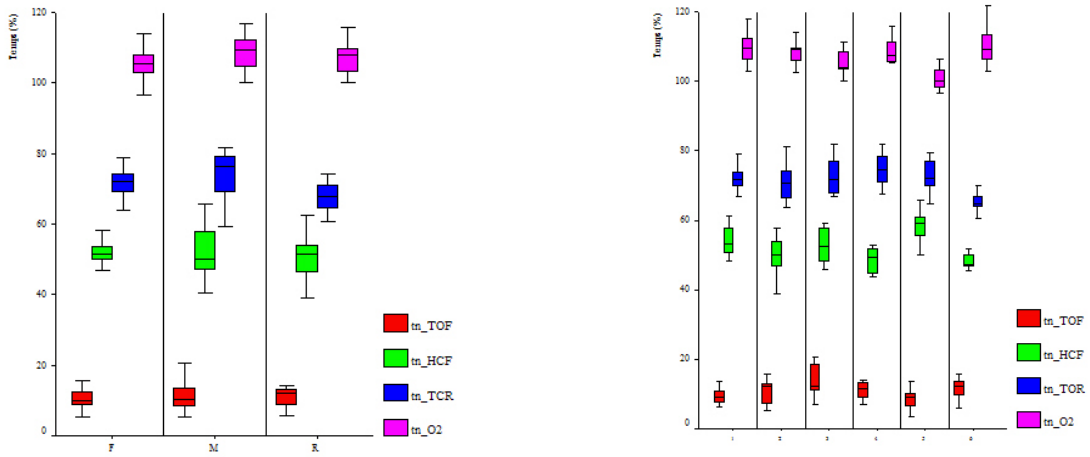


Figure 14 : Chronologie normalisée des événements liés aux appuis

Session avec incertitude ; à gauche : valeurs par condition de distance ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; à droite ; valeurs par sujet ; autres légendes : voir tableau 22.

6.2.2. Chronologie des pics de vitesse et d'accélération

	t_Vmax_pv		t_Vmin_gz		t_Vmax_gy		t_Vmax_a		t_Vmax_gz		t_Vmax_pr	
	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T
UF	0.56	0.14	0.60	0.17	0.84	0.17	0.85	0.16	0.84	0.17	0.92	0.16
UM	0.58	0.13	0.63	0.15	0.83	0.15	0.84	0.16	0.84	0.15	0.92	0.15
UR	0.57	0.12	0.62	0.14	0.83	0.15	0.84	0.15	0.86	0.15	0.95	0.16
	t_Amax_pv		t_Amin_pv		t_Amax_a		t_Amax_pr		t_Amin_a		t_Amin_pr	
	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T
UF	0.47	0.13	0.61	0.15	0.67	0.20	0.85	0.16	0.92	0.17	0.96	0.16
UM	0.50	0.12	0.64	0.12	0.66	0.18	0.86	0.14	0.83	0.16	0.97	0.14
UR	0.50	0.12	0.63	0.13	0.62	0.11	0.88	0.16	0.92	0.20	1.00	0.17

Tableau 22 : Chronologie d'apparition des pics de vitesse et d'accélération

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; en haut : les pics de vitesse (V) ; en bas : les pics d'accélération (A) ; t : instant d'apparition en seconde ; max : pic maximum ; min : pic minimum ; pv : pied avant ; g: centre de masse ; z : selon l'axe vertical ; x : selon l'axe antéropostérieur ; a : sabre ; pr : pied arrière ; moy : moyenne ; E-T : écart-type.

Les pics de vitesse (V) et d'accélération (A) analysés concernent : le pied avant (pv), le pied arrière (pr), le sabre (a) et le centre de masse (g) selon l'axe antéropostérieur (y) et selon l'axe vertical (z). Le centre de masse considéré ici, est le centre de masse (CoM) reconstruit

d'après les marqueurs articulaires et le modèle anthropométrique choisi. Les valeurs seront comparées ultérieurement à celles obtenues avec la plateforme de force, ce qui permettra d'évaluer l'incertitude des mesures due à l'application de cette méthode de calcul.
Les instants d'apparition des pics (Tableau 22) montrent une seule différence significative selon la condition de distance : l'instant du pic de freinage de l'arme (t_Amin_a), *t* pour échantillons appareillés entre UF et UM ($t = 2{,}0703$, $P = 0{,}044$), entre M et R ($t = 2{,}2359$, $P = 0{,}03$). Face à une attaque courte ou à une retraite, le sabreur freine son arme plus tardivement que face à une attaque longue (UM). Les autres valeurs ne sont pas différentes en raison là aussi de la grande variabilité interindividuelle.

	tn_Vmax_pv		tn_Vmin_gz		tn_Vmax_gy		tn_Vmax_a		tn_Vmax_gz		tn_Vmax_pr	
	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T
UF	32.3	12.4	37.3	9.9	75.8	12.8	76.7	7.0	75.7	6.8	87.4	2.1
UM	32.9	8.8	40.3	9.3	73.7	14.9	75.1	9.4	75.0	6.8	87.1	12.4
UR	28.6	3.1	36.3	5.2	67.7	8.8	69.9	7.4	71.8	4.7	85.8	2.2
	tn_Amax_pv		tn_Amin_pv		tn_Amax_a		tn_Amax_pr		tn_Amin_a		tn_Amin_pr	
	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T
UF	18.0	4.4	39.9	4.6	48.9	20.2	77.0	2.8	85.7	10.1	94.3	2.5
UM	18.5	4.5	41.2	4.8	43.9	18.7	77.7	4.6	73.0	19.1	94.7	4.6
UR	17.4	2.4	38.0	4.7	36.6	13.8	75.4	2.7	80.8	13.7	93.3	2.3

Tableau 23 : Chronologie normalisée d'apparition des pics de vitesse et d'accélération

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; tn : temps normalisé en pourcentage de la durée de la première marche ; voir le tableau 23 pour les autres légendes.

Les pics apparaissent dans l'ordre suivant : maximum d'accélération du pied avant, maximum de vitesse du pied avant, minimum de vitesse verticale du CoM, maximum de freinage (Amin) du pied avant, maximum d'accélération de l'arme, maximum de vitesse d'avancement du CoM, maximum de vitesse de l'arme presque en même temps que le maximum de vitesse verticale du CoM, maximum d'accélération du pied arrière, maximum de freinage de l'arme, maximum de vitesse du pied arrière, maximum de freinage du pied arrière. Les deux pieds bougeant l'un après l'autre, il est surtout intéressant de voir où se situent les variables concernant l'arme et le centre de masse par rapport aux variables concernant les pieds.
En revanche, les instants normalisés d'apparition des pics de vitesse et d'accélération (Tableau 23) présentent, eux, de nombreuses différences significatives entre les conditions de distance, le plus souvent lorsque le sabreur est face à une retraite en regard du cas où il est face,
1) à une attaque courte (UR *vs* UF) :

- pic d'accélération de l'arme (tn_Amax_a, *t* pour échantillons appareillés, $t = 3{,}1077$, $P = 0{,}003$; pour échantillons indépendants, $t = 2{,}4099$, P = 0,02) ;
- pic de vitesse de progression du centre de masse (tn_Vmax_gy, pour échantillons appareillés, $t = 2{,}9552$, $P = 0{,}005$; pour échantillons indépendants entre UF et UR, $t = 2{,}4842$, $P = 0{,}017$) ;
- pic de vitesse verticale du centre de masse (tn_Vmax_gz, pour échantillons appareillés, $t = 2{,}4182$, $P = 0{,}02$; pour échantillons indépendants, $t = 2{,}2303$, $P = 0{,}031$) ;

- pic de vitesse du pied arrière (tn_Vmax_pr, pour échantillons appareillés, $t = 2{,}2626$, $P = 0{,}029$; pour échantillons indépendants, $t = 2{,}5641$, $P = 0{,}014$) ;

2) à une attaque longue (UR *vs* UM) :

- pic de freinage du pied avant (tn_Amin_pv, pour échantillons appareillés, $t = 3{,}6053$, $P = 0{,}000$; pour échantillons indépendants, $t = 2{,}3793$, $P = 0{,}022$) ;
- pic de vitesse du pied avant (tn_Vmax_pv, pour échantillons appareillés, $t = 2{,}4218$, $P = 0{,}020$; pour échantillons indépendants, $t = 2{,}2363$, $P = 0{,}03$) ;
- minimum de vitesse verticale du centre de masse (tn_Vmin_gz, pour échantillons appareillés, $t = 2{,}4527$, $P = 0{,}018$) ;

3) aux deux types d'attaque (UR *vs* UF et UM) :

- pic de vitesse de l'arme (tn_Vmax_a, pour échantillons appareillés entre UF et UR, $t = 3{,}6278$, $P = 0{,}000$; entre UM et UR, $t = 3{,}4132$, $P = 0{,}001$; pour échantillons indépendants entre UF et UR, $t = 3{,}2184$, $P = 0{,}002$) ;
- pic d'accélération du pied arrière (tn_Amax_pr, pour échantillons indépendants entre UF et UR, $t = 2{,}0421$, $P = 0{,}047$; et entre UM et UR, $t = 2{,}0403$, $P = 0{,}047$) ;

Une seule variable présente une différence significative entre les deux types d'attaque (UF *vs* UM), le pic de freinage de l'arme (tn_Amin_a), pour échantillons appareillés, $t = 2{,}4711$, $P = 0{,}017$; pour échantillons indépendants, $t = 2{,}7765$, $P = 0{,}008$.

6.2.3. Chronologie des changements angulaires

Les changements angulaires étudiés ici sont l'angle minimum (αmin_jv) et maximum de la jambe avant (αmax_jv), l'angle au début de l'ouverture bras/avant-bras (αd_b-ab) et son maximum qui rend compte de l'ouverture du bras (αmax_b-ab), l'angle au début du mouvement bras/tronc (αd_b-t) et son maximum qui rend compte de l'allongement du bras (αmax_b-t).

Chronologiquement, les événements apparaissent dans l'ordre où ils figurent dans le Tableau 24. Quelques-uns, très proches, peuvent être intervertis selon les essais (t_αd_b-ab et t_αd_b-t ou t_αmax_b-ab et t_αmax_b-t).

On relève deux différences significatives qui distinguent le cas où le sabreur fait face, soit à une attaque courte (UF), soit à une attaque longue (UM) :

- l'instant où la jambe est la plus pliée (t_αmin_jv), pour échantillons appareillés, $t = 2{,}2244$, $P = 0{,}031$ (en rouge, Figure 15 gauche) ;
- l'instant du début de l'éloignement du coude par rapport au tronc (t_αd_b-t), pour échantillons appareillés, $t = 2{,}0272$, $P = 0{,}049$ (en bleu foncé, Figure 15 gauche).

	t_αmin_jv		t_αd_b-ab		t_αd_b-t		t_αmax_jv		t_αmax_b-ab		t_αmax_b-t	
	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T
UF	0.48	0.13	0.67	0.23	0.63	0.26	0.69	0.15	0.90	0.20	0.88	0.23
UM	0.51	0.11	0.65	0.16	0.70	0.16	0.72	0.13	0.83	0.18	0.89	0.18
UR	0.50	0.12	0.70	0.20	0.69	0.23	0.71	0.14	0.91	0.21	0.91	0.23

Tableau 24 : Chronologie des changements angulaires

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; t : instant en seconde ; α : angle ; min : minimum ; max : maximum ; d : début ; j : jambe avant ; b-ab : bras-avant-bras ; b-t : bras-tronc ; moy : moyenne ; E-T : écart-type.

Les valeurs normalisées précisent les différences entre les conditions de distance pour l'angle minimum de la jambe avant, puisque le sabreur plie sa jambe plus tardivement dans le mouvement (tn_αmin_jv) lorsqu'il est face à une attaque longue (UM) que face aux deux autres conditions, *t* pour échantillons appareillés entre UF et UM = 2,3192, *P* = 0,025) ; entre UM et UR, t = 2,3945, p = 0,021 ; et pour échantillons indépendants entre UM et UR, *t* = 2,0958, *P* = 0,042 (en rouge, Figure 15 droite).

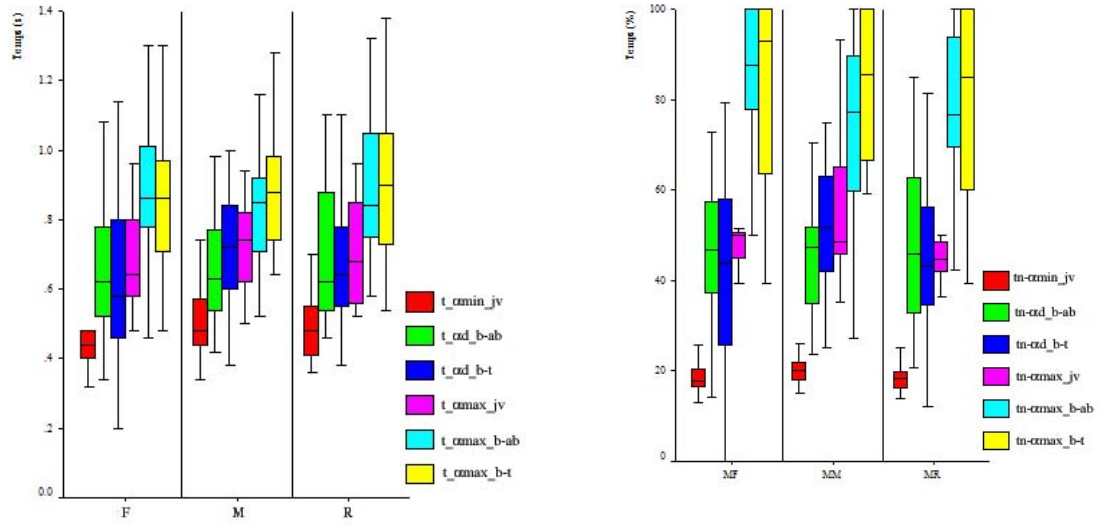


Figure 15 : Chronologie des changements angulaires

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; à gauche : temps réels en seconde ; à droite ; valeurs normalisées en pourcentage de la durée de la première marche ; autres légendes : voir tableau 25.

En revanche, au niveau du haut du corps, c'est l'angle maximum entre le bras et l'avant–bras (tn_αmax_b-ab) qui survient relativement plus tardivement lorsque le sabreur est face à une attaque courte que lorsqu'il est face à une attaque longue, entre UF et UM, *t* pour échantillons appareillés = 2,0291, *P* = 0,048 (en bleu clair, Figure 15 droite).

	tn_αmin_jv		tn_αd_b-ab		tn_αd_b-t		tn_αmax_jv		tn_αmax_b-ab		tn_αmax_b-t	
	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T
UF	18.8	3.3	47.6	16.9	41.9	22.6	52.4	12.8	84.0	17.7	80.8	21.3
UM	20.6	3.8	44.1	13.3	51.8	14.9	56.5	17.3	73.7	19.9	83.0	15.8
UR	18.5	3.1	47.4	18.3	46.5	22.5	49.7	15.8	79.6	15.8	79.3	21.0

Figure 16 : Chronologie normalisée des changements angulaires

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; tn : temps normalisé en pourcentage de la durée de la première marche ; autres légendes : voir tableau 25.

6.2.4. Durées des phases

Le mouvement étudié comportant cinq phases, dont quatre font partie de la première marche : une phase posturale en double appui qui est le temps de réaction (Δtr), une phase de déplacement de la jambe avant (Δfront), une deuxième phase de double appui (Δstance1), une phase de déplacement de la jambe arrière (Δrear) et une troisième phase

en double appui (Δstance2) qui est transitoire entre la première marche et l'action suivante (Figure 7).

	Δtr		Δfront		Δstance1		Δrear		Δstance2	
	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T
UF	0.43	0.14	0.26	0.04	0.13	0.04	0.18	0.03	0.04	0.04
UM	0.45	0.12	0.25	0.06	0.14	0.05	0.16	0.04	0.05	0.03
UR	0.45	0.12	0.27	0.04	0.11	0.05	0.21	0.03	0.05	0.03

Tableau 25 : Durées des phases liées aux appuis

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; Δ : durée en seconde ; Δtr : phase posturale en double appui ; Δfront : phase de déplacement de la jambe avant ; Δstance1 : phase de double appui pendant la marche ; Δrear : phase de déplacement de la jambe arrière ; Δstance2 : phase en double appui après la première marche ; moy : moyenne ; E-T : écart-type.

	Δntr		Δnfront		Δnstance1		Δnrear		Δnstance2	
	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T
UF	10.4	3.4	41.2	7.0	20.0	4.5	28.3	3.8	6.0	6.3
UM	11.0	4.0	40.8	7.2	22.1	7.1	26.0	6.5	8.2	5.1
UR	11.0	2.7	40.5	6.2	16.5	6.1	32.0	3.5	7.2	3.8

Tableau 26 : Durées normalisées des phases liées aux appuis

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ;Δn : durée en pourcentage de la première marche (Δnstance2 étant postérieure à la première marche, le total dépasse 100%) ; autres légendes : voir tableau 27.

Une Anova à deux facteurs (Wilk) montre un effet sujet et un effet distance. L'effet distance est dû à deux phases qui présentent des durées significativement différentes, aussi bien en valeurs brutes (Tableau 25) qu'en valeurs normalisées (Tableau 26). Les tests post-hoc (LSD de Fischer) montrent que la durée du double appui au milieu de la marche (entre HCF et TOR) est significativement différente entre les conditions UR et les conditions UF et UM ($P < 0.05$). La durée du déplacement du pied arrière (entre TOR et TCR) est différente entre toutes les conditions.

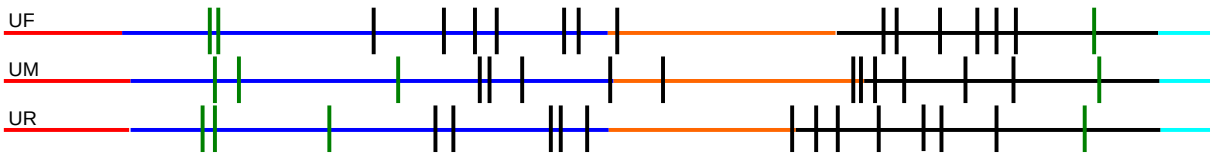


Figure 17 : Frise chronologique des événements étudiés en temps normalisé

De haut en bas : lorsque l'adversaire exécute marche-fente (F), puis marche-marche-fente (M) et marche-retraite (R) sans que le sabreur en ai connaissance (U) ; en rouge : phase posturale en double appui ; en bleu : phase de déplacement du pied avant ; en orange : phase de double appui ; en noir : phase de déplacement du pied arrière ; en bleu clair : phase en double appui postérieure à la 1ère marche ; traits verticaux : instants des événements (les traits verts sont les événements qui surviennent à des instants significativement différents des autres événements représentés en noir).

Peu d'événements se produisent, quelle que soit la condition pendant la phase de double appui (Figure 17). On constate que quelques événements se produisent toujours dans le même ordre, comme les quatre premiers au cours de la phase de déplacement du pied

avant (Tableau 27) ou les deux derniers au cours de la phase de déplacement du pied arrière. Certains événements semblent concomitants dans une condition mais très décalés dans une autre (*i.e.* les angles du bras en UR *vs* en UM).

UF		UM		UR	
Variables	Temps normalisé	Variables	Temps normalisé	Variables	Temps normalisé
TOF	10.4	TOF	11.1	TOF	11.0
Amax_pv	18.0	Amax_pv	18.5	Amax_pv	17.4
αmin_jv	18.8	αmin_jv	20.6	αmin_jv	18.5
Vmax_pv	32.3	Vmax_pv	32.9	Vmax_pv	28.6
Vmin_gz	37.3	Vmin_gz	40.3	Vmin_gz	36.3
Amin_pv	39.9	Amin_pv	41.2	Amax_a	36.6
αd_b-t	41.9	Amax_a	43.9	Amin_pv	38.0
αd_b-ab	47.6	αd_b-ab	44.1	αd_b-t	46.5
Amax_a	48.9	αd_b-t	51.8	αd_b-ab	47.4
HCF	51.7	HCF	52.1	αmax_jv	49.7
αmax_jv	52.4	αmax_jv	56.5	HCF	51.5
TOR	71.7	Amin_a	73.0	Vmax_gy	67.7
Vmax_gz	75.7	Vmax_gy	73.7	TOR	68.0
Vmax_gy	75.8	αmax_b-ab	73.7	Vmax_a	69.9
Vmax_a	76.7	TOR	74.1	Vmax_gz	71.8
Amax_pr	77.0	Vmax_gz	75.0	Amax_pr	75.4
αmax_b-t	80.8	Vmax_a	75.1	αmax_b-t	79.3
αmax_b-ab	84.0	Amax_pr	77.7	αmax_b-ab	79.6
Amin_a	85.7	αmax_b-t	83.0	Amin_a	80.8
Vmax_pr	87.4	Vmax_pr	87.1	Vmax_pr	85.8
Amin_pr	94.3	Amin_pr	94.7	Amin_pr	93.3
TCR	100	TCR	100	TCR	100
O2	106.0	O2	108.0	O2	107.2

Tableau 27 : Résumé de la chronologie des événements

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; valeurs normalisées des instants de survenue des événements en pourcentage de la durée de mouvement ; en bleu : les événements liés aux appuis ; pour les légendes : voir la nomenclature.

6.3. AMPLITUDE DES ANGLES REMARQUABLES

Les angles que nous avons choisis d'étudier sont ceux qui, *a priori*, semblent les plus observables par le sabreur. Ils concernent : la jambe avant (j), l'extension du bras qui porte l'arme entre bras et avant-bras (b-ab) et entre bras et tronc (b-t) et l'inclinaison du tronc par rapport à la verticale (t-v). Ils sont mesurés à différents instants : au début du mouvement, *i.e.* le lever du talon avant (HOF), à la fin de la première marche, *i.e.* la reprise de contact de la pointe arrière (TCR), à leur maximum (max) ou leur minimum (min) et enfin en terme de variation angulaire, l'ouverture bras-tronc (ouv) et l'allongement bras, avant-bras (all).

Seuls deux valeurs angulaires montrent des différences assez fortes pour apparaître malgré la variabilité interindividuelle (Tableau 28) : l'angle au début du mouvement entre le bras et le tronc (αHOF_b-t) qui se distinguent lorsque le sabreur fait face à une attaque courte (UF) et lorsqu'il fait face à une attaque longue (UM), *t* pour échantillons appareillés =

2,9379, P = 0,005 ; et l'allongement total du bras armé (αall_b-ab), qui est significativement moins grande lorsque le sabreur fait face à une retraite (UR) *vs* lorsqu'il fait face à une attaque, courte (*t* pour échantillons appareillés entre UF et UR = 2,3, P = 0,0335).
Les autres valeurs sont extrêmement semblables en moyenne, les différences étant surtout interindividuelles

Conditions	αHOF_b-t		αd_b-t		αmax_b-t		αouv_b-t		αHOF_t-v		αTCR_t-v	
	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T
UF	5.5	6.8	4.8	6.2	8.3	6.1	3.6	1.8	4.5	3.6	8.8	3.6
UM	7.7	8.1	5.6	7.8	9.8	8.8	3.4	1.4	5.0	3.9	9.0	4.7
UR	6.9	8.6	6.1	8.3	9.4	8.2	3.2	1.9	4.8	4.1	8.8	4.7
Conditions	αd_b-ab		αmax_b-ab		αall_b-ab		αHOF_j		αmin_jv		αmax_jv	
	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T
UF	91.2	9.2	96.2	10.5	5.0	2.7	155.8	12.0	143.3	8.9	172.1	7.3
UM	92.4	13.8	98.6	15.8	5.1	3.8	156.9	12.0	144.2	9.5	171.4	7.8
UR	93.2	14.5	97.2	14.4	3.9	1.8	156.3	11.4	142.9	8.5	171.2	6.5

Tableau 28 : Valeurs des angles remarquables

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; voir le texte pour les légendes.

6.4. VITESSES ET ACCELERATIONS

Les amplitudes étudiées ici (Tableau 29 et Tableau 30) sont les pics de vitesse (V) et d'accélération (A) (ou freinage lorsqu'il s'agit d'accélérations négatives, nommées « min ») segmentaires. Nous avons analysés : le pied avant (pv), le pied arrière (pr) et l'arme (a). Les pics de vitesses et d'accélérations du centre de masse seront étudiés au chapitre suivant à partir des données de la plateforme de force.

Conditions	Vmax_pv		Vmax_a		Vmax_pr	
	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T
UF	1.97	0.51	1.44	0.45	3.52	0.47
UM	1.76	0.34	1.49	0.74	3.14	0.82
UR	1.82	0.35	1.32	0.47	3.36	0.72

Tableau 29 : Amplitude des pics de vitesses segmentaires

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; V : vitesse ; max : pic positif ; pv : pied avant ; a : arme ; pr : pied arrière ; moy : moyenne ; E-T : écart-type.

Le pic de vitesse atteint par le pied avant est significativement plus petit lorsque le sabreur est face à une attaque longue que lorsqu'il est face à une attaque courte, *t* pour échantillons appareillés entre UF et UM = 2,0869, P = 0,04 (Figure 18, en rouge). En revanche le pic de vitesse atteint par l'arme est significativement plus grand lorsque le sabreur est face à une attaque longue que lorsqu'il est face à une retraite, *t* pour échantillons appareillés entre UM et UR = 2,0843, P = 0,043 (Figure 18, en vert). Le pic de vitesse atteint par le pied arrière présente une trop grande variabilité interindividuelle pour se distinguer selon les conditions de distance.

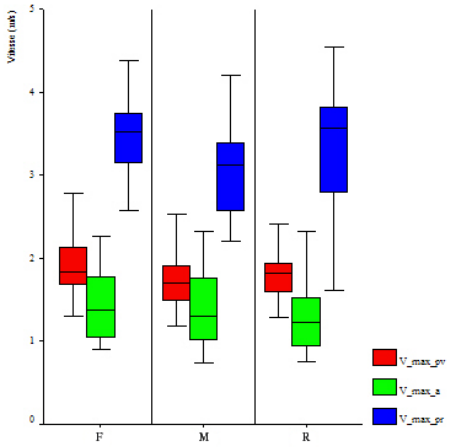


Figure 18 : Amplitude des pics de vitesses segmentaires

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; V : vitesse ; max : pic positif ; pv : pied avant ; a : arme ; pr : pied arrière.

Conditions	Amax_pv		Amin_pv		Amax_a		Amax_pr		Amin_a		Amin_pr	
	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T
UF	19.5	4.8	-16.9	4.1	8.2	3.9	42.2	9.5	-10.2	10.9	-40.5	8.3
UM	17.6	4.0	-16.8	3.2	9.8	6.2	40.2	8.7	-6.9	8.1	-34.8	12.2
UR	19.0	4.6	-16.7	4.4	7.8	3.0	39.1	6.6	-8.6	9.8	-38.0	8.8

Tableau 30 : Amplitude des pics d'accélérations segmentaires

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; A : accélération ; max : pic positif ; min : pic négatif ; pv : pied avant ; a : arme ; pr : pied arrière ; moy : moyenne ; E-T : écart-type.

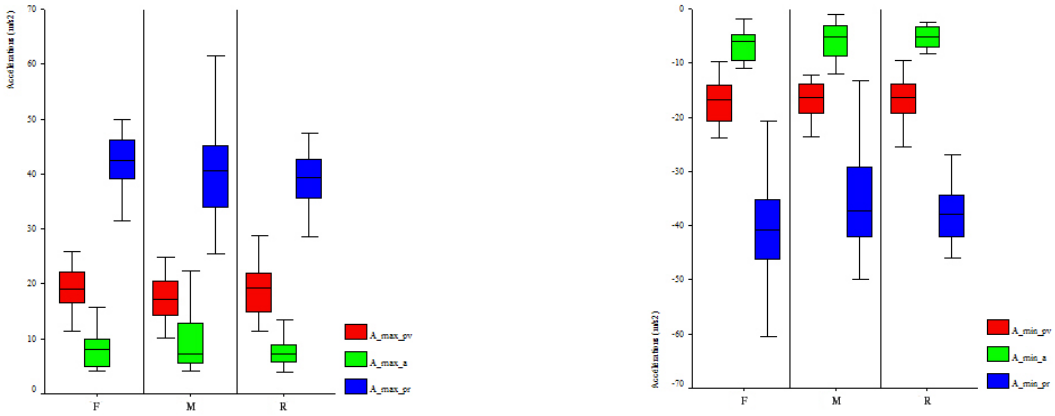


Figure 19 : Amplitude des pics d'accélérations segmentaires

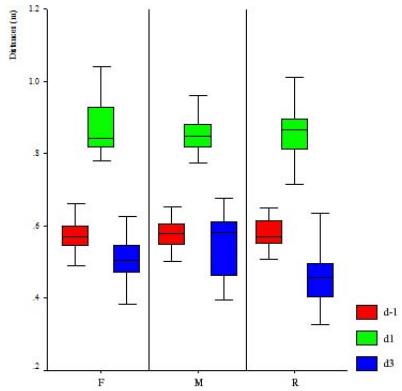
U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; A : accélération ; A gauche : les pics positifs (max) ; à droite : les pics négatifs (min) ; pv : pied avant ; a : arme ; pr : pied arrière.

En ce qui concerne les accélérations, le pic atteint par le pied avant est significativement plus petit lorsque le sabreur est face à une attaque longue que lorsqu'il est face à une attaque courte, mais aussi face à une retraite, t pour échantillons appareillés entre UM et UF = 2,1923, P = 0,034 ; entre UM et UR, t = 2,0393, P = 0,047 (Figure 19, en rouge, gauche). L'arme présente un pic de freinage plus important lorsque le sabreur « perçoit »

une attaque courte que face à une attaque longue, *t* pour échantillons appareillés entre UF et UM = 2,15, *P* = 0,037 (Figure 19, en vert, droite).

6.5. ECART INTER PIEDS

L'écart entre les pieds (Figure 20 et Tableau 31 et Figure 20 et Tableau 31) est identique en posture initiale, les sabreurs déplacent leur pied avant à la même distance, quelque soit l'action effectuée par l'adversaire. En revanche, le pied arrière se rapproche significativement plus du pied avant (d3) lorsque le sabreur est face à une retraite que face à une attaque, *t* pour échantillons appareillés entre UR et UF = 3,2866, *P* = 0,027 ; entre UR et UM, *t* = 3,0351, *P* = 0,004. Cette différence est même très nette face à une attaque longue, *t* pour échantillons indépendants entre UM et UR = 2,5243, *P* = 0,015.



Conditions	d-1		d1		d3	
	moy	E-T	moy	E-T	moy	E-T
UF	0.57	0.05	0.87	0.07	0.51	0.07
UM	0.58	0.04	0.86	0.07	0.55	0.09
UR	0.58	0.04	0.86	0.07	0.47	0.09

Figure 20 et Tableau 31 : Distances entre les pieds au cours de la première marche

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; d-1 : distance initiale ; d1 : distance après déplacement du pied avant ; d3 : distance après déplacement du pied arrière ; moy : moyenne ; E-T : écart-type.

6.6. DYNAMIQUE GLOBALE

Les résultats qui vont suivre sont issus des données de la plateforme de force qui permet une analyse selon une méthode globale.

La méthode globale est basée sur le principe direct de la mécanique pour calculer les accélérations du centre de masse ainsi que les positions instantanées du centre des pressions à partir des forces réactives du sol. Bien que ces points soient fictifs (leur existence mathématique n'a pas de correspondance physique), chacun d'eux est une expression globale propre du mouvement. L'un est l'expression instantanée des mouvements de tous les segments corporels en rapport avec l'objectif du mouvement, *e.g.* la vitesse de la marche. L'autre est l'expression des conditions d'appui nécessaires à la réalisation de cet objectif. (Brenière et al., 1981).

Nous avons étudié le décours du centre des pressions (CoP) au cours de la première marche selon l'axe principal du mouvement (y). Les temps analysés sont les temps vrais qui ont comme origine le signal de départ, ils permettent de tenir compte de la latence motrice du sabreur et les temps relatifs (r) qui sont les temps calés sur une origine du temps qui se situe au décollé du pied avant, début du mouvement volontaire. Ces temps

relatifs permettent d'analyser les différents instants à l'intérieur de la marche elle-même. Nous avons étudiés également l'amplitude antéropostérieure normalisée (n) du CoP (yP). Cette normalisation a été faite en fonction de la longueur de la jambe. Elle permet de comparer les sabreurs de l'étude qui présentaient des tailles assez différentes (de 1,74 à 1,95 m). Enfin, nous avons étudiés les forces (Ry et Rz) et les vitesses (Vy et Vz) qui s'exercent au centre de masse (CoM) à différents instants de la première marche. Les forces ont été également normalisées (n) pour tenir compte du poids des sabreurs qui diffèrent pareillement (de 727,5 à 958,2 N). Le poids des sabreurs est leur poids équipé.

6.6.1. Centre des pressions

Décours du patron de la courbe

Le début des phénomènes dynamiques (t-1) est visible sur la courbe de déplacement du CoP (Figure 21). Le CoP recule sous le pied arrière jusqu'à un maximum lorsque le pied avant est totalement levé (t0). La courbe présente un plateau tant que le sabreur se tient uniquement sur le pied arrière. Puis, lorsque le sabreur commence à poser le pied avant (t1), le CoP se porte alors rapidement en avant correspondant à une phase de double appui jusqu'à t2. Le second plateau de la courbe qui suit correspond à la phase de simple appui sur le pied avant pendant le déplacement du pied arrière. Enfin, de t3 à t4, nous observons la dernière phase de double appui appartenant à la première marche. De t4 à t5 et au-delà, c'est le second mouvement qui débute, celui-ci pouvant débuter aussi bien par le lever du pied avant que par celui du pied arrière.

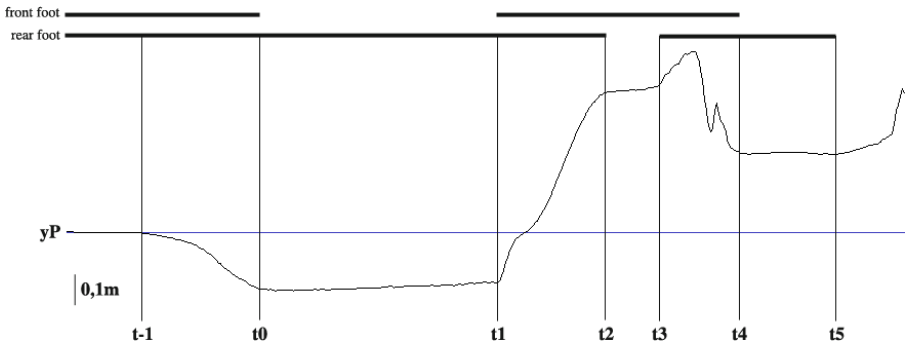


Figure 21 : Phases de simple et double appui au cours de la marche

Exemple pour un essai en condition U, réponse à une distance M de l'adversaire. Rear foot : phases pendant lesquelles le pied arrière est en appui ; front foot : phases pendant lesquelles le pied avant est en appui ; yP : déplacement antéropostérieure du CoP en mètre (m) ; t-1 : début des phénomènes dynamiques ; t0 : lever du pied avant ; t1 : poser du pied avant ; t2 : lever du pied arrière ; t3 : poser du pied arrière ; t4 : début du second mouvement ; t5 : premier double appui du second mouvement.

La première marche débutant la séquence comporte donc trois phases de double appui : une en posture initiale, une après le déplacement du pied avant et une après le déplacement du pied arrière. Néanmoins, il s'agit là de la marche du sabreur dans son expression la plus caractéristique. Souvent, cette marche est plus complexe et de courtes phases aériennes peuvent apparaître : 1) lorsque le pied arrière quitte le sol alors que le pied avant n'a pas repris contact, dans ce cas, nous n'observons pas la phase de double appui entre t1 et t2 (type « saut ») ; 2) les deux pieds quittent le sol après que le pied arrière

ait repris contact et, dans ce cas, c'est la phase de simple appui entre t2 et t3 qui disparaît (type « pas chassé »).

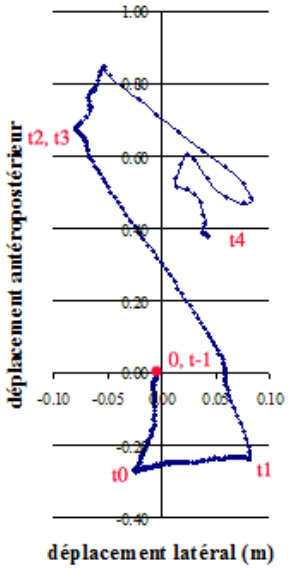


Figure 22 : Déplacement du centre des pressions dans le plan du sol

Exemple pour un essai en condition U, réponse à une distance M de l'adversaire.

Nous avons analysé le déplacement du centre des pressions selon l'axe principal du déplacement (y), mais le décours du CoP s'effectue en deux dimensions, plan x-y (Figure 22). Le patron complet montre que le CoP se déplace tout d'abord principalement vers l'arrière jusqu'à t0, puis vers le pied pendulaire (ici le pied droit, l'essai présenté étant celui d'un droitier) entre t0 et t1. Au poser du pied avant, son déplacement se poursuit vers l'avant entre t1 et t2. Il est quasiment immobile entre t2 et t3 pendant le déplacement du pied arrière. A t3, pendant la dernière phase de double appui, le CoP continue d'avancer et croise de l'autre côté, puis il recule, montrant un décours complexe jusqu'à t4.

Variables	moy	E-T	Variables	moy	E-T
t-1_yP	0.323	0.120	t-1r_yP	-0.130	0.036
t0_yP	0.453	0.114	t0_yP	0	0
t1_yP	0.671	0.108	t1r_yP	0.218	0.03
t2_yP	0.845	0.125	t2r_yP	0.392	0.037
t3_yP	0.953	0.138	t3r_yP	0.499	0.049
t4_yP	1.051	0.150	t4r_yP	0.598	0.069
t5_yP	1.221	0.131	t5r_yP	0.781	0.08

Tableau 32 : Valeurs des différents instants remarquables sur la courbe de déplacement antéropostérieure du CoP

Pour la condition U et face à la distance F. A gauche : instants à partir du signal de départ ; à droite : instants relatifs calés à partir du lever du pied avant ; t-1 : début des phénomènes dynamiques ; t0 : lever du pied avant ; t1 : poser du pied avant ; t2 : lever du pied arrière ; t3 : poser du pied arrière ; t4 : début du second mouvement ; t5 : premier double appui du second mouvement ; yP : coordonnée antéropostérieure du CoP ; moy : moyenne ; E-T : écart-type.

Pour tous les essais comportant une marche « simple », sans phase aérienne, nous avons analysés les instants remarquables de la courbe selon l'axe principal du mouvement du centre des pressions, en temps à partir du signal d'exécution et en temps relatif, *i.e.* à partir du lever du pied avant (Tableau 32).
L'instant t-1 représente la durée entre le signal d'exécution et le début des phénomènes dynamiques, c'est la latence motrice, elle est ici d'environ 320 ms.
t0 représente la durée entre le signal d'exécution et le début du mouvement volontaire, c'est le temps de réaction, il est ici d'environ 450 ms.
La durée comprise entre le début des phénomènes dynamiques et le début du mouvement volontaire (*i.e.* entre t-1 et t0) est la durée des ajustements posturaux anticipateurs (APA's), elle est donc ici d'environ 130 ms (t-1r_yP).

Variables	UF	UM	UR	UF *vs* UM	UF *vs* UR	UM *vs* UR
	moy - E-T	moy - E-T	moy - E-T	t - p	t - p	t - p
t4_yP	1.063 - 0.177	1.025 - 0.127	1.073 - 0.169	NS	NS	-2.416 - 0.021
t4r_yP	0.598 - 0.072	0.580 - 0.068	0.621 - 0.080	NS	NS	-2.953 - 0.0057
t5_yP	1.221 - 0.131	1.236 - 0.143	1.318 - 0.202	NS	-2.252 - 0.0276	-2.020 - 0.047
t5r_yP	0.781 - 0.080	0.774 - 0.110	0.874 - 0.133	NS	-3.330 - 0.001	-3.530 - 0.000

Tableau 33 : Comparaison des moyennes des instants de fin de la première marche et de début du mouvement suivant

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; Test t de Student pour échantillons appareillés pour t4, test t de Student pour échantillons indépendants pour t5 ; t4 : début du second mouvement ; t5 : premier double appui du second mouvement ; r : instant relatif avec le lever du pied avant comme origine ; yP : coordonnée antéropostérieure du CoP ; moy : moyenne ; E-T : écart-type ; en rouge valeurs significativement différentes.

De même, nous avons analysé l'amplitude normalisée, en fonction de la longueur de la jambe, du déplacement antéropostérieur du CoP (Tableau 34), au début du mouvement volontaire, ce qui correspond au recul initial du CoP sous l'effet du lever du pied avant (yP_t0), puis au poser du pied (yP_t1) avant que le centre des pressions ne progresse fortement vers l'avant. La légère avancée entre t0 et t1 permet d'apprécier le déplacement du CoP vers l'avant du pied arrière sous l'effet du basculement du corps vers l'avant pendant le balancé de la jambe pendulaire. Puis le déplacement sous le pied avant à l'instant du quitter du pied arrière (yP_t2) et enfin au poser du pied arrière (yP_t3).

Variables	moy	E-T
yPn_t0	-26.2	2.2
yPn_t1	-24.7	2.3
yPn_t2	47.9	4.5
yPn_t3	56.7	17.4

Tableau 34 : Moyenne et écart-type de l'amplitude antéropostérieure normalisée du CoP

Pour la condition U face à la distance F ; n : normalisé en fonction de la longueur de jambe ; t0 : lever du pied avant ; t1 : poser du pied avant ; t2 : quitter du pied arrière ; t3 : poser du pied arrière ; moy : moyenne ; E-T : écart-type.

Seul yP_t3, distances réelle et normalisée présente une différence selon les conditions (Tableau 35). Plus précisément cet instant survient plus tôt lorsque l'escrimeur est face à

une retraite que face à une attaque courte. La condition d'attaque longue présente des valeurs moyennes comparables à celles de l'attaque courte, mais avec plus de variabilité, ce qui ne permet pas de faire apparaître des différences significatives avec la condition de retraite.

Variables	UF	UM	UR	UF *vs* UM	UF *vs* UR	UM *vs* UR
	moy- E-T	moy - E-T	moy - E-T	*t - P*	*t - P*	*t - P*
yP_t3	0.593 - 0.22	0.590 - 0.25	0.499 - 0.07	NS	2.263- 0.035	NS
yPn_t3	54.5 - 16	52.9 - 21	46.7 - 6	NS	2.178 - 0.042	NS

Tableau 35 : Comparaison des moyennes des instants du poser du pied arrière entre les conditions

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; yP : cordonnées antéropostérieure du CoP en mètres ; yPn : cordonnés antéropostérieure du CoP en pourcentage de la longueur de jambe ; moy : moyenne ; E-T : écart-type ; t –p : t et P du test t de Student pour échantillons appareillés ; en rouge : différences significatives.

Comparaison des instants de changement d'appui d'après les signaux vidéo versus plateforme de force

En revanche, pour les instants datés le plus précisément possible, les différences entre les deux méthodes ne dépassent pas l'incertitude des mesures de l'outil vidéo, soit une image toutes les 20 ms (Tableau 37). Elles sont comprises, en moyenne, entre 8 et 27 ms pour les changements concernant le pied avant, entre 27 et 86 ms pour les changements concernant le pied arrière et entre 8 et 23 ms pour le début du second mouvement.

Variables	UF			UM			UR		
	moy	E-T	*P*	moy	E-T	*P*	moy	E-T	*P*
t0_yP	0.450	0.126	NS	0.458	0.121	NS	0.480	0.119	NS
t_TOF	0.42	0.13		0.45	0.12		0.46	0.12	
t1_yP	0.669	0.123	NS	0.680	0.118	0.011	0.700	0.120	NS
t_HCF	0.69	0.14		0.70	0.12		0.721	0.125	
t2_yP	0.850	0.144	0.022	0.880	0.205	NS	0.874	0.138	0.010
t_TOR	0.81	0.16		0.84	0.15		0.83	0.16	
t3_yP	0.963	0.147	0.003	0.932	0.129	0.000	0.969	0.155	0.000
t_TCR	1.02	0.17		1.00	0.14		1.04	0.17	
t4_yP	1.051	0.162	NS	1.038	0.139	NS	1.097	0.177	NS
t_02	1.03	0.18		1.05	0.14		1.09	0.19	

Tableau 36 : Différences entre les instants de changement d'appui selon le mode de recueil des données

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; t_yP : instants d'après le décours du centre des pressions ; t_ : instants d'après les coordonnées du déplacement des pieds, 0 et TOF : lever pointe avant ; 1 et HCF : poser pied avant ; 2 et TOR : lever pied arrière ; 3 et TCR : poser pied arrière (fin de la première marche) ; 4 et 02 : début du second mouvement ; moy : moyenne ; E-T : écart-type ; p : valeur du P du test t de Student pour échantillons appareillés ; en rouge : valeurs significativement différentes.

Conditions	t0_yP *vs* t_TOF écart moyen	t1_yP *vs* t_HCF écart moyen	t2_yP *vs* t_TOR écart moyen	t3_yP *vs* t_TCR écart moyen	t4_yP *vs* O2 écart moyen
UF	0.024	-0.019	0.038	-0.027	0.023
UM	0.008	-0.021	0.042	-0.065	-0.008
UR	0.018	-0.027	0.035	-0.086	-0.008
m des écarts	0.017	-0.022	0.038	-0.059	0.013

Tableau 37 : Ecarts moyens entre les instants de changement d'appui selon le mode de recueil des données

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; m des écarts : moyenne des écarts ; temps en seconde ; le signe négatif indique que la valeur recueillie avec la plateforme de force est inférieure à la valeur recueillie d'après la vidéo ; écart moyen : moyenne des écarts.

6.6.2. Centre de masse

Description des courbes

La courbe de variation de la force de réaction au sol selon l'axe vertical (Rz) est représentative de l'accélération verticale lorsque la valeur du poids du corps est déduite ($\Delta Rz = Rz - P = m.z''_G$). Le poids du corps est représenté par l'amplitude du plateau initial de la courbe (Figure 23). L'accélération est orientée vers le bas pendant une grande partie du déplacement du pied avant, puis augmente progressivement pour atteindre un pic au cours du double appui (entre t1 et t2). A t2 elle redevient négative, passant par des pics d'impact dus au reposer du pied arrière, atteint un pic positif au cours du double appui suivant, redevient négative pour augmenter à nouveau au cours du déplacement du pied pour le second mouvement.

La courbe de la force de réaction au sol selon l'axe antéropostérieur (Ry) est représentative de l'accélération selon l'axe antéropostérieur (à la masse du sujet près, $Ry = m.y''_G$). Cette accélération est tout de suite positive. Ceci indique que le sujet part vers l'avant. Elle diminue pour être nulle à l'instant où la vitesse du centre de masse selon l'axe antéropostérieur atteint un pic. Elle parvient à un minimum vers l'instant t2. Elle reste négative tout le temps du déplacement du pied arrière avec des pics d'impact dûs au reposer du pied arrière, elle reste négative une partie du double appui qui suit, puis peu avant le début du second mouvement, elle redevient positive.

La vitesse verticale du centre de masse (Vz) diminue et redevient positive au cours du déplacement du pied avant (entre t1 et t2). Comme le sabreur était immobile, cela signifie que son centre de masse commence par descendre. Le maximum de vitesse vers le haut est atteint peu de temps avant le lever du pied arrière (t2) puis elle redevient progressivement négative.

La vitesse du centre de masse selon l'axe antéropostérieur (Vy) montre une progression constante du sabreur vers l'avant. Elle atteint sa valeur maximale peu après le poser du pied avant (t1), puis diminue légèrement jusqu'au nouveau déplacement de ce même pied pour le second mouvement (t4).

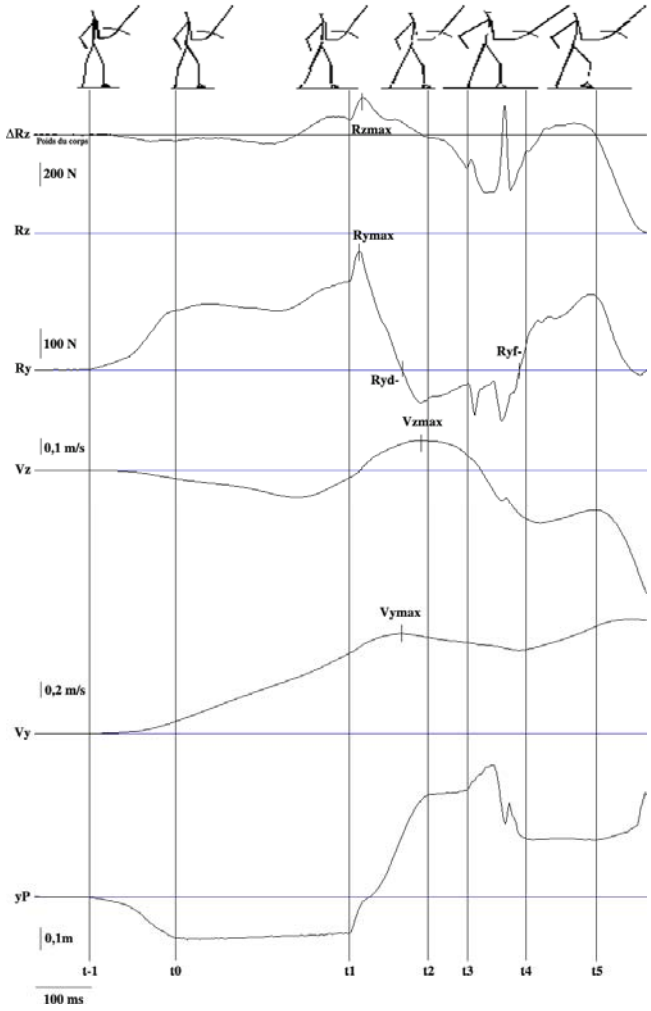


Figure 23 : Patron des courbes issues de la plateforme de force

Exemple pour un essai de la session U, réponse à une condition de distance M de l'adversaire. Rz : force de réactions verticale ; Ry : force de réaction antéropostérieure ; Vz : vitesse verticale du CoM ; Vy : vitesse antéropostérieure du CoM, yP : déplacement antéropostérieure du CoP ; N : force en newtons ; m/s : vitesse en mètre par seconde ; m : déplacement en mètre ; d- : début du freinage ; f- : fin du freinage ; max : pic de force ou de vitesse ; t-1 : début des phénomènes dynamiques ; t0 : lever du pied avant ; t1 : poser du pied avant ; t2 : lever du pied arrière ; t3 : poser du pied arrière ; t4 : début du second mouvement ; t5 : premier double appui du second mouvement.

Instants de survenue des événements

Aucun des temps, à part le début de la variation, en relatif, de la force verticale ne présentent de différences entre les conditions. Nous ne donnerons donc que les valeurs de la condition de distance intermédiaire pour ne pas alourdir la lecture (Tableau 38).

Rappelons que les temps réels débutent au signal d'exécution, et les temps relatifs au début du mouvement volontaire (*i.e.* le lever du pied avant). Les temps relatifs qui sont négatifs sont donc des instants de survenue d'événements qui se déroulent au cours des APAs.

Le début des variations dynamiques est quasiment le même sur l'axe vertical et l'axe antéropostérieur. La réaction au sol atteint sa valeur maximale sur les deux axes aussi avec un très petit décalage. Puis le passage à zéro de la force antéropostérieure est concomitant avec le pic de vitesse sur cet axe, suit de peu le pic de vitesse vertical et beaucoup plus tardivement, la fin du freinage sur l'axe antéropostérieur.

Temps réels	moy	E-T	Temps relatifs	moy	E-T
t_Rzd	0.296	0.108	tr_Rzd	-0.157	0.039
t_Ryd	0.313	0.114	tr_Ryd	-0.140	0.032
t_Rymax	0.694	0.109	tr_Rymax	0.241	0.031
t_Rzmax	0.722	0.112	tr_Rzmax	0.255	0.043
t_Ryd-	0.792	0.124	tr_Ryd-	0.339	0.039
t_Vymax	0.798	0.122	tr_Vymax	0.346	0.052
t_Vzmax	0.831	0.122	tr_Vzmax	0.364	0.047
t_Ryf-	1.009	0.135	tr_Ryf-	0.556	0.055

Tableau 38 : Moyenne des instants remarquables des données issues de la plateforme de force

Pour la session U, condition de distance F de l'adversaire, instants en seconde et classés chronologiquement. t : temps réel ; tr : temps relatif ; R: force de réaction ; V : vitesse du centre de masse ; z : axe vertical y : axe antéropostérieur ; d : début des variations ; max : pic de force ou de vitesse ; d- : début du freinage ; f- : fin du freinage ; moy : moyenne ; E-T : écart-type.

Seul l'instant du début des variations de Rz montre une différence selon les conditions (Tableau 39) : il survient plus proche du début du mouvement volontaire quand l'escrimeur est face à une attaque courte (UF) que face aux deux autres conditions de distance (UM et UR).

UF	UM	UR	UM *vs* UF	UF *vs* UR
moy = -0.153	moy = -0.175	moy = -0.174	t = -2.5912	t = 3.0351
E-T = 0.036	E-T = 0.062	E-T = 0.043	p = 0.0139	p = 0.0045

Tableau 39 : Instant relatif du début des variations de la force verticale selon les conditions (t_Rzd)

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; résultats du test t de Student pour échantillons appareillés ; moy : moyenne ; E-T : écart-type ; en rouge : valeurs significativement différentes.

Variables d'amplitude

Amplitudes vraies	moy	E-T	Amplitudes normalisées	moy	E-T
Ry_t0	184.58	18.88	Ryn_t0	0.234	0.014
Ry_max	303.96	62.12	Ryn_max	0.386	0.083
ΔRz_t0	-100.23	49.56	ΔRzn_t0	-0.124	0.054
ΔRz_max	265.08	74.61	ΔRzn_max	0.326	0.084
Vy_t0	0.13	0.06			
Vy_max	0.95	0.15			
Vz_t0	-0.024	0.039			
Vz_max	0.195	0.046			

Tableau 40 : Moyenne des amplitudes remarquables des données issues de la plateforme de force

Pour la session U, condition de distance F de l'adversaire ; Ry : force de réaction sur l'axe antéropostérieur en Newtons ; ΔRz : force de réaction déduite du poids du corps sur l'axe vertical en Newtons ; Vy et Vz : vitesses du centre de masse en $m.s^{-1}$ sur chacun des axes ; _t0 : au début du mouvement volontaire ; max : pic de force ou de vitesse ; Ryn et Rzn : forces de réaction normalisées, en nombre de fois le poids du corps ; moy : moyenne ; E-T : écart-type.

Aucune des amplitudes ne présente de différences entre les conditions. Nous ne donnerons donc que les valeurs de la condition de distance intermédiaire pour ne pas alourdir la lecture comme pour les variables temporelles (Tableau 40).

Au début du mouvement volontaire (t0), le centre de masse est animé d'un mouvement vers l'avant et légèrement vers le bas. Le maximum de vitesse atteint dans l'axe principal du mouvement est presque cinq fois supérieur à celui atteint sur l'axe vertical. Néanmoins, les valeurs de forces normalisées en fonction du poids du corps montrent que la première marche s'effectue sans développer de grand niveau de force. Le pic de force normalisé atteint est du même ordre de grandeur sur les deux axes. Environ deux tiers du niveau de force maximale sur l'axe antéropostérieur sont déjà atteints au début du mouvement volontaire.

Comparaison des amplitudes d'après les signaux vidéo versus plateforme de force

Conditions	Outils	Vy_max		Vz_max	
		moy	E-T	moy	E-T
UF	PF	0.972	0.149	0.198	0.044
	Vi	0.978	0.243	0.179	0.059
UM	PF	0.988	0.402	0.222	0.190
	Vi	1.045	0.584	0.200	0.202
UR	PF	0.878	0.232	0.176	0.037
	Vi	0.901	0.195	0.171	0.046

Tableau 41 : Différences entre les pics de vitesse selon le mode de recueil des données

Vy_max : pic de vitesse antéropostérieure ; Vz_max : pic de vitesse verticale ; U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; PF : données issues de la plateforme de force ; Vi : données issues de la vidéo ; moy : moyenne ; E-T : écart-type.

Nous ne pouvons comparer que les variables d'amplitude concernant le centre de masse. Les variables mesurées avec les deux méthodes de recueil des données sont les pics de vitesses sur l'axe vertical et l'axe antéropostérieur. En effet, le calcul de la vitesse nécessitait une opération à partir de chaque donnée brute : une dérivation à partir des valeurs de déplacement recueillies avec la vidéo et une intégration à partir des valeurs d'accélération recueillies avec la plateforme de force (Tableau 41). Les valeurs moyennes sont très proches. Les écarts-types sont importants et dûs à la grande variabilité inter-individuelle. Ils sont encore plus importants lorsque l'escrimeur est face à une attaque longue (UM). Systématiquement, la dérivation des données vidéo donne une valeur moyenne de vitesse plus grande que l'intégration des données de la plateforme de force sur l'axe antéropostérieur et plus petite sur l'axe vertical. Un test *t* de Student pour échantillons appareillés montre que cette différence est significative entre les valeurs du pic de vitesse verticale issues des deux méthodes (Tableau 42).

Variable	Outils	moy	E-T	*t*	*P*
Vz_max	PF	0.199	0.119	2.7528	0.007651
	Vi	0.184	0.128		

Tableau 42 : Différence entre les pics de vitesse verticale selon le mode de recueil des données

Vz_max : pic de vitesse verticale ; PF : données issues de la plateforme de force ; Vi : données issues de la vidéo ; moy : moyenne pour tous les groupes ; E-T : écart-type pour tous les groupes.

6.7. RECHERCHE D'UN SOUS-MODELE POUR L'ENSEMBLE DES VARIABLES

Une analyse factorielle discriminante (AFD) pas à pas[8] nous a permis de chercher s'il existait un sous-ensemble de variables tiré de l'ensemble des variables initiales qui permettrait de prédire si l'escrimeur a « perçu » qu'il devait faire face à une attaque longue, une attaque courte ou à une retraite. Pour utiliser la totalité des variables issues, aussi bien des acquisitions vidéo que des acquisitions par la plateforme de force, nous avons réduit le nombre d'essais à quatre par condition et par sujet (étant donné que nous ne disposons que de ce nombre d'essais traités pour la cinématique). Notre analyse porte donc sur un ensemble de 72 essais (4 x 3 x 6).

L'analyse discriminante pas à pas permet d'extraire le sous-ensemble de variables les plus prédictives. En effet, certaines variables peuvent ne pas être prédictives, ou d'autres être redondantes, et donc ne pas contribuer ou de manière artificielle à la discrimination. A chaque pas de l'analyse, le logiciel sélectionne, parmi les variables, celle qui maximise le R^2, puis celle qui l'augmente le plus. Cette procédure est répétée pour toutes les variables initiales. Au quinzième pas, l'augmentation du R^2 n'est plus significative ($p>0,02$). Puis, le logiciel teste si la suppression de la première variable sélectionnée (la durée du déplacement du pied arrière (Δrear) diminue significativement le R^2. Si $p<0,02$, la variable est conservée dans le sous-modèle, sinon elle est éliminée. Cette procédure est répétée pour toutes les variables qui ont été introduite dans le sous-modèle précédemment.

Ainsi, parmi les 95 variables initiales, le logiciel a sélectionné un sous-modèle de 14 variables, à savoir : durée du déplacement du pied arrière (Δrear), instant normalisé du pic de freinage du sabre (tn_Amin_a), pic de vitesse maximale du pied arrière (Vmax_pr), angle à l'instant du début du mouvement volontaire entre le bras et l'avant-bras (αHOF_b-ab), instant normalisé du début de la modification angulaire entre le bras porteur et le tronc (tn_αd_b-t), instant normalisé du pic de vitesse maximale du sabre (tn_Vmax_a), pic de vitesse maximale du pied avant (Vmax_pv), force antéropostérieure normalisée exercée au CoM au décollé du pied avant (Ryn_t0), angle maximale d'ouverture de la jambe avant (αmax_jv), pic de freinage de l'arme (Amin_a), allongement total du bras au cours de la marche (αall_b-ab), distance entre les pieds après le déplacement du pied avant (d1), durée de la marche (Δ_mvt), instant normalisé de survenue de l'angle maximal d'allongement de la jambe avant (tn_αmax_jv).

Le Tableau 43 montre que, avec ce sous-ensemble de 14 variables, le pouvoir discriminant associé à la première composante discriminante[9] est de 0,607 et la seconde composante discriminante a un pouvoir discriminant de 0,454.

---

[8] Cette technique permet de construire un « modèle » de discrimination qui donnera la meilleure prévision de l'appartenance d'une observation à un groupe en examinant, à chaque étape, toutes les variables et en évaluant celle qui contribue le plus à discriminer entre les groupes. Cette variable sera alors introduite dans le modèle, puis le logiciel de traitement statistique passera à l'étape suivante. Au fur et à mesure des étapes, des variables initialement introduites peuvent également être éliminées si sa signification statistique est inférieure au F d'exclusion qui a été choisie. En dernier ressort, seules seront conservées dans le « modèle », les variables « importantes », *i.e.* celles qui contribuent le plus à discriminer les groupes.

[9] Les fonctions discriminantes sont les combinaisons optimales de variables qui fournissent les plus grandes discriminations globales entre les groupes. Elles sont indépendantes ou orthogonales, *i.e.* que leurs

Fonction	Valeur propre	% de la variance	% cumulé	Corrélation canonique
1	1,54	64.9	64.9	0.779
2	0,83	35.1	100.0	0.674

Tableau 43 : Valeurs propres des deux premières fonctions discriminantes canoniques

Session avec incertitude ; pourcentage de la variance expliqué par chaque composante discriminante et pourcentage cumulé. Le R^2 est la valeur de la corrélation canonique au carré.

Pour les deux premières fonctions discriminantes, on teste l'hypothèse H(0) : $R^2 \approx 0$. Dans les deux cas, le niveau de signification[10] *P* est inférieur à 0,001, on rejette H(0) et on conclut que les deux scores sont significatifs pour la discrimination (Tableau 44).

Test des fonctions	Lambda de Wilks[11]	Khi-deux	ddl	Signification
de 1 à 2	0.214	93.166	28	0.000
2	0.545	36.715	13	0.000

Tableau 44 : Lambda de Wilks, degré de liberté et niveau de signification

Nous pouvons alors établir des scores[12] prédictifs à partir des coefficients de la combinaison linéaire (Tableau 45) définissant chaque composante discriminante :

Score 1 = 0,166 x Δ_mvt + 0,971 x αHOF_b-ab + …- 0,360 x Ryn_t0

Score 2 = 0,756 x Δ_mvt – 1,352 x αHOF_b-ab + …+ 0,468 x Ryn_t0

Variables	Fonction	
	1	2
Δ_mvt	0,166	0,756
αHOF_b-ab	0,971	-1,352
tn_αd_b-t	0,562	-0,082
tn_αmax_jv	0,596	0,263
αmax_jv	0,564	0,701
Vmax_pr	-0,719	-0,165
Vmax_pv	-0,672	0,828
tn_Vmax_a	-0,543	0,801
tn_Amin_a	-0,791	0,285
Amin_a	0,728	0,295
d1	0,893	-0,677
αall_b-ab	0,430	0,343
Δrear	-0,654	-1,145
Ryn_t0	-0,360	0,468

Tableau 45 : Coefficients des fonctions discriminantes canoniques standardisées

Session avec incertitude ; légendes des variables dans le texte ci-dessus.

---

contributions à la discrimination entre les groupes ne se chevauchent pas. Le nombre maximum de fonctions discriminantes est égal au nombre de groupes moins un.

[10] Seules les fonctions discriminantes qui sont statistiquement significatives doivent être utilisées pour l'interprétation.

[11] Le Lambda de Wilks évolue en sens inverse par rapport au R^2.

[12] Si l'on veut trouver la classe d'affectation d'un nouveau sabreur pour lequel on connaîtrait la valeur des nouvelles variables, une règle simple et géométrique d'affectation serait de choisir la classe dont le centre de gravité serait le plus proche du point-individu.

Pour le score 1, la moyenne de la condition UM est très différente de celle d'UF. Pour le score 2, c'est la moyenne de la condition UR qui est très différente de celle d'UF (Tableau 46). Afin d'apprécier la qualité de la séparation des trois classes, nous projetons les individus sur les deux composantes discriminantes non centrées. A partir de la Figure 24, nous pouvons définir la règle d'affectation d'un nouvel escrimeur de haut niveau, qui nous permettrait de poser l'hypothèse qu'il a « perçu » le type de déplacement initial qu'a effectué son adversaire :

- Si le score 1 est supérieur à zéro, l'escrimeur a perçu qu'il faisait face à une attaque longue. On observe cinq erreurs d'affectation, 79, 2 % des essais sont bien classés.
- Si les scores 1 et 2 sont inférieurs à zéro, l'escrimeur a perçu qu'il faisait face à une retraite. On observe cinq erreurs d'affectation, 78,3 % des essais sont bien classés.
- Si le score 1 est inférieur à zéro, l'escrimeur a perçu qu'il faisait face à une attaque courte. On observe trois erreurs d'affectation, 87 % des essais sont bien classés.

Il y a donc treize erreurs d'affectation au total et 81,4 % des essais qui sont bien classés. Il faudrait disposer d'un nouvel échantillon d'escrimeur pour pouvoir estimer la stabilité des résultats.

Condition	Fonction	
	1	2
UM	1.638	0.282
UF	-1.196	0.927
UR	-0.513	-1.221

Tableau 46 : Fonctions aux barycentres des groupes

U : session avec incertitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; fonctions discriminantes canoniques non standardisées évaluées aux moyennes des groupes.

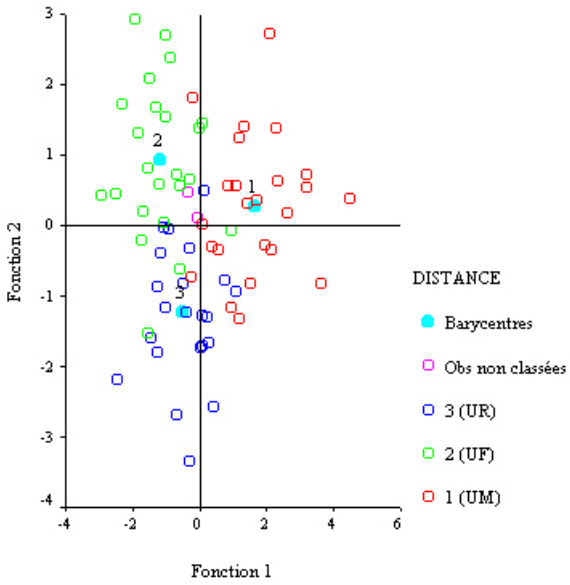


Figure 24 : Répartition des essais sur les deux premières fonctions discriminantes

U : session avec incertitude ; R : face à une retraite ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; barycentre : barycentre par groupe (condition de distance).

Les coefficients de corrélation de Pearson entre les variables et les deux composantes discriminantes (Tableau 47) doivent nous permettre d'étudier la sémantique de ces deux composantes et les variables les plus importantes pour la séparation des classes. Il apparaît que seul la durée du déplacement du pied arrière (Δrear) est corrélée significativement à la fois avec le score 1 (-0,430) et avec le score 2 (-0,553). En rapprochant ces résultats des résultats contenus dans le Tableau 46 et la Figure 24, nous pouvons en conclure que lorsque l'escrimeur fait face à une :

Variables	Score discriminant de la fonction	
	1	2
Δrear	-0.430 (*P*=.000)	-0.553 (*P*=.000)
tn_Vmax_a		0.511 (*P*=.000)
tn_Amin_a	-0.439 (*P*=.000)	
Vmax_pr	-0.283 (*P*=.018)	
Δ_mvt	-0.276 (*P*=.021)	
Ryn_t0	-0.271 (*P*=.021)	
tn_αd_b-t	0.251 (*P*=.036)	
αall_b-ab	0.244 (*P*=.041)	
Vmax_pv	-0.240 (*P*=.045)	

Tableau 47 : Corrélations significatives entre les variables et les deux composantes discriminantes, session U
Coefficients de corrélation de Pearson et valeur du P ; 1, 2 : numéro des composantes discriminantes.

- attaque longue (M), il présente des essais répartis du côté positif du score 1 et des deux côtés du score 2 ; par conséquent les essais face à cette condition présentent le profil moyen suivant, des instants normalisés d'atteinte du pic de vitesse de l'arme et de début de modification angulaire entre le bras et le tronc tardifs ;
- attaque courte (F), il présente des essais placés presque exclusivement dans le cadran 1 négatif et 2 positif, par conséquent les essais face à cette condition présentent le profil moyen suivant, une durée de mouvement longue, des grands pic de vitesse des pieds avant et arrière, un instant normalisé d'atteinte d'accélération de l'arme tardif et une grande force antéropostérieure appliquée au CoM au décollé du pied avant ;
- retraite (R), il présente des essais placés presque exclusivement dans le cadran 1 négatif et 2 négatif, par conséquent les essais face à cette condition présentent le profil moyen suivant, principalement une grande durée de déplacement de la jambe arrière.

7. ETUDE DU SABREUR EN CONDITION AVEC CERTITUDE

Afin de vérifier les effets de la distance, nous comparons les trois conditions (deux marches et fente, marche et fente, marche retraite) dans la session « avec certitude » (C). Le sujet testé a donc connaissance du mouvement et de la position finale du sujet adversaire. En effet, comme les trois mouvements à produire sont différents dans la conception et dans l'intention, nous sommes amenés à penser qu'il existe des différences significatives dans la réponse de l'escrimeur pour y faire face.

7.1. SOUS-MODELE POUR DISCRIMINER LA DISTANCE

Nous avons cherché, comme pour la session avec « incertitude » le sous-modèle qui maximise la séparation des réponses selon la distance à laquelle le sabreur devait faire face. Une analyse factorielle discriminante, pas à pas, a donc été effectuée sur les mêmes variables et pour aussi 72 essais communs au recueil des données par la vidéo et la plateforme de force.

L'analyse propose un sous-modèle composé de 11 variables pour le même degré de signification que précédemment ($p<0,02$). Ces variables sont : pic de vitesse maximale du pied arrière (Vmax_pr), instant normalisé du début de la modification angulaire entre le bras porteur et le tronc (tn_αd_b-t), angle maximal d'ouverture de la jambe (αmax_jv), pics de vitesses verticale et antéropostérieure maximales du CoM (Vmax_gz et Vmax_gy), ainsi que la vitesse verticale à l'instant du lever du pied avant (Vz_t0), instants normalisés de l'ouverture maximale de la jambe (tn_αmax_jv) et du contact de la pointe après le déplacement du pied avant (tn_HCF), angle de l'ouverture bras-tronc (αouv_b-t), angle maximum atteint (αmax_b-t), et instant relatif du début des phénomènes dynamiques = durée des APAs (t-1r_yP).

Quatre variables (notées en rouge) sont communes aux deux sessions. Néanmoins, pour la session avec certitude, le sous-modèle comporte moins de variables que pour la session avec incertitude. Il apparaît aussi ici, des variables qui concernent la cinématique globale du corps (variations du CoM et du CoP). Enfin, la cinématique segmentaire est davantage représentée (*e.g.* angles bras-tronc, jambe…). Le Tableau 48 montre qu'en prenant ce sous-ensemble de 11 variables, le pouvoir discriminant associé à la première composante discriminante est de 0,667 et la seconde composante discriminante a un pouvoir discriminant de 0,546.

Fonction	Valeur propre	% de la variance	% cumulé	Corrélation canonique
1	2.010	62.6	62.6	0.817
2	1.203	37.4	100.0	0.739

Tableau 48 : Valeurs propres des deux premières fonctions discriminantes canoniques, session avec certitude

Pourcentage de la variance expliqué par chaque composante discriminante et pourcentage cumulé. Le R^2 est la valeur de la corrélation canonique au carré.

Pour les deux premières fonctions discriminantes, on teste l'hypothèse H(0) : $R^2 \approx 0$. Dans les deux cas, le niveau de signification *P* est inférieur à 0,001, on rejette H(0) et on conclut que les deux scores sont significatifs pour la discrimination (Tableau 49).

Test des fonctions	Lambda de Wilks	Khi-deux	ddl	Signification
de 1 à 2	0.151	113.502	22	0.000
2	0.454	47.377	10	0.000

Tableau 49 : Lambda de Wilks et niveau de signification, session avec certitude

ddl : degré de liberté.

Nous pouvons alors établir des scores prédictifs à partir des coefficients de la combinaison linéaire d'après le Tableau 50 définissant chaque composante discriminante.

Variables	Fonction	
	1	2
Vmax_pr	0.703	1.390
tn_αd_b-t	0.806	-0.529
αmax_jv	-0.197	1.053
Vmax_gz	0.707	0.424
αouv_b-t	-1.376	0.714
αmax_b-t	1.606	-1.026
Vmax_gy	-1.281	0.038
t-1r_yP	0.133	-0.651
Vz_t0	-0.651	0.537
tn_HCF	0.486	-0.275
tn_amax_jv	-0.361	0.060

Tableau 50 : Coefficients des fonctions discriminantes canoniques standardisées, session avec certitude

En rouge : les variables présentes aussi dans le sous-modèle de la session avec incertitude ; légende des variables : voir le texte ci-dessus.

Pour le score 1, la moyenne de la condition CR est très différente de celle de CF. Pour le score 2, les trois moyennes sont différentes (Tableau 51).

Condition	Fonction	
	1	2
CM	-0.767	-1.490
CF	-1.240	1.153
CR	1.859	0.199

Tableau 51 : Fonctions aux barycentres des groupes, session avec certitude

C : session avec certitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; fonctions discriminantes canoniques non standardisées évaluées aux moyennes des groupes.

Afin d'apprécier la qualité de la séparation des trois classes, nous projetons les individus sur les deux composantes discriminantes non centrées.

A partir de la Figure 25, nous pouvons définir la règle d'affectation d'un nouvel escrimeur de haut niveau, qui nous permettrait de poser l'hypothèse qu'il a «programmé» le même type de mouvement pour faire face au même déplacement initial qu'a effectué son adversaire :

- si le score 1 est inférieur à zéro et le score 2 supérieur à zéro, l'escrimeur s'organise pour faire face à une attaque courte. Il n'y a quatre erreurs d'affectation, 83,3 % des essais sont bien classés ;

- si les scores 1 et 2 sont inférieurs à zéro, l'escrimeur s'organise pour faire face à une attaque longue. Il n'y a cinq erreurs d'affectation, 79,2 % des essais sont bien classés ;
- si le score 1 est supérieur à zéro, l'escrimeur s'organise pour faire face à une retraite. Il n'y a trois erreurs d'affectation, 87,5 % des essais sont bien classés.

Il faudrait disposer d'un nouvel échantillon d'escrimeur pour pouvoir estimer la stabilité des résultats. Au total, 83,3% des essais originaux sont bien classés.

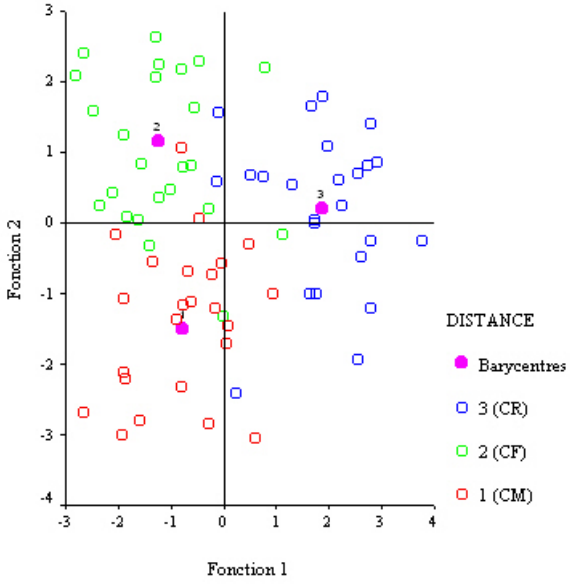


Figure 25 : Répartition des essais sur les deux premières fonctions discriminantes, session avec certitude

C : session avec certitude ; R : face à une retraite ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; barycentre : barycentre par groupe (condition de distance).

Les coefficients de corrélation (Tableau 52) font apparaître que deux variables sont corrélées significativement à la fois avec le score 1 et avec le score 2 ; il s'agit de l'instant normalisé d'apparition de la modification angulaire entre le bras et le tronc (tn_αd_b-t) et le pic de vitesse du pied arrière (Vmax_pr). En rapprochant ces résultats des résultats contenus dans le Tableau 51 et la Figure 25, nous pouvons en conclure que lorsque l'escrimeur fait face à une :

- attaque longue (M), il présente des essais placés presque exclusivement dans le cadran 1 négatif et 2 négatif ; par conséquent, les essais face à cette condition présentent le profil moyen suivant : un instant de survenue de l'angle d'étendue maximale de la jambe avant tardif, accompagné d'un grand angle d'ouverture totale entre le bras et le tronc et un instant normalisé de survenue du début de la modification angulaire entre le bras et le tronc tardif ;
- attaque courte (F), il présente des essais placés presque exclusivement dans le cadran 1 négatif et 2 positif ; par conséquent, les essais face à cette condition présentent le profil moyen suivant : un instant de survenue de l'angle d'étendue maximale de la jambe avant tardif, accompagné d'un grand angle d'ouverture totale entre le bras et le tronc comme ci-dessus mais avec un grand pic de vitesse du pied arrière ;

- retraite (R), il présente des essais répartis du côté positif du score 1 et des deux côtés du score 2, par conséquent les essais face à cette condition présentent le profil moyen suivant, principalement un grand pic de vitesse verticale du CoM et, pour une partie des essais, un instant normalisé tardif de début de modification angulaire entre le bras et le tronc ; pour l'autre partie des essais : un grand pic de vitesse du pied arrière.

Variables	Score discriminant de la fonction	
	1	2
tn_αd_b-t	0.451 (*P*=.000)	-0.321 (*P*=.006)
Vmax_pr	0.384 (*P*=.001)	0.529 (*P*=.000)
αouv_b-t	-0.515 (*P*=.000)	
Vmax_gz	0.270 (*P*=.022)	
tn_αmax_jv	-0.259 (*P*=.028)	

Tableau 52 : Corrélations significatives entre les variables et les deux composantes discriminantes, session C

Coefficients de corrélation de Pearson et valeur du P ; 1, 2 : numéro des composantes discriminantes ; en rouge : les variables présentes aussi dans le sous-modèle de la session avec incertitude.

7.2. AJUSTEMENTS POSTURAUX ANTICIPATEURS

L'analyse des variables étudiées nous permet de distinguer différentes phases lors de la marche. Nous observons : 1) une phase préparatoire de t-1 à t0, 2) une phase d'exécution de la marche (la phase de la marche débute au décollement du pied, t0, et se termine au poser du pied, t1). Suit une phase de double appui de t1 à t2, 3) une phase de ramener du pied de t2 à t3 qui constitue la seconde partie de la marche de l'escrimeur.

	CF	CM	CR
Durée des APAs (s)	0.154 ± 0.049 s	0.127 ± 0.042 s	0.141 ± 0.057 s
Vy_max ($m.s^{-1}$)	1.051 ± 0.287 m/s	0.894 ± 0.305 m/s	1.085 ± 0.305 m/s
r	0.429	0.374	0.494
P	<0.01	<0.05	<0.00

Tableau 53 : Corrélation entre la durée des APAs et la vitesse maximale de progression, session avec certitude

Vy_max : pic de vitesse de progression; r : coefficient de corrélation ; P : niveau de signification ; C : session avec certitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite.

La distance modifie les rapports entre les différentes phases de la marche. D'après la littérature, les APAs sont représentatifs de la phase préparatoire et conditionnent le mouvement à venir. Or, il est établi que la durée des APAs varie dans le même sens que la vitesse de progression de la marche (plus les APAs durent, plus le pic de vitesse maximale antéropostérieure atteint par le CoM est grand). Dans notre étude, la durée des APAs (t-1r_yP) qui est la durée comprise entre t-1 et t0, se trouve être la plus longue lorsque l'escrimeur fait face à une attaque courte (Tableau 53), *i.e.* pour la condition de distance intermédiaire (CF).

La durée des APAs est également corrélée, avec la longueur de la marche normalisée en fonction de la taille de la jambe des sabreurs (yPn_t2), sauf pour la condition face à une attaque courte (Tableau 54). Cette longueur représente la progression effectuée par le pied

avant sur l'axe antéropostérieur. Le pas est d'autant plus grand que la durée des APAs a été longue.

	CF	CM	CR
Longueur pas (%)	50.1 ± 0.108	43.9 ± 0.104	48.1 ± 0.096
r	0.222	0.486	0.401
P	NS	<0.01	<0.01

Tableau 54 : Corrélation entre la durée des APAs et la longueur du pas normalisée, session avec certitude

Longueur du pas normalisée selon la longueur de jambe ; r : coefficient de corrélation ; P : niveau de signification ; C : session avec certitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite.

Il existe une relation entre la valeur non normalisée du recul du centre des pressions (yP_t0) et le pic de vitesse maximale de progression (Vy_max), mais uniquement face à la condition de retraite : plus le centre des pressions de l'escrimeur recule, moins il va vite au cours de la première marche, comme c'est le cas dans l'initiation de la marche normale. En revanche, nous ne trouvons pas de corrélation lorsqu'il s'agit de l'amplitude du recul normalisé (Tableau 55). En escrime, le départ est particulier, puisque les sabreurs se tiennent pieds déjà décalés et débutent la marche par le pied avant.

	CF	CM	CR
Amplitude du recul (%)	-26.2 ± 0.020	-26.5 ± 0.018	-25.7 ± 0.021
r	-0.160	0.209	0.159
P	NS	NS	NS
Amplitude du recul (m)	-0.295	-0.296	-0.290
r	-0.054	0.111	0.511
P	NS	NS	<0.01

Tableau 55 : Corrélation entre l'amplitude du recul du centre des pressions et le pic de vitesse de progression du centre de masse, session avec certitude

Recul du CoP normalisée selon la longueur de jambe ; r : coefficient de corrélation ; P : niveau de signification ; C : session avec certitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite.

Pour élargir nos résultats à un autre résultat important sur l'initiation de la marche normale, nous avons aussi regardé si le pic de vitesse maximale de progression est corrélé (Tableau 56) avec la durée de la phase d'exécution de la marche (t1r_yP). Nous trouvons effectivement cette relation, mais la corrélation est positive, ce qui est à l'inverse des résultats portant sur l'initiation de la marche « normale » où elle est négative, *i.e.* plus la vitesse atteinte au cours du pas est grande plus la durée d'exécution du pas est courte.

	CF	CM	CR
Durée d'exécution (s)	0.238 ± 0.060	0.207 ± 0.064	0.237 ± 0.052
r	0.786	0.898	0.722
P	<0.000	<0.000	<0.000

Tableau 56 : Corrélation entre la durée d'exécution du pas et la vitesse maximale de progression, session avec certitude

r : coefficient de corrélation ; P : niveau de signification ; C : session avec certitude ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite.

8. COMPARAISON DES DEUX SESSIONS

Nous avons détaillé l'ensemble des variables pour la session avec incertitude, celle qui correspond à l'adaptation réelle du sabreur face au déplacement initial et concomitant de son adversaire. Puis, l'étude de la session avec certitude, nous a permis de donner les résultats en rapport avec l'intention initiale du sabreur, connaissant par avance le déplacement de son adversaire. Les conditions expérimentales de cette seconde session peuvent se rapprocher d'une répétition « routinière » d'entraînement. Nous nous sommes centrés surtout, dans cette partie sur :

- la distinction du sous-modèle qui maximalisait les différences entre les conditions au cours de cette session comparativement à la session avec incertitude ;
- les résultats concernant les ajustements posturaux anticipateurs comparativement aux résultats sur l'initiation de la marche dans la littérature.

Nous n'avons donc pas donné les résultats concernant l'ensemble des variables pour la session avec certitude, préférant appréhender directement les différences par l'intermédiaire d'une Analyse Factorielle Discriminante sur l'ensemble des variables couplée à une Manova à trois facteurs : 1) un facteur distance qui permet de voir si, à un instant particulier, l'escrimeur ayant perçu l'intention de son adversaire, son propre mouvement contient les mêmes caractéristiques cinétiques ou cinématiques que celui qu'il adopte lorsqu'il connaît par avance cette intention ; 3) un facteur session qui permet de discuter du caractère pré-programmé de son déplacement ; 3) un facteur sujet qui permet de discuter des stratégies ou des « styles » individuels.

8.1. EFFETS DISTANCE

8.1.1. Sous-modèle qui maximalise la séparation des conditions de distance

Quelle que soit la session (certitude ou incertitude), certaines variables permettent de distinguer la condition de distance. Le sous-modèle issu de l'AFD pas à pas comporte 18 variables.

Fonction	Valeur propre	% de la variance	% cumulé	Corrélation canonique
1	0.537	61.00	61.00	0.695
2	0.798	39.00	100.0	0.612

Tableau 57 : Valeurs propres des deux premières fonctions discriminantes canoniques (discrimination de la distance)

Pourcentage de la variance expliqué par chaque composante discriminante et pourcentage cumulé. Le R^2 est la valeur de la corrélation canonique au carré.

Le Tableau 57 montre qu'en prenant ce sous-ensemble, le pouvoir discriminant associé à la première composante discriminante est de 0,483 et la seconde composante discriminante a un pouvoir discriminant de 0,375.

Pour les deux premières fonctions discriminantes, le Tableau 58 montre que les deux scores sont significatifs pour la discrimination.

Test des fonctions	Lambda de Wilks	Khi-deux	ddl	Signification
de 1 à 2	0.323	142.890	36	0.000
2	0.626	59.275	17	0.000

Tableau 58 : Lambda de Wilks et niveau de signification (discrimination de la distance)
ddl : degré de liberté.

Le Tableau 59 présente les coefficients affectés à chaque variable du sous-modèle pour la combinaison linéaire définissant chaque composante discriminante. Parmi les variables constituant le sous-modèle, deux d'entre elles appartenaient au sous-modèle de chaque session prises séparément : tn_αd_b-t (instant normalisé du début de la modification angulaire entre le bras et le tronc) et Vmax_pr (pic de vitesse du pied arrière).

Variables	Fonction	
	1	2
d3	0.371	0.385
tn_αd_b-t	0.362	-0.551
tn_Amin_a	-0.350	0.111
Vmax_pr	-0.581	0.176
Vmin_gz	-0.485	0.259
tn_Vmax_gz	-0.404	0.516
Δnstance1	-0.026	0.543
Amin_a	0.387	-0.213
Vmax_gz	1.229	-0.316
αouv_b-t	0.041	1.103
Ryn_t0	-0.048	0.468
tn_Vmax_pr	1.360	-0.244
tn_Amin_pv	0.758	-0.077
t-1r_yP	0.261	-0.181
αmax_b-t	-0.385	-0.986
tn_Vmax_a	-0.279	0.309
αHOF_b-t	0.711	0.707
Ryn_max	-0.504	-0.570

Tableau 59 : Coefficients des fonctions discriminantes canoniques standardisées (discrimination de la distance)
Les variables sont présentées dans l'ordre d'apparition dans le sous-modèle, légende dans le texte ci-dessous ; en rouge : les variables qui présentent un effet distance (Manova effectuée sur l'ensemble des variables des deux sessions).

Dans le sous-modèle, on trouve aussi : trois autres variables qui concerne l'angle entre le bras et le tronc : la valeur au décollé du pied avant (αHOF_b-t), la valeur maximale atteinte (αmax_b-t) et l'angle d'ouverture atteinte (αouv_b-t) ; puis la durée des APAs (t-1r_yP) et la durée normalisée du premier double appui (Δnstance1) ; ainsi que plusieurs variables qui concernent le COM : les pics de vitesse de descente et de remontée (Vmin_gz, Vmax_gz), la force antéropostérieure normalisée au décollé du pied avant (Ryn_t0) et maximale atteinte (Ryn_max) ; plusieurs instants normalisés qui concernent aussi bien les instants d'apparition des vitesses maximales, de remontée du COM (tn_Vmax_gz), du pied arrière (tn_Vmax_pr), de l'arme (tn_Vmax_a), du freinage de l'arme (tn_Amin_a) et du pied avant (tn_Amin_pv) et enfin, la distance entre les pieds après le retour du pied arrière (d3) et le pic de freinage de l'arme (Amin_a).
Pour le score 1, c'est la moyenne de la condition M qui est différente des deux autres. Pour le score 2, la moyenne de la condition F est différente de la moyenne de la condition R, la moyenne de la condition M étant intermédiaire entre les deux autres (Tableau 60).

La projection des individus sur les deux composantes discriminantes non centrées (Figure 26) montre une séparation moins nette des essais que pour les sessions prises séparément.

Condition	Fonction	
	1	2
M	1.365	0.141
F	-0.812	0.866
R	-0.512	-0.982

Tableau 60 : Fonctions aux barycentres des groupes (discrimination de la distance)

F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; fonctions discriminantes canoniques non standardisées évaluées aux moyennes des groupes.

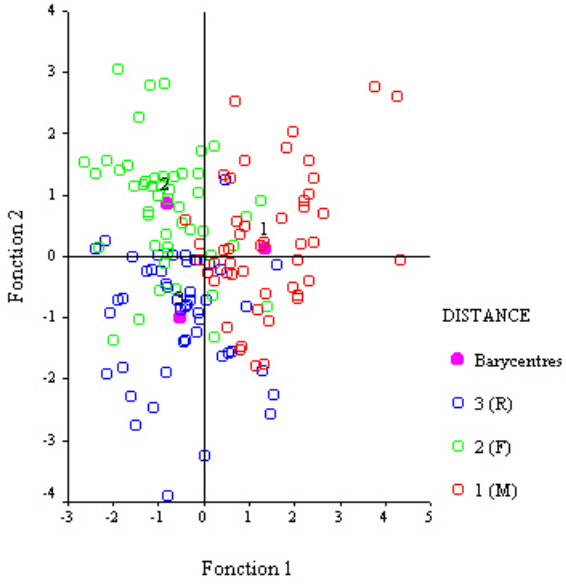


Figure 26 : Répartition des essais sur les deux premières fonctions discriminantes (discrimination de la distance)

R : face à une retraite ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; barycentre : barycentre par groupe (condition de distance).

	Distance	Classe d'affectation prévue			Total
		M	F	R	
Effectifs	M	36	4	8	48
	F	4	36	8	48
	R	3	7	38	48
	M	75.0	8.3	16.7	100
%	F	8.3	75.0	16.7	100
	R	6.3	14.6	79.2	100

Tableau 61 : Résultats du classement (discrimination de la distance)

F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; effectifs : nombre d'essais originaux par condition ; classes d'affectation prévue : si tous les essais originaux étaient classés correctement, le nombre d'essais indiqué dans la classe prévue serait égal au même nombre, si un chiffre apparaît dans une autre classe, cela signifie que ces essais présentent (d'après les variables constituant le sous-modèle) des caractéristiques plus proches de cette classe que de sa classe d'origine ; % : effectifs par classe en pourcentage du total des effectifs de la classe originale.

Ce sont les essais de la condition R (face à une retraite) qui sont affectés avec le plus de fidélité (79,2% des essais originaux). Les erreurs d'affectations concernant les essais des conditions M et F sont assimilés le plus à des essais de la condition R (16,7% de chaque). Au total, 76,4% des observations originales sont classées correctement (Tableau 61).
Les coefficients de corrélation (Tableau 62) font apparaître que cinq variables sont corrélées significativement à la fois avec le score 1 et avec le score 2. Il s'agit de la durée du premier double appui (Δnstance1) ; des instants normalisés, du début de la modification angulaire entre le bras et le tronc (tn_αd_b-t) et du pic de freinage du pied avant (tn_Amin_pv) ; du pic de freinage de l'arme (Amin_a) et de la distance entre les pieds au retour de la jambe arrière (d3). En rapprochant ces résultats des résultats contenus dans le Tableau 60 et la Figure 26, nous pouvons en conclure que lorsque l'escrimeur fait face à une :

- attaque longue (M), il présente des essais placés du côté positif du score 1 et des deux côtés du score 2 ; par conséquent, les essais face à cette condition présentent le profil moyen suivant commun : une durée des APAs courte (la valeur est négative), et pour une partie des essais, de grandes valeurs de d3, Δnstance1 et tn_Amin_pv ; pour l'autre partie, de grandes valeurs de tn_αd_b-t et de petites valeurs de Amin_a (valeurs négatives) ;
- attaque courte (F), il présente des essais placés principalement dans le cadran 1 négatif et 2 positif, par conséquent, les essais face à cette condition présentent le profil moyen suivant : de grandes valeurs de, tn_Vmax_gz, αouv_b-t, Ryn_t0, tn_Amin_a et Vmax_pr ;
- retraite (R), il présente des essais réparti principalement dans le cadran 1 négatif et 2 négatif, par conséquent, les essais face à cette condition présentent le profil moyen suivant : de grandes valeurs de Ryn_t0, tn_Amin_a et Vmax_pr (comme pour F), mais de petites valeurs de tn_Vmax_gz, αouv_b-t (à l'inverse de F).

Variables	Score discriminant de la fonction	
	1	2
d3	0. 351 (*P*=.000)	0.401 (*P*=.000)
Δnstance1	0.222 (*P*=.008)	0.321 (*P*=.000)
tn_αd_b-t	0.219 (*P*=.009)	-0.425 (*P*=.000)
Vmax_pr	-0.442 (*P*=.000)	
tn_Amin_a	-0.368 (*P*=.000)	
αouv_b-t		0.486 (*P*=.000)
Ryn_t0	-0.236 (*P*=.004)	
t-1r_yP	0.220 (*P*=.008)	
tn_Vmax_gz		0.213 (*P*=.011)
tn_Amin_pv	0.176 (*P*=.036)	0.199 (*P*=.018)
Amin_a	0.168 (*P*=.046)	-0.208 (*P*=.013)

Tableau 62 : Corrélations significatives entre les variables et les deux composantes discriminantes pour les deux sessions

Coefficients de corrélation de Pearson et valeur du P ; 1, 2 : numéro des composantes discriminantes ; en rouge : les variables qui présentent un effet distance (Manova effectuée sur l'ensemble des variables des deux sessions).

8.1.2. Résultats de la Manova pour l'effet distance

Nous détaillerons les variables qui présentent un effet distance en deux tableaux : 1) les variables qui sont présentes dans le sous-modèle, 2) les variables qui n'appartiennent pas au sous-modèle.

Variables du sous-modèle

Huit variables appartenant au sous-modèle présentent un effet distance (Tableau 63). Parmi elles, quelques événements qui se déroulent au cours du déplacement du pied avant : le début de la modification angulaire entre le bras et le tronc (tn_αd_b-t) et l'instant de survenue du pic de freinage du pied avant (tn_Amin_pv) ; et même dès le décollé du pied : αHOF_b-t. Ces événements se déroulent entre 360 et 900 millisecondes après le top de départ.

Variables	moy M - E-T	moy F - E-T	moy R - E-T	F	*P*
d3 (m)	0.61 - 0.14	0.53 - 0.12	0.41 - 0.35	28.313	0.0000
αHOF_b-t (°)	7.6 - 8.1	4.9 - 5.8	6.0 - 8.1	12.140	0.0000
Vmax_pr ($m.s^{-1}$)	2.72 - 1.02	3.25 - 0.70	3.37 - 0.68	11.592	0.0000
tn_αd_b-t (%)	48.9 - 20.2	35.6 - 23.7	50.6 - 21.0	7.474	0.0009
Δnstance1 (%)	19.3 - 7.9	18.0 - 6.2	15.1 - 5.8	7.146	0.0012
αouv_b-t (°)	5.16 - 5.02	5.77 - 11.25	0.32 - 5.21	7.068	0.0013
tn_Amin_a (%)	74.0 - 19.0	81.9 - 14.7	83.4 - 11.3	5.804	0.0040
tn_Amin_pv (%)	42.1 - 6.0	41.1 - 8.7	39.2 – 5.2	3.157	0.0466

Tableau 63 : Variables du sous-modèle présentant un effet distance (Manova)

Les variables sont classées en ordre décroissant de niveau de signification de l'effet ; moy - E-T : moyenne et écart-type pour chaque condition de distance, essais réunis des deux sessions ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; F : valeur du F ; P : niveau de signification.

Les tests Post-Hoc de Scheffé (Tableau 64) montrent que tn_Amin_pv ne présente qu'un effet global mais aucune condition de distance n'est significativement différente des autres. Pour les trois variables les plus précoces, une condition se distingue des deux autres : la condition de retraite pour Δnstance1 et la condition d'attaque courte pour tn_αd_b-t. C'est donc cette dernière (condition F) qui serait « perçue » par le sabreur aux instants les plus précoces. Néanmoins, une variable encore plus précoce distingue la condition d'attaque longue (M) des deux autres conditions, et c'est une valeur d'angle en début de mouvement, l'angle entre le bras et le tronc, αHOF_b-t. En revanche, cette durée temporelle ne semblerait pas compatible avec une boucle de rétroaction visuelle (moins de 500 ms).

Distance	M	F
F	0.007012	
R	0.918920	0.002094

variable : tn_αd_b-t
Erreur : MCe Inter = 405.01

Distance	M	F
F	0,014765	
R	0.000000	0.000058

variable : d3
Erreur : MCe Inter = 0.01758

Tableau 64 : Probabilités des Tests Post-Hoc, Test de Scheffé

F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; dl = 106

D'autres part, pour tous les autres événements qui se produisent plus tard dans le mouvement, les tests Post-Hoc montrent des différences significatives qui distinguent la condition d'attaque longue des deux autres conditions de distance, pour deux variables : l'instant normalisé du pic de freinage de l'arme (tn_Amin_a) et le pic de vitesse du pied arrière (Vmax_pr) et la condition de retraite qui se distingue des deux autres, pour une autre variable, (αouv_b-t). Enfin, une seule variable montre des différences significatives entre toutes les conditions, il s'agit de la distance entre les pieds après le déplacement du pied arrière (d3).

Variables qui ne figurent pas dans le sous-modèle

Variables	moy M - E-T	moy F - E-T	moy R - E-T	*F*	*P*
αHOF_b-ab (°)	96 - 15.1	92 - 10.8	93 - 15	14.1	0.0000
Δnrear (%)	26.1 - 6.7	28.8 - 6.2	30.6 - 4.3	11.612	0.0000
tn_TOR (%)	73.9 - 6.7	71.2- 6.2	69.4 - 4.3	11.61	0.0000
αall_b-ab (°)	6.4 - 6.3	6.7 - 7.4	2.7 - 7.5	5.904	0.0037
tn_Amin_a (%)	74.0 - 19.0	81.9 - 14.7	83.4 - 11.3	5.804	0.0041
αmax_b-ab (°)	99.2 - 15.2	95.8 - 3.4	95.1 - 14.2	5.44	0.0056
Δ_mvt (s)	0.608 - 0.077	0.638 - 0.085	0.656 - 0.089	5.05	0.0080
Vmax_pv ($m.s^{-1}$)	1.84 - 0.42	2.03 - 0.53	1.82 - 0.35	4.737	0.0107
Amax_pr ($m.s^{-2}$)	35.3 - 11.0	38.9 - 9.9	39.3 - 6.8	4.683	0.0113
Amax_pv ($m.s^{-2}$)	18.3 - 4.1	20.0 - 5.8	18.6 - 4.1	4.229	0.0170
Amin_pr ($m.s^{-2}$)	-29.8 - 12.5	-35.4 - 13.1	-34.9 - 14.7	4.206	0.0175
tn_αmax_jv (%)	59.1 - 18.0	55.6 - 16.7	50.4 - 15.0	4.117	0.0190
tr_Rzd (s)	-0.334 - 0.080	-0.352 - 0.056	-0.353 - 0.065	3.812	0.0252
Vy_t0 ($m.s^{-1}$)	0.12 - 0.08	0.14 - 0.08	0.13 - 0.08	3.671	0.0287
tn_αmax_b-t (%)	81.1 - 19.7	71.9 - 27.2	81.4 - 19.6	3.358	0.0385
t_TOF (s)	0.46 - 0.12	0.45 - 0.16	0.43 - 0.12	3.15	0.0469
tn_αmin_jv (s)	21.1 - 5.1	21.1 - 6.6	18.8 - 3.7	3.122	0.0481
t_Amax_pv (s)	0.51 - 0.12	0.50 - 0.15	0.47 - 0.11	3.108	0.0488

Tableau 65 : Autres variables présentant un effet distance (Manova)

Les variables sont classées en ordre décroissant de niveau de signification de l'effet ; moy - E-T : moyenne et écart-type pour chaque condition de distance, essais réunis des deux sessions ; F : face à une attaque courte ; M : face à une attaque longue ; R : face à une retraite ; F : valeur du F (Manova) ; P : niveau de signification.

Les autres variables qui présentent un effet distance concernent également des événements qui se produisent au cours du déplacement de la jambe avant et d'autres plus tardifs (Tableau 65). Les Tests Post-Hoc montrent que la condition M entraîne des différences significatives pour treize variables. Pour cinq d'entre elles, c'est avec la condition R (tr_Rzd, Vy_t0, tn_αmax_jv, Amax_pr, Δ_mvt). Pour cinq, c'est avec les deux autres (F et R) : tn_TOR, l'angle maximal entre le bras et l'avant-bras (αmax_b-ab) et le même angle au début du mouvement (αHOF_b-ab), tn_Amin_a, Δnrear. Pour deux variables, c'est uniquement avec la condition F : les pics d'accélération du pied arrière, (Amax_pr) et du pied avant (Amax_pr). Seule une variable présente des différences entre la condition R et les deux autres conditions : l'angle d'allongement entre le bras et l'avant-bras (αall_b-ab). Enfin, seule une variable présente des différences entre la condition R et la condition F : le pic de vitesse du pied avant (Vmax_pv).
Il s'ensuit donc que c'est la condition F qui est la moins différentiée.

8.2. EFFETS SESSION

8.2.1. Sous-modèle qui maximalise la séparation des conditions de sessions

Certaines variables permettent de distinguer la condition de session, toutes conditions de distance confondues.

Fonction	Valeur propre	% de la variance	% cumulé	Corrélation canonique
1	1.270	100	100	0.748

Tableau 66 : Valeur propre de la première fonction discriminante canonique (discrimination de la session)

Pourcentage de la variance expliqué par chaque composante discriminante et pourcentage cumulé. Le R^2 est la valeur de la corrélation canonique au carré.

Test des fonctions	Lambda de Wilks	Khi-deux	ddl	Signification
1	0.578	73.375	10	0.000

Tableau 67 : Lambda de Wilks et niveau de signification (discrimination de la session)

Le Tableau 66 montre qu'en prenant ce sous-ensemble, le pouvoir discriminant associé à la première composante est de 0,42. Pour cette fonction discriminante, le score est significatif (Tableau 67).

Variables	1
Δnstance1	0.606
Amin_pr	-0.469
Vmax_pr	0.508
tn_Vmax_gy	-0.462
αHOF_b-t	0.854
tn_αmax_b-t	0.273
yP_t0	3.370
yP_t1	-1.540
t_Vmax_pv	0.824
αHCF_t-v	-1.220
yPr_t0	-1.740
αHOF_j	-0.852
αTCR_t-v	1.111
αHOF_t-v	-1.031
tr_Rzd	0.301
tn_Vmin_gz	-0.247

Tableau 68 : Coefficients des fonctions discriminantes canoniques standardisées (discrimination de la session)

Les variables sont présentées dans l'ordre d'apparition dans le sous-modèle, légende dans le texte ci-dessous ; en rouge : les variables qui présentent un effet session (Manova effectuée pour l'ensemble des essais des trois conditions de distances).

Le sous-modèle issu de l'AFD pas à pas comporte seize variables. L'analyse ne fournit qu'une fonction discriminante. Ces variables sont : les instants normalisés de survenue, du pic de vitesse antéropostérieur du CoM (tn_Vmax_gy), du pic de descente du CoM (tn_Vmin_gz), de l'angle maximal entre le bras et le tronc (tn_αmax_b-t) ; les instants de survenue, des pics de vitesse du pied avant (t_Vmax_pv), du début relatif de la variation de la force de réaction verticale (tr_Rzd) ; la durée normalisée du premier double appui

(Δnstance1) ; les valeurs des pics, de vitesse du pied arrière (Vmax_pr), et de freinage (Amin_pr) ; l'angle tronc-verticale à trois instants différents (αHOF_t-v, αHCF_t-v, αTCR_t-v), l'angle de la jambe au début du mouvement (αHOF_j) et l'angle bras-tronc au début du mouvement (αHOF_b-t) ; enfin, le déplacement antéropostérieur du centre des pressions à deux instants différents (yP_t0 ainsi que la valeur normalisée yPr_t0, puis à l'instant suivant yP_t1).
Le Tableau 68 présente les coefficients affectés à chaque variable du sous-modèle pour la combinaison linéaire définissant la composante discriminante.
La moyenne de la session avec incertitude est située du côté positif du score et la moyenne de la session avec certitude du côté négatif (Tableau 69).

Session	Fonction 1
U	1.103
C	-1.135

Tableau 69 : Fonctions aux barycentres des groupes (discrimination de la session)

U : session avec incertitude ; C : session avec certitude ; fonctions discriminantes canoniques non standardisées évaluées aux moyennes des groupes.

	Distance	Classe d'affectation prévue U	C	Total
Effectifs	U	64	6	70
	C	10	62	72
	Obs n.c.	0	2	2
%	U	91.4	8.6	100
	C	13.9	86.1	100
	Obs. n.c.	0	100	100

Tableau 70 : Résultats du classement (discrimination de la session)

U : session avec incertitude ; C : session avec certitude ; effectifs : nombre d'essais originaux par condition ; classes d'affectation prévue : si tous les essais originaux étaient classés correctement, le nombre d'essais indiqué dans la classe prévue serait égal au même nombre, si un chiffre apparaît dans une autre classe, cela signifie que ces essais présentent (d'après les variables constituant le sous-modèle) des caractéristiques plus proches de cette classe que de sa classe d'origine ; obs. n. c. : observations non classées, ces observations sont exclues de l'estimation des fonctions discriminantes ; % : effectifs par classe en pourcentage du total des effectifs de la classe originale.

Ce sont les essais de la session C (en situation avec certitude) qui présentent le plus d'incursion dans l'autre classe d'affectation : 13.9 % affectés à la classe U (en situation avec incertitude). Les deux mêmes essais que plus haut ne sont pas classés parce qu'ils présentent des valeurs manquantes pour certaines variables. Au total, 88,7 % des observations originales sont classées correctement (Tableau 70).
Les coefficients de corrélation (Tableau 71) rapprochés des résultats contenus dans le Tableau 69 nous permettent de conclure que, lorsque l'escrimeur est dans une situation :

- d'incertitude (U), il présente des essais placés du côté positif du score 1 ; par conséquent avec le profil moyen suivant, une durée du premier double appui longue, un instant relatif du début de la variation de la force de réaction verticale plus proche du début du mouvement volontaire (valeur négative) et une grande vitesse du pied arrière, des instants normalisés de survenue des pics d'accélération

de la vitesse antéropostérieur du CoM et de descente du CoM précoces et enfin, une grande valeur du pic de freinage du pied arrière (valeur négative) ;

- de certitude (C), il présente des essais placés du côté négatif du score 1, par conséquent avec le profil moyen inverse du précédent.

Variables	Fonction 1
Amin_pr	-0.407 (*P* = 0.000)
Δnstance1	0.397 (*P* = 0.000)
Vmax_pr	0.341 (*P* = 0.000)
tn_Vmax_gy	-0.259 (*P* = 0.002)
tr_Rzd	0.216 (*P* = 0.009)
tn_Vmin_gz	-0.199 (*P* = 0.017)

Tableau 71 : Corrélations significatives entre les variables et la composante discriminante pour les deux sessions

Coefficients de corrélation de Pearson et valeur du P ; 1 : composante discriminante ; en rouge : les variables qui présentent un effet session (Manova effectuée sur l'ensemble des variables des trois conditions de distance).

8.2.2. Résultats de la Manova pour l'effet session

Nous détaillerons les variables qui présentent un effet session en deux tableau : 1) les variables qui sont présentes dans le sous-modèle, 2) les variables qui n'appartiennent pas au sous-modèle.

Variables du sous-modèle

Variables	moy U - E-T	moy C - E-T	*F*	*P*
Amin_pr	-37.7 - 10.1	-29.1 - 15.2	23.519	0.0000
Δnstance1	19.5 - 6.3	15.5 - 6.9	18.797	0.0000
tr_Rzd	-0.171 - 0.044	-0.191 - 0.069	17.123	0.0000
Vmax_pr	3.3 - 0.7	2.9 - 1.0	14.071	0.0003
yP_t1	-0.279 - 0.026	-0.273 - 0.027	8.280	0.0049
αHOF_t-v	4.8 - 3.9	5.3 - 3.3	8.032	0.0055
αHOF_b-t	6.7 - 7.8	5.6 - 7.1	7.633	0.0068
tn_Vmax_gy	72.4 - 22.7	77.2 - 13.6	7.210	0.0084
αHCF_t-v	7.2 - 4.7	8.0 - 4.6	5.356	0.0226
tn_Vmin_gz	38.0 - 8.5	40.8 - 9.5	4.962	0.0280

Tableau 72 : Variables du sous-modèle présentant un effet session (Manova)

Les variables sont classées en ordre décroissant de niveau de signification de l'effet ; moy - E-T : moyenne et écart-type pour chaque session, essais réunis des trois conditions de distance ; U : session en condition avec incertitude ; C : session en condition avec certitude ; F : valeur du F (Manova) ; P : niveau de signification.

Dix variables appartenant au sous-modèle présentent un effet session (Tableau 72). Trois sont des événements qui se produisent au cours des APAs : l'instant relatif d'apparition du début des variations de la force de réaction verticale (tr_Rzd) et les valeurs d'angle mesurés à l'instant du décollé du talon avant, entre le bras et le tronc (αHOF_b-t) et entre le tronc et la verticale (αHOF_t-v). On trouve aussi les instants normalisés et de survenue du pic de vitesse antéropostérieure du CoM (tn_Vmax_gy) et du pic de descente du CoM (tn_Vmin_gz) ; le pic de vitesse du pied arrière (Vmax_pr), le pic de freinage du même

pied (Amin_pr) ; la durée du premier double appui (Δstance1), le déplacement du centre des pressions à l'instant de la reprise de contact du pied avant (yP_t1) et l'angle entre le tronc et la verticale au même instant (αHCF_t-v).

Variables n'appartenant pas au sous-modèle

Quinze variables n'appartenant pas au sous-modèle présentent un effet session, toutes conditions de distance confondues (Tableau 73). Parmi elles, six sont des événements qui se produisent au cours des APAs : l'instant de survenue des variations de la force sur l'axe antéropostérieur (tr_Ryd), la valeur normalisée des forces de réaction verticale et antéropostérieure au début des variations dynamiques (Rzn_t0, Ryn_t0), la valeur de la vitesse antéropostérieure au même instant (Vy_t0), la valeur d'angle entre le bras et le tronc et l'avant-bras (αHOF_b-ab) mesurés à l'instant du décollé du talon avant et la durée des APAs (t-1r_t0).

Variables	moy U - E-T	moy C - E-T	*F*	*P*
tn_HCF (%)	51.83 - 5.7	56.2 - 7.4	20.340	0.0000
Amax_pr ($m.s^{-2}$)	40.5 - 8.4	35.2 - 9.9	19.371	0.0000
αHOF_b-ab (°)	94.8 - 13.7	92.5 - 13.9	18.560	0.0000
tr_Ryd (s)	-0.134 - 0.04	-0.157 - 0.06	17.123	0.0000
Δnfront (%)	40.3 - 6.7	45.0 - 9.7	12.364	0.0006
Vy_t0 ($m.s^{-1}$)	0.116 - 0.07	0.141 - 0.08	8.735	0.0038
Rzn_t0 (x Poids)	-0.127 - 0.74	-0.102 - 0.08	7.677	0.0066
Ryn_t0 (x Poids)	0.226 - 0.03	0.238 - 0.02	7.400	0.0076
yPn_t1 (%)	-0.249 - 0.03	-0.244 - 0.02	7.460	0.0074
tr_Ryf- (s)	0.559 - 0.07	0.602 - 0.17	6.018	0.0158
tn_Vmax_gz (%)	74.2 - 6.4	76.7 - 8.7	5.460	0.0214
tn_Amin_pv (%)	39.7 - 4.8	41.9 - 8.3	5.223	0.0243
t-1r_yP (s)	-0.125 - 0.04	-0.138 - 0.05	4.960	0.0281
d1 (m)	0.86 - 0.07	0.89 - 0.11	4.320	0.0402
αTOR_t-v (°)	6.7 – 5.3	7.6 - 5.3	4.307	0.0404

Tableau 73 : Autres variables présentant un effet session (Manova)

Les variables sont classées en ordre décroissant de niveau de signification de l'effet ; moy - E-T : moyenne et écart-type pour chaque session, essais réunis des trois conditions de distance ; U : session en condition avec incertitude ; C : session en condition avec certitude ; F : valeur du F ; P : niveau de signification.

En situation avec incertitude (U), le sabreur présenterait une durée des APAs plus courte, une posture du tronc un peu moins penchée à tous les instants de la première marche, un bras plus ouvert et plus éloigné du tronc, un déplacement du pied avant moindre (d1) dans une durée plus courte et atteindrait son maximum de vitesse du CoM vers le bas et vers le haut plus tôt dans le mouvement (tn_Vmin_gz, tn_Vmax_gz). En revanche, cette organisation, au cours du déplacement du pied avant, permettrait d'atteindre des pics de vitesse, d'accélération et de freinage du pied arrière plus importants (Vmax_pr, Amax_pr et Amin_pr).

Tous les instants (qu'ils soient comptés à partir, du signal de départ, t, du lever du pied avant, r, ou normalisés sur la durée totale du mouvement, n) sont plus précoces pour la session avec incertitude que celle avec certitude, et les durées mesurées au cours des APAs, plus longues. Aucune des variables qui concernaient le sabre ou les angles de la jambe avant ne présentent d'effet session.

8.3. EFFETS CROISES DISTANCE-SESSION

		F	*P*
Chronologie des appuis	t_HOF	5.184	0.0071
	t_TOF	6.873	0.0016
	tn_TOF	3.273	0.0418
	t_O2	5.320	0.0063
	Δtr	6.873	0.0016
Evénements liés aux appuis	d3	12.772	0.0000
	t_Amax_pv	4.988	0.0085
	t_Amin_pv	3.327	0.0397
	Amax_pr	6.411	0.0024
	Vmax_pr	4.698	0.0111
Evénements segmentaires	tn_Vmax_a	4.158	0.0183
	tn_αd_b-t	3.245	0.0429
	tn_αmax_b-t	3.896	0.0233
	t_αmin_jv	4.967	0.0087
	αHOF_b-ab	4.780	0.0103
	αouv_b-t	5.508	0.0053
APA's	t0_yP	5.698	0.0045
Evénements liés au CoM	tr_Rymax	3.491	0.0340
	tr_Ryd-	4.305	0.0016
	tr_Vymax	3.263	0.0422
	Vy_max	3.319	0.0400
	tr_Rzd	3.192	0.0450

Tableau 74 : Variables présentant un effet croisé distance-session

En rouge : variables présentant des t significatifs dans les Post-hoc.

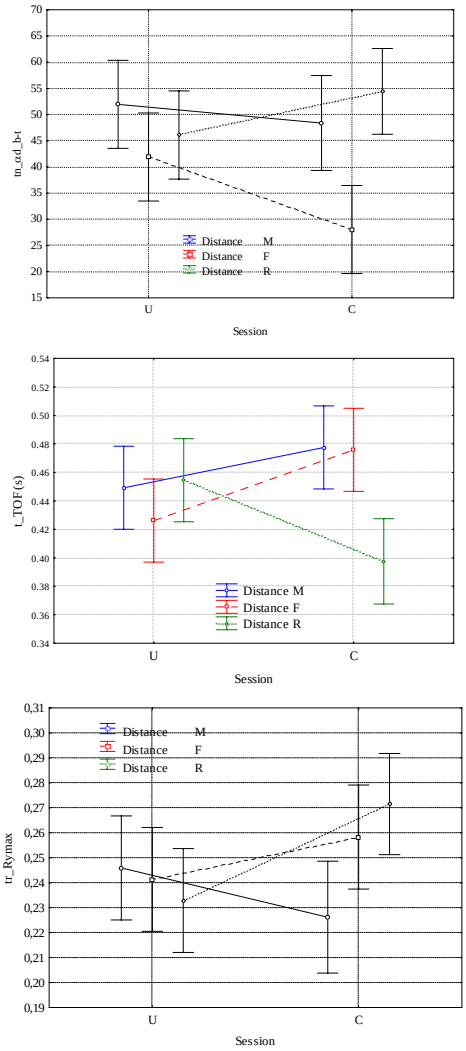


Figure 27 : Comparaison de variables temporelles selon les conditions et les sessions

tn_αd_b-t : début de la variation angulaire entre le bras et le tronc ; t_TOF : lever de la pointe avant ; tr_Rymax : instant relatif du pic de la force de réaction antéropostérieure ; U : session avec incertitude ; C : session avec certitude ; les traits verticaux représentent 95% de l'intervalle de confiance.

Les résultats de l'Anova montrent des effets croisés pour un certain nombre de variables. L'effet croisé distance-session signifie que des paramètres prennent des valeurs qui varient selon les distances mais différemment selon la session.

Parmi ces variables, on trouve majoritairement des variables de temps, du signal de départ ou normalisés (selon la durée de la marche, n, ou relatif à partir du début du mouvement volontaire, r). Certains instants semblent trop précoces pour être compatibles avec une adaptation du mouvement après prise d'information sur le déplacement de l'adversaire, *e.g.* le décollement du talon avant visible d'après les images vidéo (t_HOF vers 0,378 seconde en moyenne).

Les variables qui présentent un effet croisé distance-session peuvent être classées selon cinq grandes catégories : 1) la chronologie des appuis dans laquelle on ne retrouve que des déplacements concernant le pied avant ; 2) les événements liés aux appuis avec des instants de survenue de pic d'accélération concernant le pied avant et des amplitudes de pic concernant le pied arrière ; 3) les événements segmentaires liés principalement à l'angle bras-tronc ; 4) les APAs avec la valeur du déplacement du centre des pressions au début du mouvement volontaire ; 5) les événements liés au centre de masse, principalement des instants relatifs (Tableau 74).
Les tests Post-hoc montrent des différences significatives principalement entre la distance M (lorsque le sabreur fait face à une attaque longue) et la distance R (lorsque le sabreur fait face à une retraite) dans la session avec certitude. Les valeurs prises par les variables au cours de la condition F sont souvent intermédiaires entre les valeurs des deux autres conditions. Les résultats montrent également que les valeurs des variables sont très similaires pour toutes les conditions de distance dans la session avec incertitude, alors qu'elles présentent une grande dispersion dans la session avec certitude. Ce résultat est vrai pour des variables temporelles (Figure 27), que ces instants soit précoces ou tardifs (*e.g.* moyennes de tous les essais, respectivement pour le début de la variation de la force de réaction verticale, le lever de la pointe de pied avant et le début de la variation angulaire entre le bras et le tronc : 0,286 s ; 0,447 s ; 0,665 s). Ce résultat est vrai également pour des variables d'amplitude (Figure 28), *e.g.* le pic de vitesse du pied arrière, l'angle d'ouverture totale entre le bras et le tronc, l'écart entre les pieds après le reposé du pied arrière.

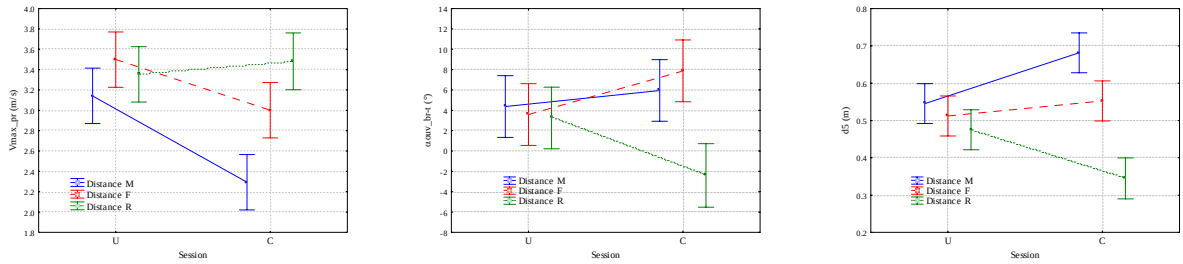


Figure 28 : Comparaison de variables d'amplitude selon les conditions et les sessions

Vmax_pr : pic de vitesse du pied arrière ; αouv_b-t : angle d'ouverture totale entre le bras et le tronc ; d3 : écart entre les pieds après le reposer du pied arrière ; U : session avec incertitude ; C : session avec certitude ; les traits verticaux représentent 95% de l'intervalle de confiance.

8.4. EFFETS SUJET

Les sabreurs présentent une assez grande variabilité interindividuelle. En conséquence, la plupart des variables montrent un effet sujet (Manova). Néanmoins, il est intéressant de noter que six variables ne présentent aucun effet sujet (y compris en effet croisé) et que sept variables, à l'inverse, présentent uniquement un effet sujet et aucun effet distance ou session.

8.4.1. Variables présentant seulement un effet sujet

Ces variables sont quatre variables de temps (relatifs ou normalisés) et trois variables d'amplitudes (Tableau 75).
Les temps normalisés sont les instants d'apparition des vitesse et accélération maximales du pied avant (tn_Amax_pv, de 15% à 23% ; tn_Vmax_pv, de 27 à 36%). Les temps relatifs sont les instants de poser du pied avant (t1r_yP, de 200 à 257 ms) et de lever du pied arrière (t2r_yP, de 356 à 457 ms) mesurés d'après le déplacement du CoP et, ceci à partir du début des phénomènes dynamiques. Les trois amplitudes sont le pic de freinage du sabre (Amin_a, de -22 à -5,6 $m.s^{-2}$), la vitesse verticale du CoM à l'instant du lever du pied avant (Vz_t0, de -0,005 à 0,070 $m.s^{-1}$) et l'angle maximal entre le bras et le tronc (αmax_b-t, de 4° à plus de 24°).

Sujet	tn_Amax_pv moy (%),E-T	tn_Vmax_pv moy (%),E-T	t1r_yP moy (s),E-T	t2r_yP moy (s),E-T	αmax_b-t Moy (°),E-T	Amin_a moy ($m.s^{-2}$),E-T	Vz_t0 moy ($m.s^{-1}$),E-T
S1	18.4, 4.7	34.4, 7.8	0.257, 0.073	0.415, 0.065	4.6, 3.9	-5.7, 5.0	-0.040, 0.027
S2	16.8, 3.4	30.6, 9.2	0.200, 0.028	0.401, 0.037	3.9, 3.5	-5.6, 4.1	-0.036, 0.033
S3	20.8, 7.5	35.9, 14.2	0.202, 0.055	0.356, 0.052	10.7, 5.1	-22.1, 12.4	-0.077, 0.030
S4	16.8, 2.8	28.7, 3.4	0.233, 0.039	0.457, 0.114	6.7, 1.4	-7.0, 3.1	-0.005, 0.021
S5	22.9, 3.3	34.6, 3.6	0.234, 0.038	0.370, 0.046	24.4, 14	-14.3, 31.7	0.070, 0.123
S6	15.0, 3.6	26.8, 4.4	0.225, 0.067	0.401, 0.091	8.2, 6.1	-7.7, 8.2	-0.014, 0.022
Ts	18.4, 5.2	31.8, 8.5	0.225, 0.055	0.400, 0.078	9.7, 9.8	-10.4, 15.6	-0.017, 0.071

Tableau 75 : Valeurs par sujets des variables ne présentant qu'un effet sujet (Manova)

Pour toutes les conditions de distance et les deux sessions ; moy : moyenne ; E-T : écart-type ; Ts : valeurs moyennes et écart-types de tous les sujets ; pour les autres légendes voir le texte ci-dessus.

Ces résultats suggèrent qu'il existe des structures du geste qui sont individualisées. Ainsi, la relation que l'on retrouve chez le plus de sabreurs est la relation positive entre l'instant où ils posent le pied avant (t1) et l'instant où ils lèvent le pied arrière (t2). Cette relation existe pour quatre sabreurs sur six et est très forte (Figure 29), *e.g.* sujet 6 pour lequel les instants sont bien corrélés *vs* sujet 2 pour lequel il n'existe aucune corrélation. Pour l'ensemble des essais de tous les sabreurs cumulés, le coefficient de corrélation reste significativement positif ($r = 0{,}618$; $P = 0{,}000$) indiquant que, statistiquement, le « timing » des changements d'appuis est établi et propre à chaque sabreur. Une autre forte corrélation, mais plus triviale, existe entre les instants normalisés d'apparition des pics de vitesse et d'accélération du pied avant. Les autres corrélations concernent principalement deux variables : l'angle maximum entre le bras et le tronc, qui est corrélé à quatre variables et l'instant du lever du pied arrière, aussi en relation avec quatre variables. Néanmoins, ces corrélations présentent un coefficient moins important et concernent individuellement que deux, voire trois, sujets sur six.

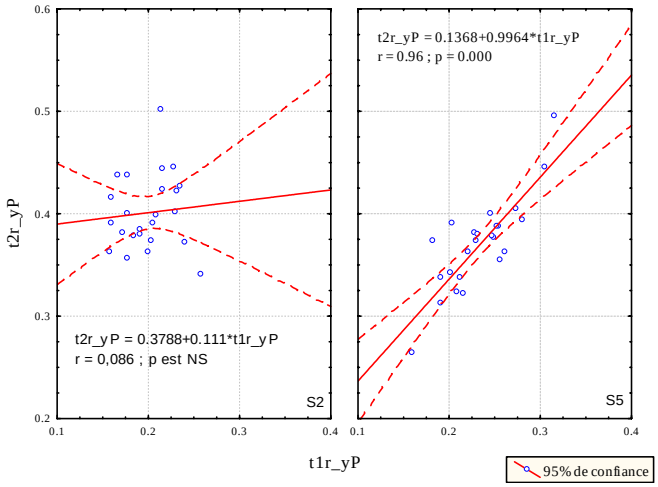


Figure 29 : Relation entre l'instant du poser avant et l'instant du lever arrière

Exemple pour les sujets 2 et 6 ; t1r_yP : instant relatif du poser du pied avant ; t2r_yP : instant relatif du lever du pied arrière ; lignes rouges : droite de régression (équation de la droite donnée sous la forme y = b+ax) et intervalle de confiance à 95% ; r : coefficient de corrélation ; P : niveau de signification.

Dans la majorité des cas, lors de la session avec incertitude la valeur des variables se rapproche fortement d'une des conditions avec certitude. Cette condition « préférentielle » diffère selon les sujets. Par exemple, pour la durée du premier pas (t1r_yP), les sujets 3 et 5 produisent des valeurs très similaires dans les deux sessions face à une attaque courte (F), alors que le sujet 2 produit une réponse semblable face à une retraite. Il en est de même pour les autres variables (Figure 30).

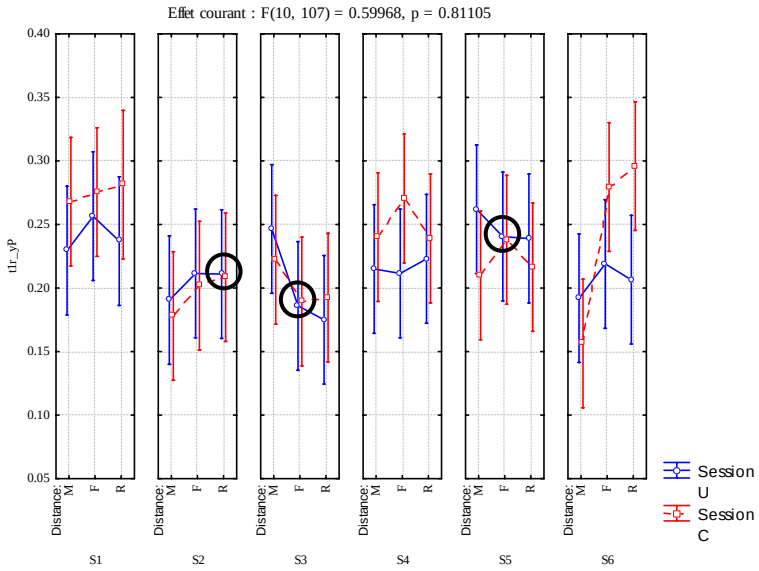


Figure 30 : Valeurs moyennes de la durée du premier pas

Instants relatifs à partir du signal d'exécution ; distance face à, M : une attaque longue ; F : une attaque courte ; R : une retraite ; Session U : avec incertitude ; C : avec certitude ; S : sujet ; les traits verticaux représentent l'intervalle de confiance à 95%, les cercles mettent l'accent sur les valeurs similaires.

8.4.2. Variables ne présentant aucun effet sujet

A l'inverse, six variables ne présentent aucun effet sujet, même en effet croisé avec l'effet distance et/ou session. Il s'agit de trois temps normalisés, de deux pics de vitesse et de l'angle d'ouverture entre le bras et le tronc (Tableau 76).
Nous avons cherché à savoir s'il existait des relations « stables », *i.e.* quel que soit le sujet, la distance ou la certitude/incertitude, entre ces variables. A cette fin, nous nous sommes intéressés à la matrice des coefficients de corrélation pour l'ensemble des essais.

	Vmax_gz	tn_Vmax_pr	tn_Vmax_a	Vmax_a	tn_Amin_pr
tn_Vmax_pr	-0.65				
tn_Vmax_a	0.02	0.28			
Vmax_a	0.64	-0.47	-0.01		
tn_Amin_pr	-0.21	0.72	0.31	0.04	
αouv_b-t	0.03	0.08	-0.28	0.02	0.09

Tableau 76 : Matrice des coefficients de corrélation entre les variables ne présentant pas d'effet sujet (Manova)
Corrélations significatives marquées à P < .05000 N=143 ; tn : temps normalisé en pourcentage de la durée du mouvement ; V : vitesse ; A : accélération ; max : pic ; gz : centre de masse selon l'axe z ; pr : pied arrière ; a : arme ; αouv_b-t : angle de l'ouverture entre le bras et le tronc au cours du mouvement.

Deux parties segmentaires du corps sont concernées : le pied arrière (pr) et le sabre (a) avec le bras armé (αouv_b-t).
La plus forte corrélation trouvée concerne la relation entre l'instant normalisé du pic de vitesse du pied arrière et l'instant normalisé de son pic de freinage (Figure 31). Il faut remarquer que tous ces événements sont assez tardifs dans le mouvement et que tous les instants sont des instants normalés.

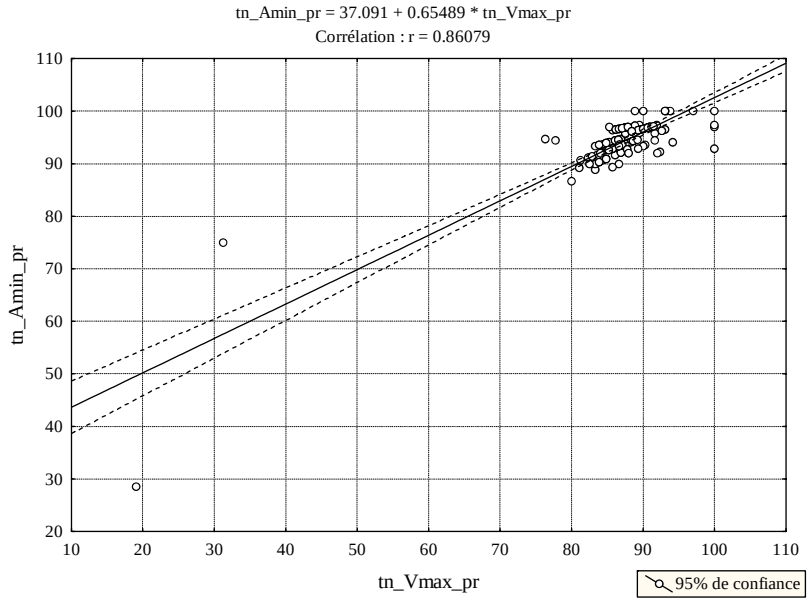


Figure 31 : Relation entre les instants normalisés des pics de vitesse et de freinage du pied arrière

Nous avons effectué une Analyse en Composantes Principales avec ces six variables en variables actives. Nous observons d'ores et déjà sur la matrice des corrélations (Tableau 76) que la plupart des variables présentent une corrélation significative avec trois, voire quatre autres variables, sauf αouv_b-t.

Variables	Composantes		
	1	2	3
Vmax_gz	**-0.79**	-0.42	0.15
tn_Vmax_pr	**0.95**	-0.12	0.16
tn_Vmax_a	0.31	**-0.73**	-0.32
Vmax_a	-0.64	-0.54	0.35
tn_Amin_pr	0.64	-0.54	0.43
αouv_b-t	0.024	0.32	**0.85**

Tableau 77 : Coordonnées des points variables sur les trois premiers axes factoriels de l'ACP3

Variables actives, Vmax : pic de vitesse, gz : tn : temps normalisé ; pr : jambe arrière ; a : arme ; Amin : pic de freinage ; αouv_b-t : angle d'ouverture entre le bras et le tronc.

L'Analyse en Composantes Principales (ACP3) montre trois composantes principales (ou axes factoriels) qui résument 84% de la variance (Tableau 77). La première composante (41% de la variance) est majoritairement représentée par le pic de vitesse verticale du centre de masse et l'instant d'apparition normalisé du pic de vitesse du pied arrière. La seconde composante (23% de la variance) est majoritairement représentée par l'instant d'apparition normalisé du pic de vitesse de l'arme et la troisième composante (20% de la variance) est majoritairement représentée par l'angle d'ouverture totale entre le bras et le tronc. Le pic de vitesse de l'arme et l'instant normalisé d'apparition du pic de freinage du pied arrière contribuant principalement aux deux premières composantes principales.

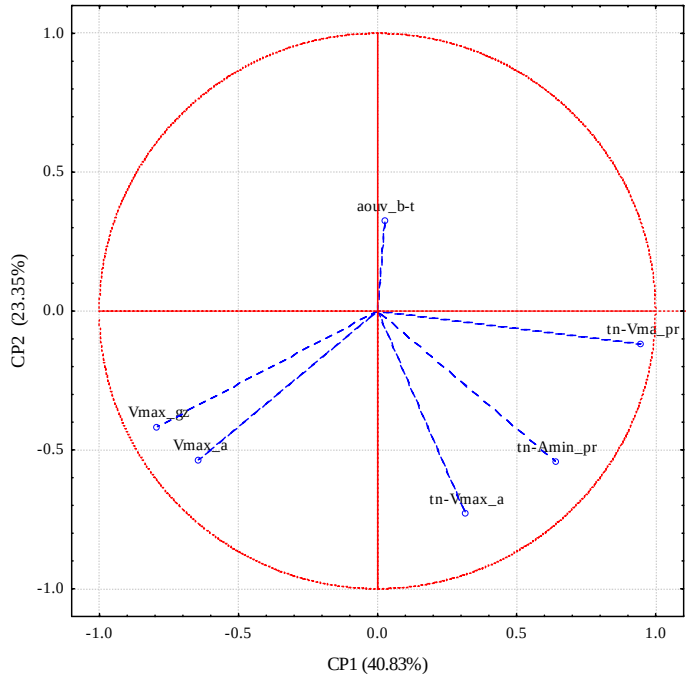


Figure 32 : Cercle des corrélations dans le plan des deux premières composantes principales (ACP3)

La représentation des variables sur le cercle des corrélations dans le plan des deux premières composantes principales (Figure 32) illustre bien que les pics de vitesse maximales s'opposent sur la première composante (côté négatif), avec les temps normalisés (côté positif) mais que l'angle d'ouverture entre le bras et le tronc constitue quasiment à lui seul la troisième composante.

Les cartes factorielles issues de cette analyse (Figure 33) montrent que les essais des différentes conditions de distance ne se distribuent pas selon des cadrans spécifiques du premier plan factoriel.

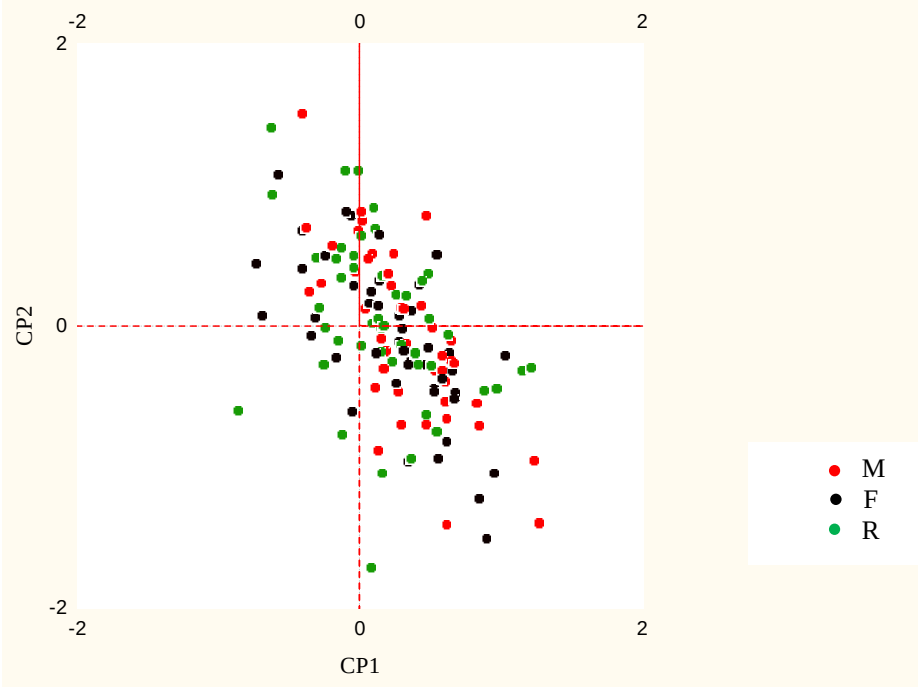


Figure 33 : Carte factorielle issue de l'ACP3 dans le premier plan factoriel

R : condition de retraite ; M : condition d'attaque longue ; F : condition d'attaque courte.

9. DISCUSSION

9.1. INFORMATIONS FOURNIES AU SABREUR PAR UN ADVERSAIRE EXPERT

De nombreuses études ont utilisé des cibles fixes pour analyser le comportement de l'escrimeur et les différentes conditions expérimentales étaient appliquées par le sujet lui-même (Moreaux et al., 1987). Dans notre étude, nous voulions rester au plus près des conditions réelles de la pratique sportive. Donc, 1) conserver la dimension « duelle » de l'activité ; 2) analyser le comportement de l'escrimeur dans la dimension adaptation du mouvement au cours de sa réalisation. L'adversaire était alors le « complice » de l'expérimentateur qui appliquait le protocole expérimental. Nous avons du vérifier, *a postériori,* si le complice effectuait bien les séquences motrices de manière reproductibles, avant d'étudier le sabreur lui-même. De ce fait, il faut se rappeler que lorsqu'on nomme les conditions de distance, c'est toujours l'adversaire complice qui effectue cette distance et que le sabreur que nous étudions fournit toujours une séquence motrice qui reste « libre », *e.g.* la condition R impose à l'adversaire d'effectuer une marche-retraire et le sabreur étudié sera vraisemblablement amené à effectuer une séquence motrice produisant une grande distance de déplacement pour aller le « toucher ». Pour mettre en avant des résultats quant à l'adaptation du sabreur au cours de sa première marche, nous devions voir, au préalable, si des informations étaient effectivement fournies par l'adversaire complice dans un temps compatible avec une boucle de rétroaction visuelle (Sekuler et al., 1990).

La première partie de cette étude portant sur l'adversaire cible a permis de montrer que, 1) l'expert est capable d'effectuer des séquences motrices appartenant à son répertoire de base dans une géométrie corporelle et un timing reproductibles, ce qui confirme les résultats de Brindle et al. en 1999 et, 2) dès 175 ms à partir du début du mouvement ou dès 315 ms à partir du signal de départ (s'il réagit immédiatement à ce signal) des informations étaient fournies au sabreur quant à la distance du premier mouvement qu'il initie, *i.e.* dès la première marche. Une géométrie du corps penché vers l'avant et une jambe très pliée pourraient être le signe d'une attaque courte. Si la posture est plus érigée, le sabreur pourra déterminer, d'après la durée de la marche, s'il va devoir faire face à une attaque longue (durée de la marche courte) ou à une retraite (durée de la marche longue). Ces résultats permettent de valider le protocole mis en place.

Les moyens techniques qui étaient à notre disposition, ne nous ont pas permis d'effectuer une analyse en trois dimensions de cet adversaire expert, il faut donc noter que les marqueurs informationnels que nous avons trouvés sont déterminés dans le plan sagittal. Il faudra s'assurer que le sabreur qui l'observe dans le plan frontal peut les percevoir et s'il n'en existe pas d'autres dans cette dimension qui ne seraient pas dévoilés dans notre étude. De même, il restera à vérifier qu'elles sont les performances visuelles des sabreurs.

9.2. RESULTATS QUALITATIFS

La seconde partie qui porte sur la simple comptabilité, après codage, du type de séquence effectuée par le sabreur dans les différentes conditions expérimentales, a confirmé que le sabreur a bien perçu, dès la fin de la première marche, qu'elle doit être la distance couverte par cette séquence pour être adaptée à celle de l'adversaire : il adopte une attaque longue de manière systématique face à ce qui sera une retraite, et en situation d'incertitude, il adopte une attaque courte face à ce qui sera une attaque courte ou longue. Lorsque le sabreur connaît l'intention de l'adversaire, son type d'enchaînement diffère peu. Les différences relevées en situation de certitude (*vs* incertitude) sont : 1) une augmentation des « sauts » et des « attentes », qui sont deux types d'intentionnalités différentes mais basées toutes les deux sur la possibilité qui est donnée au sabreur d'anticiper : soit il devance résolument l'adversaire, soit il « prend » le temps d'affiner sa stratégie ; 2) lorsqu'il sait qu'il va faire face à une attaque longue, il peut prendre le risque de lancer aussi une attaque longue, alors qu'il initiait uniquement une attaque courte en situation d'incertitude. Ces résultats nous portent à poser les deux hypothèses suivantes :

- en situation de certitude, le sabreur peut débuter plus tard sa séquence mais la programmer entièrement ;
- en situation d'incertitude, les réponses qui sont très semblables à celles en certitude, montrent que le sabreur serait capable d'adapter sa séquence en cours d'exécution.

9.3. ORGANISATION DU SABREUR EN CONDITION AVEC INCERTITUDE

En situation d'incertitude, qui est la situation « naturelle » de l'activité, le sous-modèle issu de l'analyse statistique en composantes discriminantes comporte assez peu de variables (quatorze), et neuf d'entre elles seulement sont corrélées aux composantes discriminantes. Ces neuf variables (parmi celles étudiées) seraient les plus susceptibles de fournir de l'information à l'adversaire quant à la distance de la séquence motrice initiée. Aucune variable caractérisant les APAs ne fait partie de ces neuf variables. Ce résultat très important, renforce l'hypothèse d'un début de mouvement programmé (Zattara et Bouisset, 1986) et d'une adaptation au cours de la marche. En effet, si la marche entière était programmée, aucune variable, distinguant les conditions de distance, n'apparaitrait. Or, un sous-modèle émerge bien.

En se focalisant principalement sur les neuf variables corrélées avec le score des composantes discriminantes, un profil apparaît qui a été décrit précédemment dans la section résultat (réf. paragraphe 6.7).

Nous pouvons donner des conclusions encore plus affinées en rapprochant les résultats de l'analyse discriminante et les résultats des t de Student effectués entre les valeurs prises par les variables lorsque l'escrimeur fait face aux différentes conditions (réf. paragraphes 6.2 à 6.6). En effet, le modèle fournit un sous-ensemble de variables qui semble montrer une structure particulière de relation entre elles, structure cohérente pour l'ensemble des essais d'une même condition. Le test t de Student, montre qu'une variable prise isolément

des autres, présente des valeurs moyennes qui différent d'une condition à une autre. Cinq variables qui appartiennent à la fois au sous-modèle, sont aussi corrélées avec le score d'au moins une composante discriminante et montrent également une différence significative entre ses valeurs prises dans au moins deux conditions. Deux de ces variables sont particulièrement intéressantes : le pic de vitesse du pied avant parce que c'est l'événement le plus précoce parmi ces cinq variables et, la durée de déplacement du pied arrière parce qu'elle présente des différences significatives pour les trois conditions. Ainsi, dès 30% du mouvement, ou dès 570 ms après le signal de départ, l'escrimeur a pu déterminer s'il faisait face à une attaque longue ou courte. Dans le cas d'une attaque longue de l'adversaire, les résultats montrent que le sabreur présente une vitesse du pied avant faible. Ce comportement est bien adapté, puisque lui-même devra effectuer une attaque courte, voire une retraite pour toucher sans être touché par un adversaire qui rompt clairement la distance qui les sépare. Dans le cas d'une attaque courte de l'adversaire, le sabreur déplace son pied avant avec les valeurs de vitesse les plus élevées. En revanche, il semble, qu'à ce stade du mouvement, l'escrimeur soit dans l'incapacité de percevoir qu'il va devoir faire face à une retraite. Le comportement de l'escrimeur dans les millisecondes qui suivent les 500 premières millisecondes de sa marche, semble devoir s'adapter avec encore une certaine prudence. En effet, la situation la plus à risque serait de s'engager « franchement vers l'avant ». En revanche, au cours du déplacement du pied arrière, l'escrimeur distingue les trois conditions de distance effectuées par l'adversaire : lorsque l'adversaire effectue une retraite (condition R), l'escrimeur, devant « aller le chercher », déplace son pied arrière pendant une durée importante (les valeurs d'écart inter-pieds avaient montrés par ailleurs que le pied arrière se rapprochait davantage du pied avant dans ces conditions là, (réf. paragraphe 6.5). Nous trouvons les résultats contraires lorsque l'escrimeur doit faire face à une attaque longue. Les résultats pour l'attaque courte étant intermédiaires. Ainsi, les résultats confirment que, après le premier double appui (entre 800 et 900 ms après le signal de départ), l'intention de l'adversaire semble perçue et « traitée » avec pertinence puisque la réponse de l'escrimeur est adaptée en termes de distance. Le sous-modèle montre que la durée du déplacement du pied arrière pourrait déterminer la durée totale du mouvement de la première marche. Si le mouvement est plus long lorsque l'escrimeur doit effectuer un grand déplacement (face à une retraite de l'adversaire), son intention « d'attaquer » semble se concrétiser par un pic de vitesse de l'arme qui survient plus tôt dans le mouvement, même si sa valeur est moindre (Tableau 23 et Tableau 29). Le seul événement tardif qui distingue d'être face à une attaque longue ou courte, est l'instant de survenue du pic de freinage. Celui-ci apparaît plus tôt dans le premier cas et plus tard dans le second. Ainsi, c'est face à l'attaque longue que l'escrimeur semble le plus cohérent avec le sous-modèle : l'escrimeur adopte une petite vitesse du pied avant, une petite durée de déplacement du pied arrière aboutissant à une petite durée totale de la marche, avec, au cours de ce déplacement, un pic de vitesse de l'arme survenant plus tard (mais avec une grande amplitude) et un pic de freinage de l'arme survenant plus tôt (mais avec une petite amplitude). On peut donc en conclure que le déplacement est modéré mais la « violence » de l'attaque par le biais de l'arme est d'autant plus importante.

9.4. ORGANISATION DU SABREUR EN CONDITION AVEC CERTITUDE

La situation de certitude, peut être celle de certains entraînements, lorsque les sabreurs répètent des « routines » propres à leur sport ou lorsqu'ils connaissent parfaitement leur « partenaire ».
Dans cette situation, le modèle statistique comporte onze variables. Deux de ces variables sont des événements des APAs : la durée des APAs et la vitesse verticale du centre de masse dès le début du mouvement volontaire (à t0). Le fait que ces variables appartiennent au modèle qui discrimine les distances en situation de certitude et non en situation d'incertitude sont des éléments de résultats en faveur de la programmation de la totalité de la première marche en situation de certitude. Effectivement, connaissant à l'avance la distance à laquelle l'adversaire va porter sa première séquence d'action, il peut anticiper la sienne propre et donc la programmer d'emblée. Ces résultats sont compatibles avec les conclusions de Do et Yiou en 1999 qui proposaient que les APAs auraient une origine centrale en escrime. Les résultats portant sur les coefficients de corrélation entre les variables de la phase préparatoire et celles du mouvement à venir (réf. Paragraphe 7.2) ont montré que certaines relations statistiques étaient semblables à celles trouvées pour la marche « normale » (Brenières, 1981) d'autres inversées (en termes de signe) et d'autres inexistantes. 1) La durée des APAs est significativement corrélée positivement, d'une part avec la vitesse horizontale maximale atteinte au cours de la première marche et d'autre part, avec la longueur normalisée de cette première marche (sauf face à l'attaque courte) qui présente ainsi les mêmes caractéristiques que la marche classique départ deux pieds. Les valeurs, respectivement, des moins fortes au plus fortes, se trouvent lorsque l'escrimeur est face à une attaque longue, puis face à une retraite et, enfin, face à une attaque courte. C'est donc, dans les conditions de distance intermédiaire que la préparation du mouvement est la plus longue et va permettre d'atteindre la vitesse horizontale du centre de masse la plus rapide mais sans effectuer la marche la plus grande. Il n'y aurait donc pas de différence d'organisation d'initiation de la marche en partant pieds décalés ou pieds serrés sauf pour la condition intermédiaire. 2) En revanche, la relation est aussi significativement positive entre la durée d'exécution et la vitesse horizontale atteinte et ce résultat est à l'inverse des résultats sur la marche normale où plus la vitesse est élevée, plus la durée d'exécution est courte. On peut penser que la différence réside dans le fait qu'en marche normale, on s'installe d'emblée dans une marche à vitesse stabilisée, alors que dans l'action en escrime, la vitesse atteinte à la fin de la première marche, correspondrait à une recherche d'accélération maximale pour l'attaque courte alors que pour l'attaque longue (face à la retraite) l'accélération s'effectuerait sur le deuxième mouvement de la séquence, quant à l'éventuelle retraite (face à l'attaque longue), le corps ne doit pas se projeter trop vite vers l'avant afin de rendre plus aisée l'éventuel changement de direction. 3) Enfin, la relation est non significative entre le recul du centre des pressions et la vitesse atteinte au cours de la première marche. Ainsi, le départ pieds décalés des escrimeurs constitueraient une différence de condition expérimentale avec la marche « normale » qui ne permettraient pas de comparer ces résultats (Benvenuti et al., 1997 ; Burleigh et Horack, 1996). La valeur

normalisée du recul est quasiment identique pour les trois conditions de distance. En revanche, il existe une relation avec la valeur non normalisée, uniquement dans la condition R (lorsque l'escrimeur doit effectuer une grande distance face à l'adversaire qui recule).
Néanmoins, cinq variables seulement sont corrélées aux composantes discriminantes et parmi elles ne figure aucune variable représentative des APAs. Ce résultat laisse à penser que, au cours de cette première marche, une adaptation s'effectue également, en cours de mouvement. Cette adaptation pourrait avoir pour but une plus grande efficacité par une plus grande précision.
Le comportement face aux actions d'attaque de l'adversaire (conditions F et M) se distingue du comportement face à la retraite (condition R), principalement par : 1) une plus faible vitesse verticale du centre de masse, ce qui signifie que lorsque le sabreur s'apprête à attaquer court ou même à défendre, puisqu'il sait que l'adversaire va attaquer, il se projette moins vers le haut. A l'inverse lorsqu'il s'apprête à attaquer long pour réduire la distance qui le sépare de son adversaire, sa première marche prend davantage les caractéristiques d'un saut. Ce résultat confirme les résultats qualitatifs trouvés par le « codage» des séquences ; 2) par une ouverture de l'angle entre le bras et le tronc plus importante, qui est positif lorsque le sabreur s'attend à « voir rapidement sur lui » son adversaire. A l'inverse, la valeur est négative lorsque c'est lui qui doit « aller chercher » son adversaire. En d'autres termes, il semblerait qu'il n'écarte pas son bras du corps en même temps qu'il avance lorsqu'il doit effectuer un grand déplacement, mais plutôt qu'il « arme » son bras par un mouvement en arrière de la verticale. Ce comportement pourrait être propice à une plus grande possibilité de vitesse de l'arme dans l'action finale, celle-ci étant animée alors d'un plus grand trajet. Par cette action, l'escrimeur peut aussi stocker de l'énergie qu'il pourra restituer à l'instant de toucher. Ces résultats confirment ceux de Do et Yiou en 1999 qui avaient identifié une double tâche dans le départ de l'action en escrime : se déplacer et toucher. En effet, si cette double tâche existe bien, elle ne semble pas se gérer de manière séquentielle mais bien conjointement. Cette gestion serait seulement différente selon la distance à couvrir pendant le déplacement ; 3) une survenue de l'ouverture maximale de l'angle de la jambe plus tardive, prenant ainsi davantage de temps sur l'ensemble de sa marche pour étendre sa jambe vers l'avant s'il doit effectuer un petit trajet. Peut-on assimiler une petite distance à couvrir à une contrainte de précision plus importante qui permettrait de rapprocher ces résultats de ceux de Nougier et al. en 1990 qui avaient montré que le temps de mouvement est plus long quand la demande de précision est plus grande ? Nous ne pouvons l'affirmer avec certitude, mais il semble que l'exigence de contrainte soit effectivement plus forte, dans le sens où le sabreur se trouve dans ces conditions davantage face à une situation « d'urgence ». Cette proportion est plus réduite s'il doit effectuer un grand trajet s'approchant des 50%, donc devenant égale à la proportion dévolue au déplacement de la jambe arrière.
Le comportement face aux deux types d'attaque de l'adversaire (conditions F ou M) se distingue lui principalement par deux variables : 1) la vitesse maximale du pied arrière qui est plus importante face à une attaque courte (donc dans la situation de distance intermédiaire) que face à une attaque longue. En effet, face à une attaque longue, le sabreur s'apprête à effectuer son déplacement le plus court et il devra peut être même

reculer. Son pied arrière devra donc soit s'immobiliser, soit repartir dans l'autre sens. Lorsqu'il devra avancer vers son adversaire, même sur une courte distance, il s'apprête à effectuer un autre mouvement rapide d'où la vitesse plus élevée du retour de la jambe arrière au cours de la première marche ; 2) une modification de l'angle entre le bras et le tronc qui survient plus précocement dans le mouvement face à une attaque courte que face à une attaque longue. Ainsi, si face aux deux types d'attaque, l'angle final est plus important dans les deux cas que face à une retraite, l'ouverture débute plus tôt dans la situation intermédiaire, c'est-à-dire face à l'attaque courte.
En résumé, si le sabreur doit effectuer : 1) un grand trajet, il « arme son bras » ; 2) un trajet intermédiaire, il écarte son bras dès la première marche et débute cette ouverture tôt au cours de la marche ; 3) un trajet court, il écarte aussi son bras dès la première marche mais débute cette ouverture beaucoup plus tard au cours de la première marche.
Pour la même valeur de signification de la discrimination, nous disposons donc de moins de variables permettant de déterminer une organisation motrice de l'escrimeur qui serait reproductible pour répondre à un même comportement de l'adversaire. Ce résultat montre qu'en situation de certitude, « l'expression individuelle » de chaque sabreur pourrait davantage s'exprimer. Cette hypothèse est corroborée par la variabilité (écart-types) qui est toujours plus grande, quelle que soit la variable, en situation de certitude que d'incertitude. La « prise de risque » pourrait être plus importante dans cette situation, mais c'est surtout les variations interindividuelles qui sembleraient privilégiées.

9.5. ORGANISATION MOTRICE DU SABREUR SELON LA DISTANCE

Les deux sous-modèles statistiques présentés précédemment (le premier sur tous les essais en condition avec incertitude, le second sur tous les essais en condition avec certitude) montre qu'il existe des différences dans l'organisation motrice de l'escrimeur lorsqu'il doit faire face à une même distance de déplacement effectué par son adversaire, selon qu'il a connaissance de cette distance ou non. Nous avons cherché (au travers d'une Manova et d'un autre sous-modèle sur tous les essais dans les deux conditions) si des marqueurs cinématiques constituaient des invariants du comportement de l'escrimeur face à une même distance, quelle que soit la connaissance, a priori, ou non des intentions de l'adversaire.
Parmi les dix-huit variables du sous-modèle statistique, onze sont corrélées aux composantes discriminantes et parmi ces onze, sept présentent également un effet distance (Anova). Les tests post-hoc ne font apparaître qu'une seule variable distinguant significativement les trois distances. Il s'agit de l'écart entre les pieds à l'instant du poser du pied arrière (*i.e.* après le déplacement du deuxième pied, donc à la fin de la marche). Les autres variables distinguent pour l'essentiel la condition M (face à une attaque longue) des deux autres, ou bien la condition R (face à une retraite) des deux autres, de sorte que c'est la condition F (condition intermédiaire du point de vue de la distance) qui est la moins différentiée.
D'un point de vue de la structure du mouvement (appréhendé plus globalement par l'intermédiaire du sous-modèle) les données montrent le même résultat. Le barycentre de chaque condition se place bien chacun dans un cadran unique du plan des deux

composantes discriminantes. Cependant, uniquement le barycentre de la condition F n'occupe pas seul un côté d'une composante. Il est situé sur les x négatifs (composante 1) comme le barycentre des essais de la condition R et du côté des y positifs (composante 2) comme le barycentre des essais de la condition M (réf. Paragraphe 8.1.1). Les variables n'appartenant pas au sous-modèle mais présentant un effet distance dans la Manova, ne contredisent pas ce résultat, puisque c'est aussi les valeurs de la condition F qui sont le moins souvent significativement différentiées des autres valeurs. De telle sorte, que la structure du geste face à une séquence d'attaque courte (et, en une séquence d'attaque courte) pourrait constituer le schéma de base du sabreur. Ce résultat pourrait être assimilé à la posture « intermédiaire » proposée par Martin et al. en 2000, sur laquelle toutes sortes de mouvements de bras peuvent être ancrées.

Les variables du sous-modèle qui informent sur les événements se déroulant au cours des APAs : la durée des APAs et la valeur atteinte par la force antéropostérieure normalisée au début du mouvement volontaire, sont uniquement corrélées avec le score de la première composante discriminante qui distingue les essais face à une attaque longue de l'adversaire (condition M) des essais des deux autres conditions de distance (conditions F et R), qui elles, ne sont discriminées que par des variables concernant des événements plus tardifs. Ce qui tendrait à prouver que la deuxième partie de la marche est majoritairement programmée au cours du déplacement du pied avant.

Parmi les variables les plus « robustes » (qui, à la fois, appartiennent au sous-modèle, sont corrélées au score des composantes discriminantes et présentent un effet distance dans la Manova), deux correspondent à des événements précoces : l'instant normalisé du début de modification angulaire entre le bras et le tronc (entre, 36% du mouvement face à la condition F et, autours de 50% face aux deux autres distances accomplies par l'adversaire) et la durée normalisé du premier double appui (plus court face à la condition M que face aux deux autres conditions de distance). Ainsi, avant le déplacement du pied arrière, l'organisation motrice de la première marche du sabreur présente dans sa première partie : 1) une durée assez longue en premier double appui avec une amorce du mouvement de l'avant-bras qui apparaît significativement plus tôt lorsqu'il va accomplir une courte distance (face à la condition F) ; 2) une durée de double appui significativement plus courte lorsqu'il va accomplir une longue distance (face à la condition R) tout en retardant le mouvement du bras ; 3) et une durée de premier double appui longue lorsqu'il serait susceptible d'effectuer une retraite (face à la condition M) tout en retardant également le mouvement du bras. L'organisation est donc la plus opposée, pour cette première partie de la marche, entre les conditions F et R, *i.e.* lorsque le sabreur, pour être adapté à la distance réalisé par l'adversaire, va devoir produire lui-même, une attaque courte ou une attaque longue.

Dans la deuxième partie de la marche, ce sont la distance la plus longue qu'il devra fournir (face à la condition R) et la distance la plus courte (face à la condition M), qui s'opposent le mieux :

- pour la distance la plus longue, l'ouverture totale du bras par rapport à la verticale est la plus petite (le bras est retenu pour l'action finale), la vitesse du pied arrière est grande, la distance entre les pieds après ce retour est petite et le pic de freinage de l'arme survient tard ;

- pour la distance la plus courte, le bras s'est déjà dégagé du tronc, la vitesse du pied arrière est petite, la distance entre les pieds est grande et le pic de freinage de l'arme survient tôt.

Les conclusions principales de ces résultats sont :
1) la distance entre les pieds, les durées d'appui et l'organisation du bras armé pourraient constituer des sources d'information importantes pour l'adversaire, et cela dès le déplacement du pied avant ;
2) l'organisation conjointe du pointage de l'arme et de la première marche ne présente pas les mêmes caractéristiques selon la distance que le sabreur s'apprête à parcourir. Ces résultats généralisables puisqu'ils ne dépendent pas de la condition de certitude ou d'incertitude confirmeraient que l'expert construit des synergies motrices qui organisent l'attaque en se déplaçant et non, le déplacement du corps et ensuite le déplacement de l'arme pour attaquer ;
3) il semble exister des invariants de la première marche en relation avec cette distance à parcourir, qu'elle soit connue ou non à l'avance par le sabreur ;
4) la première marche semble s'ajuster et se préciser au cours du déplacement du pied arrière et peut-être même au cours du premier double appui dont la durée variable selon les conditions de distance permettrait de programmer la deuxième partie de la marche.

9.6. ORGANISATION MOTRICE DU SABREUR SELON LA CONNAISSANCE OU NON DU DEPLACEMENT DE L'ADVERSAIRE

L'ensemble des résultats précédents montrent que la première marche n'est pas une séquence programmée entièrement puisqu'il existe des variables qui discriminent les conditions de distance quelle que soit la session. En revanche, puisque les marqueurs révélateurs des APAs peuvent aussi faire partie du sous-modèle, sans être toutefois corrélés avec les composantes discriminantes, on peut en conclure qu'il est fait un choix *a priori* pour l'organisation de la première partie de la marche et qu'une adaptation pourrait survenir à partir du premier double appui.
Les résultats concernant les différences d'organisation entre les deux sessions, tous essais de conditions de distance confondus, devraient être à même de préciser comment ce choix *a priori* évolue selon la connaissance qu'il possède ou non de l'action prévue par l'adversaire.
Le début de la variation de force sur l'axe z se produit plus tôt que la variation du centre des pressions. Cette variable qui appartient au sous-modèle discriminant les sessions, est aussi corrélée au score de la fonction discriminante et sa valeur présente également une différence très significative entre les deux sessions. La question est de savoir si ce marqueur est plus propice pour dater le début des APAs ou s'il s'agit seulement d'une oscillation du corps propre à la situation d'attente des sabreurs qui débuterait plus tôt lorsqu'ils savent ce que va faire leur adversaire. On pourrait donc être en présence d'une activité motrice préparatoire à l'action qui se différencierait selon les conditions expérimentales. Ces différences peuvent être assimilées à la différence entre l'activité compétitive et l'activité d'entraînement. Le début de la variation du déplacement

antéropostérieur du centre des pressions, que nous avons choisi dans cette étude comme date du début des APAs ne contredit pas le résultat précédent, la différence entre les deux sessions est également significative et dans le même sens, néanmoins, ce marqueur ne fait pas partie des variables du sous-modèle (au niveau de significativité que nous avons fixé).
Le nombre important de variables, marqueurs d'événements survenant au cours des APAs, appartenant au sous-modèle tendrait à confirmer qu'au moins une partie de la marche est programmée et ceci avec des caractéristiques différentes selon la connaissance *a priori* ou non de l'action de l'adversaire. Notamment, l'organisation posturale, principalement du tronc, semble différer dès le début du mouvement volontaire. Il est moins incliné en condition avec incertitude (il le sera encore à l'instant du poser du pied avant) et présente un angle plus ouvert avec le bras. Le bras garderait donc, dans les deux conditions, le même positionnement dans l'espace. Le tronc plus redressé pourrait être une organisation posturale plus propice à enchaîner rapidement des mouvements plus variés. En effet, il assurerait une grande stabilité posturale permettant de déplacer les appuis aussi bien vers l'avant que vers l'arrière mais aussi d'armer le bras par un mouvement du coude vers l'arrière aussi bien que de le porter rapidement vers l'avant.
L'analyse des effets croisés session*distance dans la Manova, montre encore davantage les différences entre les deux sessions. En effet, de nombreuses variables présentent un écart-type beaucoup plus important au cours de la session avec certitude qu'au cours de la session avec incertitude. Ces écart-types sont dus à une plus grande dispersion des valeurs selon la condition de distance en session avec certitude, y compris dès les événements les plus précoces du mouvement. Ces résultats confirment que la programmation de la première marche est différente selon la connaissance ou non de l'action de l'adversaire. Les valeurs des variables dans la session avec incertitude se situent entre les valeurs extrêmes de la session avec certitude. Le schéma de la première marche au cours de cette session, se construirait donc plutôt avec une configuration et une cinématique qui permettrait d'évoluer vers l'une ou l'autre des organisations plus différentiées telles que l'on peut les repérer dans la session avec certitude. Ainsi, le patron de la marche en situation d'incertitude montrerait une plus grande stabilité, alors que la plus grande dispersion des résultats en situation d'incertitude pourrait être en rapport avec l'émergence d'une plus grande diversité de réponses du sabreur. Ces résultats sont compatibles avec les résultats du précédent point de discussion. Le patron de référence du sabreur pourrait donc être constitué sur la base d'une attaque courte et s'exprimerait préférentiellement en situation d'incertitude.
Les résultats à partir des variables ne présentant aucun effet sujet, même en effet croisé avec les conditions de distance et de session, montrent que tous les sabreurs, au niveau d'expertise à laquelle ils se trouvent, ont été capable de percevoir l'intention de l'adversaire dans la seconde partie de la marche, puisque des variables tardives concernant le pied arrière, le bras armé et la cinématique finale du centre de masse ne dépendent plus des caractéristiques du sabreur. Les corrélations nombreuses entre ces variables illustrées par les résultats de l'Analyse en Composante Principale 3 pourraient témoigner d'une structure extrêmement robuste de coordination entre le pied arrière et le bras armé et de son effet sur le centre de masse dans la phase finale de la marche. Cette structure pourrait

s'avérer indépendante aussi des conditions de distance et de sessions, même si deux variables parmi les six concernées présentent séparément un effet croisé distance * session.

9.7. STRATEGIES INDIVIDUELLES

La presque totalité des variables présentent des différences significatives entre les sujets ou entre un certain nombre de sujets. Il est donc avéré que des sabreurs experts qui suivent un même entraînement développent un « style » personnel dans la structure de leur geste. Cette structure peut s'être consolidée soit d'après leur morphologie, leurs capacités physiques ou physiologiques ou bien encore à partir de leur type d'entraînement en période d'apprentissage. Les variables présentant uniquement un effet sujet, nous renseignent davantage sur leurs aspects propres ne dépendant d'aucun des paramètres des conditions. La cinématique du pied avant et la vitesse verticale du centre de masse au cours de ce déplacement, le timing au premier double appui, et des aspects de la cinématique finale du bras armé, sont concernés. Nous trouvons des corrélations significatives entre ces variables, ce qui tend à montrer que la programmation est en partie individualisée sur ces différents aspects du geste. Néanmoins, en scrutant ces relations individuellement, il apparait aussi qu'elles ne sont pas généralisées, certains sabreurs ne les présentant pas. Pour ce résultat, plusieurs hypothèses sont envisageables selon les variables concernées : 1) la première marche peut être programmée en totalité pour certains sabreurs, alors que d'autres programmeraient uniquement le déplacement du pied avant, le déplacement du pied arrière étant déterminé au cours de ce premier déplacement en fonction des informations fournies par l'adversaire ; 2) cette individualisation motrice pourrait être en rapport avec un comportement d'exploration visuelle propre tel qu'il a été rapporté par Bard en 1982. Nous serions alors en présence d'une véritable individualisation du comportement sensori-moteur ; 3) nous pourrions trouver dans ces résultats, des marqueurs susceptibles de hiérarchiser le niveau d'expertise de ces sabreurs ; un comportement pouvant être repéré comme plus « fluide » et/ou plus économique, *e.g.* le sujet 3 pour la relation entre l'angle du bras armé et le pic de freinage totalement excentrée de la droite de régression par laquelle passent les valeurs des autres sabreurs (Tableau 75). Chercher pour un ensemble de ces variables quelle est sa condition « préférentielle » d'après les valeurs qui resteraient, pour lui, invariantes selon les conditions, permettrait d'établir la structure de son geste qui serait fortement programmée et donc peu « spécifiée » (Pailhous, 1984). On peut établir que cette structure est peu modifiable car fortement automatisée. Ainsi, il faut s'interroger sur la pertinence « technique » de cette structure, sur les possibilités biomécaniques qu'elle offre d'enchaînements adaptés ou non pour la suite de la séquence et sur les informations qu'elle fournit à l'adversaire.

10. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis d'étudier le sabreur dans des conditions plus proches des conditions « naturelles » de pratique que les études antérieures. Le plus souvent, les travaux publiés

portaient sur l'activité de pointage sur une cible et/ou sur les différences relevées dans l'activité motrice du sabreur lorsque celui-ci exécutait des déplacements variés avant ce pointage. Dans nos travaux, c'est un adversaire réel qui produit les différents déplacements et nous avons étudié de quelle manière le sabreur y réagit ou débute son action avec un parti pris et, s'il est capable de s'adapter en cours de mouvement et quand. Néanmoins, l'étude entreprise était très complexe et nous avons écarté un certain nombre de possibilités qui s'offrent normalement au sabreur. C'est ainsi, qu'il devait réagir au signal sonore, alors qu'habituellement il aurait le choix d'attendre et, que la zone qu'il pouvait toucher était limitée à la tête, alors que la surface valable comporte aussi normalement le tronc et les bras.

Les outils d'analyse qui étaient à notre disposition (caméras vidéo au nombre de trois) au moment des expérimentations ne nous ont pas permis d'analyser le plan frontal. Or, si nos travaux ont montré que des informations concernant le mouvement à suivre étaient disponibles dès 300 ms dans le plan sagittal, nous ne savons pas si ces informations sont disponibles dans le plan frontal et si elles sont exhaustives.

Nous avons également montré que le sabreur a perçu l'intention de l'adversaire et s'y est adapté entre 700 et 900 ms après le signal de départ, mais nous ne savons pas sur quels types d'informations s'est focalisé le sabreur pour décrypter l'intention de l'adversaire.

Il serait alors souhaitable de poursuivre ces travaux en utilisant d'autres outils d'analyse qui nous permettrait d'étudier maintenant le plan frontal et la direction du regard du sabreur. Les outils nécessaires sont dorénavant à notre disposition.

L'entraîneur de sabre trouvera dans ce travail de nombreux résultats qui objectiveront les connaissances qu'il s'est construites au cours de sa pratique. Mais au-delà des données chiffrées, c'est surtout sur la notion de modélisation que nous voulons le sensibiliser. La modélisation n'est pas à prendre sous la forme de modèle à suivre mais sous la forme de structure spatio-temporelle stable qui dépend en partie des conditions expérimentales et en partie des caractéristiques individuelles des sabreurs. Ces modélisations permettent d'appréhender les différentes stratégies employées selon les groupes et au sein d'un même groupe, et les structures qui les sous-tendent, elles sont à différencier du « style » qui est l'adaptation ou l'individualisation de la technique sportive par l'athlète, afin d'exploiter au mieux les propres qualités de son système neuro-musculo-squelettique qui, doté de multiples degrés de liberté autorise des configurations squelettiques variées.

Ces connaissances devraient être à même d'interroger les spécialistes de l'entraînement sur la pertinence de cette structure et sur les modalités de modification du comportement moteur d'un sabreur. En effet, ils peuvent ainsi connaître les éventuelles conséquences sur la globalité de la structure du geste, d'une correction et/ou modification apportée à une de ses parties. Ils peuvent aussi objectiver certains comportements « atypiques » de sabreurs particuliers.

Notre travail a également montré que la structure du geste était en partie différente selon la connaissance ou non du mouvement de l'adversaire. Ainsi, on peut supposer que le sabreur ne développe pas les mêmes habiletés lorsqu'il s'entraîne selon une modalité ou une autre (ou peut-être aussi s'il connait parfaitement son adversaire). La structure de la séquence est plus stéréotypée lorsqu'il se trouve en situation d'incertitude, avec une organisation particulièrement « robuste » qui est l'organisation de l'enchaînement marche

et fente. Cette organisation s'appuie sur une stabilité posturale plus importante, une durée de la première marche qui est plus grande mais débute plus tôt. Si l'entraîneur trouve pertinent de stabiliser cette structure de base, afin de développer un support postural propice à différentes modalités d'enchaînements et s'il souhaite développer l'adaptabilité au cours du mouvement, il pourra s'appuyer sur cette modalité d'entraînement en situation d'incertitude. En revanche, lorsqu'il souhaitera augmenter le répertoire des synergies motrices de ses sabreurs, il aura certainement avantage à les mettre face à des adversaires qui eux appliqueront des types d'attaque connus à l'avance du sabreur. En effet, il est apparu que, dans ces conditions, la séquence motrice du sabreur débute plus tard mais présente plus de variabilité qui serait susceptible de dérouter l'adversaire. Notamment, les comportements de type saut sont apparus très majoritairement dans cette situation. La séquence, si elle débute plus tard, est ensuite exécutée plus rapidement. Cette modalité est donc aussi certainement propice au développement de la rapidité d'action.

Nous avons aussi mis clairement en avant que les experts gèrent conjointement le transport du corps vers l'avant par la succession des appuis et le transport de l'arme par des actions conjointes du bras. Selon la distance à parcourir, ce transport peut s'effectuer directement vers l'avant lorsque la distance est courte, ou commencer vers l'arrière en un mouvement préparatoire si la distance est longue. Cette gestion conjointe doit certainement être recherchée dès le début de l'apprentissage chez de jeunes sabreurs moins experts.

11. BIBLIOGRAPHIE

Azémar, G. (1999). Le contrôle du mouvement dans les duels sportifs. *Schweizeriche Zeitschrift für « Sportmedizin und Sporttraumatologie », 47 (2)*, 68-70.

Bard, C. (1982). La prise d'information visuelle et la préparation à l'action. In G. Azémar & H. Ripoll (Eds.). *Neurobiologie des Comportements moteurs* (pp. 181-194). Paris.

Belen'kii, V. Y., Gurfinkel', V.S., & Pal'tsev, Y.I. (1967). Elements of control of voluntary movements. *Biofizika, 12 (1),* 135-141.

Benvenuti, F., Stanhope, S. J., Thomas, S. L., Panzer, V. P., & Hallett, M. (1997). Flexibility of anticipatory postural adjustments revealed by self-paced and reaction-time arm movements. *Brain Research*, *761,* 59-70.

Berthoz, A. (1997). Le sens du mouvement. In Odile Jacob (Ed.). Paris.

Bock, O., & Eversheim, U. (2000). The mechanisms of movement preparation: a precuing study. *Behavioural Brain Research, 108,* 85-90.

Bouisset, S., & Zattara, M. (1981). A sequence of postural movements precedes voluntary movement. *Neuroscience Letters, 22,* 263-270.

Breniere, Y., Do, M. C., & Sanchez, J. (1981). A biomechanical study of the gait initiation process (1). *Journal de Biophysique et de Médecine Nucléaire, 5 (4),* 197-205.

Brindle, T. J., Nyland, J., Shapiro, R., Caborn, D.N.M., & Stine, R. (1999). Shoulder proprioception: latent muscle reaction times. *Medicine and Science in Sport and Exercise, 31 (10),* 1394-1398.

Burleigh, A., & Horak, F. (1996). Influence of instruction, prediction, and afferent sensory information on the postural organization of step initiation. *Journal of Neurophysiology, 75 (4),* 1619-1628.

Carson, R. G., Chua, R., Byblow, W. D., Poon, P., & Smethurst, C. J. (1999). Changes in posture alter the attentional demands of voluntary movement. *Proc R Soc Lond, 266 (B),* 853-857.

Chang, Y.H., Huang, H. W. C., Hamerski, C. M., & Kram, R. (2000). The independent effects of gravity and inertia on running mechanics. *Journal of Experimental Biology, 203,* 229-238.

Chen, Y., Bedell, H. E., Frishman, L. J., & Levi, D. M. (1998). Stimulus uncertainty affects velocity discrimination. *Vision Research, 38 (9),* 1265-1272.

Chong, R. K. Y., Horak, F., & Woollacott, M. H. (1999). Time-dependent influence of sensorimotor set on automatic responses in perturbed stance. *Experimental Brain Research, 124,* 513-519.

Dietrich, G., Breniere, Y., & Do, M. C. (1994). Organization of local anticipatory movements in single step initiation. *Human Movement Science, 13,* 195-210.

Do, M. C., & Yiou, E. (1999). Do centrally programmed anticipatory postural adjustments in fast stepping affect performance of an associated "touche" movement? *Experimental Brain Research, 129,* 462-466.

Fédération Internationale d'Escrime. Règlement pour les épreuves. (F.I.E. Eds.). 160 p.

Fédération Internationale d'Escrime (1988). Règles et techniques de l'escrime au fleuret. Prod F.I.E., film vidéo, 27 minutes.

Flanders, M., Daghestani, L., & Berthoz, A. (1999). Reaching beyond reach. *Experimental Brain Research, 126,* 19-30.

Grasso, R., Ivanenko, Y., & Lacquaniti, F. (1999). Time course of gaze influences on postural responses to neck proprioceptive and galvanic vestibular stimulation in humans. *Neuroscience Letters, 273,* 121-124.

Kerlirzin, Y., Pozzo, T., Dietrich, G., & Vielledent, S. (1999). Effects of kinematics constraints on hand trajectory during whole-body lifting tasks. *Neuroscience Letters, 277,* 41-44.

Martin, O., Teasdale, N., Simoneau, M., Corbeil, P., & Bourdin, C. (2000). Pointing to a target from an upright position in humans: tuning of postural responses when there is target uncertainty. *Neuroscience Letters, 281,* 53-56.

Massion, J. (1990). De la posture au mouvement. In V. Nougier & J. P. Blanchi (Eds.), *Pratiques sportives et modélisation du geste* (pp. 195-213).

Mille, M. L., & Mouchnino, L. (1998). Are human anticipatory postural adjustments affected by a modification of the initial position of the center of gravity? *Neuroscience Letters, 242,* 61-64.

Moreaux, A., Christov, C., & Marini, J.F. (1987). Un outil d'évaluation et de suivi des qualités perceptivo-motrices de l'escrimeur. *Science et Motricité, 1,* 51-55.

Natta, F., & Breniere, Y. (1998). Influence de la posture initiale sur la dynamique du départ de sprint en starting-blocks. *Science et Motricité, 34,* 44-51.

Nougier, V., Stein, J. F., & Azémar, G. (1990). Covert orienting of attention and motor preparation processes as a factor of success in fencing. *Journal of Human Movement Studies, 19,* 251-272.

Papin, J. P. (1987). L'éducation des stratégies de prise d'informations visuelles. In H. Ripoll & G. Azémar (Eds.). *Neurosciences du Sport* (pp. 389-411). Paris.

Proteau, L., Teasdale, N., & Laurencelle, L. (1983). Stratégie de décision en fonction de l'incertitude de l'événement : 2. Latence de la décision et couverture du terrain. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences, 8 (3),* 158-168.

Rossi, B., Zani, A., Taddei, F., & Pesce, C. (1992). Chronometric aspects of information processing in high level fencers as compared to non-athletes: an ERPS and RT study. *Journal of Human Movement Studies, 23,* 17-28.

Sekuler, A. B., Sekuler, R., & Sekuler, E. B. (1990). How the visual system detects changes in the direction of moving targets. *Perception, 19,* 181-195.

Singer, R. N. (1968). Speed and accuracy of movement as related to fencing success. *Research Quarterly, 39,* 1080-1083.

van der Fits, I. B. M., Klip, A. W. J., van Eykern, L. A., & Hadders-Algra, M. (1998). Postural adjustments accompanying fast pointing movements in standing, sitting and lying adults. *Experimental Brain Research, 120,* 202-216.

Woodworth, R. S. & Schlosberg, H. (1954). *Experimental psychology* (Rev. Ed.). New York: Holt, Rinehart, & Winston.

Winter, D. A. (1990). Biomechanics and motor control of human movement. (A Wiley Interscience Publication Ed.).

Yiou, E., & Do, M. C. (2000). In fencing, does intensive practice equally improve the speed performance of the touche when it is performed alone and in combinaison with the lunge? *International Journal of Sports Medecine, 21,* 122-126.

Zattara, M., & Bouisset, S. (1986). Etude chronométrique du programme posturo-cinétique lié au mouvement volontaire. *Journal de Physiologie, 81,* 14-16.

Résumé

L'initiation et le déroulement de la première marche du sabreur lors de l'assaut initial sont étudiés face à un **adversaire réel.** Cette étude a tenté de répondre aux deux questions suivantes : 1) l'escrimeur choisit-il une action au préalable ; 2) son geste s'adapte t-il au cours du mouvement en tenant compte du mouvement adverse ?

Six sabreurs, tous membres de l'équipe de France de sabre et s'entraînant deux fois par jour à l'Institut National des Sports et de l'Education Physique (INSEP) ont mené chacun 48 assauts face à un adversaire commun, lui-même sabreur de haut-niveau. Les assauts se répartissaient en deux session de 24 essais chacune : une session où le sabreur avait connaissance de l'action prévue par l'adversaire et une session où il l'ignorait. Pour chacune des deux sessions, l'adversaire effectuait 8 essais dans trois conditions de distance : une distance courte de marche-retraite, une distance moyenne de marche-fente et une distance longue de marche-marche-fente.

Une partie des résultats portant uniquement sur la première marche de l'adversaire complice a permis d'une part, de valider le protocole expérimental en testant la reproductibilité de l'organisation spatio-temporelle de ses séquences motrices et d'autre part, de repérer des indicateurs cinématiques dont les grandeurs et/ou les caractéristiques variaient en fonction de la condition de distance. Ces indicateurs deviennent alors susceptibles de constituer des informations exploitables par le sabreur. Certaines de ces informations sont disponibles moins de 400 ms après le signal de départ qui est commun aux deux duellistes.

Les résultats de la session avec incertitude ont montré que les sabreurs avaient exploité des informations dès 570 ms qui leur permettaient de distinguer s'ils devaient faire face à une attaque courte ou à une attaque longue et qu'avant 900 ms (au cours du double appui) la marche du sabreur s'était adaptée avec pertinence au mouvement de l'adversaire.

Les résultats de la session avec certitude ont montré que les sabreurs programmaient seulement le début de leur séquence et qu'ils l'adaptaient au cours de la première marche, bien qu'ils connaissent les intentions de l'adversaire. Il a été montré également que les sabreurs menaient une gestion toujours conjointe mais différente, selon la distance, de la double tâche qui s'impose à eux : se déplacer et toucher.

La séquence motrice face à une séquence courte semble constituer la séquence de « base » du sabreur. L'organisation posturo-cinétique du sabreur serait alors celle qui permettrait le plus de variété dans les enchaînements d'action. La distance entre les pieds, les durées d'appui et l'organisation du bras armé pourraient constituer des sources d'information importantes pour l'adversaire, et cela dès le déplacement du pied avant puisque ces variables prennent des valeurs différentes selon les conditions de distance, indépendamment de la connaissance du mouvement de l'adversaire. A l'inverse, l'inclinaison du tronc est différente selon la certitude ou l'incertitude, quelque soit la distance. En situation d'incertitude, le sabreur est à la recherche d'une grande stabilité posturale permettant de déplacer les appuis aussi bien vers l'avant que vers l'arrière mais aussi d'armer le bras par un mouvement du coude vers l'arrière aussi bien que de le porter rapidement vers l'avant.

Ces travaux montrent que 1) dans les deux sessions il existe une adaptation dans la seconde partie de la marche ; 2) la première partie semble relativement stéréotypée en situation d'incertitude et très automatisée et différentiée selon la distance à parcourir en situation de certitude.

Quelles que soient les conditions, il semble émerger un patron de coordination très stable, entre le pied arrière et le bras armé et son effet sur le centre de masse dans la phase finale de la marche.

Enfin, il existe de nombreuses composantes du geste qui sont individualisées, particulièrement à partir du premier double appui. C'est donc dans la partie « adaptation » du geste que semble s'exprimer davantage l'individualisation de la marche et c'est en situation de certitude que s'exprime le plus de variabilité.