



Département des Sciences du Sport

Laboratoire Mouvement, Action et Performance

<p>Etude de la génération de trajectoires locomotrices et de la distance chez les combattants : Escrime, Judo</p>
--

Responsable Scientifique du Projet : Fabrice Mégrot (LMAP – INSEP)

En collaboration avec :
Le Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action du Collège de France sous
la direction de **Alain Berthoz**
la **Fédération Française de Judo et Disciplines Associées**
et la **Fédération Française d'Escrime**

Février 2005

Remerciements

Ce projet est financé par le Ministère de la Jeunesse, des Sports et de la Vie Associative.

Une partie des données présentées ici a été financée par l'**ACI Cognitive : thème « Action » 2001 (Pr. Alain BERTHOZ, LPPA, Collège de France)**.

Nous remercions :

- **Thomas Ducourant** pour la rédaction du rapport
- **Halim Hicheur**, du Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action du Collège de France, pour son aide précieuse lors des séances d'expérimentations et pour ses discussions autour de l'interprétation des résultats,
- La **société ATOPOS** et en particulier **Stéphane Dalbéra** pour son assistance technique,
- Les Fédérations Françaises de Judo et d'Escrime qui ont soutenu ce projet,
- Les sportifs de Haut-Niveau qui nous ont consacré leur temps précieux.

Table des matières

I. Revue de questions	4
A. Positionnement du problème	4
B. Etat de l'art	5
1. Contrôle visuel de la locomotion	5
2. Coordinations inter segmentaires et inter individuelles	8
II. Problématique et hypothèses	12
III. Protocole expérimental	14
A. Objectif	14
B. Méthodes	14
1. Dispositifs d'acquisition des données	14
a) Système de reconstruction des mouvements en 3D	14
b) Marqueurs portés par les sujets	14
c) Notre espace de travail	16
(1) Les déplacements linéaires.....	17
(2) Les déplacements circulaires.....	18
2. Procédure.....	19
a) Les escrimeurs.....	21
b) Les judokas.....	21
3. Traitements.....	22
C. Résultats	23
1. Analyse qualitative	23
a) Escrimeurs	23
b) Judokas	24
c) Les sujets non-spécialistes	24
2. Analyse quantitative.....	29
a) Description de l'évolution temporelle de la distance à maintenir	29
(1) Escrimeurs	31
(a) Essais sans rôles définis	31
(b) Essais avec rôles.....	31
(2) Judokas	32
(a) Essais sans rôles définis	32
(b) Essais avec rôles.....	32
b) Description de la variabilité	32
(1) Escrimeurs	33
(2) Judokas.....	34
c) Description des délais temporels associés au degré de corrélation entre deux personnes.....	35
(1) Résultats obtenus par les escrimeurs.....	37
(2) Résultats obtenus par les judokas.....	39
d) Distance parcourue par les sujets au cours des essais	41
(1) Les escrimeurs.....	43
(2) Les judokas.....	45
IV. Conclusion	47
V. Bibliographie	49

I. Revue de questions

A. *Positionnement du problème*

A chaque instant dans notre vie quotidienne, il nous est nécessaire de nous déplacer afin de satisfaire nos envies, nos besoins. Nous nous rendons au travail, rencontrons d'autres personnes, qui évoluent également en fonction de leurs buts. Ces gestes, par habitude et par répétition, sont automatiques et automatisés. Il est vrai que l'on ne se pose aucune question sur le comment attraper cet objet ou le comment me rendre à cette boutique que l'on connaît si bien. La répétition de ces actions élémentaires fait en sorte que nous ne pensons plus à planifier, construire les bonnes trajectoires (celles qui seront les plus efficaces), réaliser les gestes appropriés et les contrôler.

S'il est vrai que, à l'heure actuelle, la recherche a fait d'énormes progrès pour comprendre et expliquer ce type d'actions (à un niveau local comme à un niveau intégré) chez une personne seule face à un type de situation donnée, il reste une méconnaissance certaine lorsque deux personnes entrent en compétition ou coopèrent pour réaliser une tâche unique. Prenons un exemple pour illustrer ce propos. Deux personnes qui se connaissent bien se rencontrent dans la rue et souhaitent se serrer la main pour se dire bonjour. Chacune de ces deux personnes devra prendre en compte le déplacement de l'autre personne et de son propre déplacement afin de s'arrêter à la bonne distance pour tendre la main au bon moment. Il est en effet très rare que l'on s'arrête 10 mètres avant ou que l'on change de trottoir ! Nous sommes tous d'avis pour dire que cette action est parfaitement automatisée et ne nécessite pas une réflexion intense. Cependant, il semble évident qu'un certain nombre de processus se mettent en place pour effectuer ce réglage. Ces processus peuvent se baser sur la distance mouvante entre les deux individus. Chacun aura alors besoin d'évaluer à chaque instant la distance qui les sépare afin de réguler son propre déplacement. A ce contrôle de la distance (que nous pouvons considérer comme un paramètre géométrique), vient sans aucun doute se rajouter une fine analyse du comportement du partenaire dans sa globalité (telle que la vitesse de progression, la trajectoire choisie, la position sur le trottoir...). Si nous savons que l'autre personne arrive très vite sur nous, nous ne sommes pas obligés d'accélérer, la rencontre aura lieu de toute façon.

Nous pensons que si nos déplacements sont basés sur des paramètres géométriques tels que la distance entre deux personnes et / ou leur orientation, nous sommes alors capables de les contrôler et pourquoi pas de les conserver tout au long d'un déplacement ou d'une série de déplacements. Il semble intéressant de connaître le rôle de la distance initiale entre deux personnes dans ce type d'interactions. Est-il plus aisé de contrôler une petite distance de départ qu'une grande ? De plus, le statut social (dans le sens d'une personne définie au préalable qui dirige les déplacements) influence-t-il le contrôle de ce paramètre ? Nous nous demandons d'autre part si certaines personnes sont plus aptes que d'autres à répondre favorablement à ce genre de tâche. En d'autres termes : est-il possible d'apprendre à contrôler ou à maintenir des paramètres géométriques ? Pour répondre à cette question, nous ferons appel à des sportifs de haut niveau spécialistes d'activités duelles (escrimeurs et judokas) qui sont habitués quotidiennement à ces situations.

Sur ces propos, nous nous proposons d'étudier au cours de ce travail l'évolution et la conservation de ces paramètres géométriques pendant des interactions motrices lors de la locomotion chez l'Homme.

Dans un premier temps, nous nous concentrons sur les données de la littérature relative à la locomotion dans le but d'établir des bases de travail selon les concepts de planification et de contrôle du mouvement. Dans un second temps, nous nous penchons sur les coordinations inter-segmentaires et inter-individuelles afin d'en comprendre les mécanismes de fonctionnement et les lois qui en découlent. Puis, nous décrivons nos modèles expérimentaux et en justifions le choix. Enfin, nous présentons et commentons les expériences que nous avons réalisées.

B. Etat de l'art

1. Contrôle visuel de la locomotion

Les théories écologiques ou « directes » avancées par Gibson (1950) décrivent la perception comme un traitement immédiat d'indices prélevés dans le milieu (environnement). La démarche écologique considère que la lumière issue des rayons photoniques n'est pas aléatoire mais déjà structurée, c'est à dire physiquement définie lorsqu'elle nous parvient. Lorsque nous regardons un objet, chaque point visible réfléchit des rayons de lumière qui pénètre dans notre rétine avec des angles particuliers. Si on commence à se déplacer vers l'avant ou vers l'arrière ou encore latéralement, les angles formés par les rayons de lumière

changent. Ces changements relatifs à la variation des angles traduisent des flux optiques structurés qui sont riches en informations telles que le sens et la vitesse du déplacement. Le mouvement d'un mobile se dirigeant vers nous ou à l'inverse lorsque nous avançons vers une cible est perçu par l'augmentation de l'angle formé par les rayons lumineux des deux bords du mobile. A contrario, si nous nous éloignons du mobile, les angles se referment. Le flux optique est donc un vecteur avec une distance, une direction et une intensité. Il nous donne des informations directes sur la distance entre les objets, le temps qui sépare les objets ou qui nous sépare des objets et sur la direction.

Gibson publie en 1950 un des premiers textes concernant la perception visuelle. Ce texte inclut des théories et des travaux sur les interprétations et les réactions humaines face à un monde en mouvement.

Ce même auteur avance deux notions fondamentales dans la démarche écologique (1979). La première notion est le phénomène de résonance, qui implique une compatibilité entre un émetteur et un récepteur. Ainsi, parmi une grande quantité d'informations, seules les plus pertinentes seront traitées. La deuxième notion est celle des affordances, qui représentent un répertoire d'actions possibles sur un objet. Par exemple, si je vois un verre posé sur une table, je peux soit le remplir, soit le laver, soit le déplacer, etc.

L'approche de la perception doit s'envisager au travers du couplage perception-action (l'action crée l'information et l'information spécifie l'action).

Dans la même démarche Gibsonienne, Lee et al. (1974; 1976) ont travaillé sur des problématiques de contrôle postural et de contrôle de la locomotion humaine. Pour ces auteurs, le flux optique constitue la principale source d'informations permettant l'adaptation et la régulation de l'activité motrice.

Lee élabore la théorie du « time-to-collision » ou « time-to-contact » en étudiant les stratégies de freinage chez les chauffeurs de voiture (1976). Etant donné que le flux optique modifie la taille de l'image d'un objet sur la rétine de l'œil, cette modification de taille renseigne sur le temps restant avant l'impact si les conditions ne changent pas. Le temps de contact peut donc être défini comme un temps théorique nécessaire à un observateur pour atteindre, depuis un instant t , un obstacle situé sur sa trajectoire si sa vitesse reste constante. L'indice optique τ est proportionnel au taux de dilatation de l'image rétinienne de l'obstacle (ou de l'objet). De plus, τ est indépendant des mouvements de l'œil dans l'orbite. Le temps de

contact est proportionnel à τ , avec $\tau = r(t)/v(t)$ où $r(t)$ est le changement de taille sur la rétine et où $v(t)$ est la vitesse de ce changement. Un autre indice optique, la marge τ (τ_m), ajoute un temps supplémentaire assurant plus de confort pour adapter son action dans le cas où la vitesse de déplacement n'est pas constante. Cette théorie a, par la suite, été vérifiée chez l'animal (Lee & Reddish, 1981) : le Fou de Bassan (oiseau de mer d'Amérique du Nord) utiliserait ce mode de fonctionnement pour replier ses ailes au bon moment lors de la plongée dans l'eau. L'homme utiliserait également ce type d'informations temporelles lors du saut en longueur (Lee, Lishman, & Thomson, 1982) et lors des sauts acrobatiques (Lee, Young, & Rewt, 1992).

Warren et al. (1986) ont étudié les adaptations de la course humaine lors d'une tâche de pointage locomoteur. Ces auteurs ont cherché à formaliser la nature des liens entre les comportements perceptifs et les comportements moteurs. Les sujets experts couraient sur un tapis roulant à une vitesse élevée (14.4 km/h) et ils avaient comme consigne de poser le pied sur des cibles entraînées par le tapis. Les coureurs ajustaient leurs foulées en fonction du temps disponible restant avant le contact avec la cible. La stratégie utilisée est la variation d'un seul paramètre de la marche : la composante verticale de l'impulsion pendant la phase d'appui. Elle leur permet d'augmenter la phase aérienne et ainsi de pouvoir atteindre la cible voulue. L'indice τ permettrait de contrôler directement l'impulsion verticale. Grâce aux avancées technologiques, notamment en réalité virtuelle, des auteurs (deRugy, Montagne, Buekers, & Laurent, 2002; deRugy, Montagne, Buekers, & Laurent, 2000a; deRugy, Montagne, Buekers, & Laurent, 2000b; Montagne, Buekers, deRugy, Camachon, & Laurent, 2002) ont poursuivi les travaux dans ce paradigme expérimental. Ils montrent que l'adaptation des paramètres du pas (longueur, temps de contact au sol) est plus précoce lorsque les événements se présentent plus lentement. Dans ce cas, les sujets auraient tendance à réduire la longueur des pas et à diminuer le temps de contact au sol.

Le flux optique serait utilisé pour contrôler activement la locomotion (Warren, Kay, Zosh, Duchon, & Sahuc, 2001) et permettrait d'estimer la distance parcourue lors de déplacement (Redlick, Jenkin, & Harris, 2001). D'après ces théories, la locomotion ne peut se concevoir sans être un comportement guidé visuellement (Bonnard & Pailhous, 1989).

Ces expériences se sont basées sur des modes de locomotion linéaire (déplacement vers l'avant). Il semble que τ ne s'applique pas lors de trajectoires curvilignes (Kerzel, Hecht,

& Kim, 2001), par contre le temps restant avant le passage d'un point (TTP), grandeur basée sur l'accélération optique, semble mieux correspondre à ce type de tâche.

On peut estimer visuellement un angle entre la direction du mouvement (direction perçue, disponible par le flux optique) et la direction du but à atteindre, ou par la direction égocentrique du but en ce qui concerne l'axe du corps, ou les deux. On pourrait alors contrôler cette direction pour qu'il soit aligné avec le but. Warren et al. (2001) concluent que le flux optique et la direction égocentrique sont utilisés pour un contrôle actif de la locomotion.

Wann et Land (2000), au contraire, proposent que dans les trajets courbés, il n'est pas nécessaire de retrouver la direction à partir du flux optique dans le contrôle de la locomotion. Ils insistent plutôt sur le rôle de l'information rétinienne dans le contrôle de la direction dans des trajets courbés.

Les théories écologiques du contrôle du mouvement permettent de résoudre le problème de degrés de liberté (Bernstein, 1967) dans des situations complexes. En effet, il n'est pas question de calculs complexes prenant en compte sa propre vitesse de déplacement, la position de ses membres à un instant donné... Pour ces théories, l'information pertinente est directement prélevée dans la scène visuelle. De plus cette information est disponible à chaque instant, ce qui résoudrait également le problème de la mémoire car il n'est pas besoin de la stocker.

2. Coordinations inter segmentaires et inter individuelles

Les coordinations inter-segmentaires ont fait l'objet d'un grand nombre d'études. Les théories dynamiques issue de la chimie et des sciences physiques favorisant l'auto organisation des systèmes complexes ont émergé (Schoner & Kelso, 1988). La formation de patterns auto organisés est un phénomène collectif et résulte de l'interaction d'un grand nombre de sous-systèmes.

Les travaux de Kelso (Haken, Kelso, & Bunz, 1985; Kelso, Holt, Rubin, & Kugler, 1981; Kelso, 1984) ont porté essentiellement sur les coordinations des mouvements des doigts. Il s'avère dans ces études que les systèmes biologiques (ici les doigts) ont une tendance à la synchronisation (en phase et en fréquence). Si l'on observe les mouvements des mains avec des fréquences différentes, on remarque une forte tendance à l'attraction en phase

(mouvements symétriques des doigts) ou anti phase (mouvements alternés) mais pas à une coordination absolue. Les autres patterns ne représentent alors pas des configurations stables. Les mouvements en phase sont néanmoins plus stables que les mouvements en antiphase. Cette coordination relative serait une propriété des systèmes dynamiques près des bifurcations et conduisant au phénomène d'intermittence vers les points fixes. La coordination absolue serait plutôt une exception. Le passage d'un état stable à un autre état stable dépend de la fréquence de mouvement et est assuré par une phase de transition. Cette phase de transition a été modélisée par un modèle mathématique (Haken et al., 1985) basé sur un système d'équations différentielles utilisant des oscillateurs de Van der Pol couplés. Les oscillateurs de Van der Pol ont permis de caractériser la marche humaine (Dutra, De Pina Filho, & Romano, 2003) et également les coordinations entre deux personnes lors de la locomotion (Freslier, Ducourant, Slotine, Flash, & Berthoz, 2004).

L'homme est capable de produire une variété spatiale et temporelle de comportements coordonnés qui impliquent les membres supérieurs et inférieurs (Swinnen, 2002). Les configurations élémentaires semblent présentes dès la naissance (mouvement alterné des jambes et des bras chez le nourrisson). Les autres comportements demandent un certain temps de pratique pour être réalisés correctement. Il est difficile de faire deux choses différentes avec les mains (exemple : taper deux rythmes différents). Swinnen démontre que la synchronisation semble être le mode d'opération utilisé par défaut par le système nerveux central. Mais ce système est plastique, il se modifie par l'apprentissage. Des auteurs (Wiesendanger, Kazennikov, Perrig, & Kaluzny, 1996) ont également décrit les coordinations bimanuelles lors de tâches de saisie et de manipulation d'objets comme l'ouverture d'une boîte à l'aide une main et la saisie d'un objet à l'intérieur de cette boîte de l'autre main. Il démontre que l'activité des mains est parfaitement coordonnée dans le temps, c'est à dire qu'il existe un décalage temporel dans l'activation du mouvement des mains (d'abord la main gauche : mouvement rapide mais imprécis puis la main droite : action fine = saisie de l'objet).

Cette théorie (appelée aussi synergétique) est élaborée en vue de simplifier et de réduire le nombre élevé de degrés de liberté énoncés par Bernstein (1967) dans des systèmes complexes. En se concentrant sur l'étude de quelques variables (les variables collectives ou paramètres d'ordre ; dans les études citées ci-dessus la phase relative), il est possible de décrire les phénomènes alors que certaines approches en sont incapables.

Ces études ont été étendues aux coordinations des réseaux de neurones dans le cortex (Kelso, 1997), aux coordinations segmentaires de deux personnes (Schmidt, Carello, & Turvey, 1990; Schmidt, Bienvenu, Fitzpatrick, & Amazeen, 1998; Temprado & Laurent, 2004) et font également l'objet d'hypothèses dans les sports collectifs comme le basket (Schmidt, O'Brien, & Sysko, 1999). Les observations faites dans ces dernières études sur la coordination de mouvements segmentaires de deux personnes sont similaires à celles notées sur la coordination de mouvement d'un seul sujet, avec cependant un couplage moins fort et une nécessité de prise d'information visuelle pour obtenir une quelconque synchronisation. Néanmoins, la qualité du couplage entre les différents éléments composant le système dépend du système lui-même, avec, par exemple, un meilleur couplage pour des segments homologues (Swinnen, 2002).

Des études menées dans le cadre théorique de la proxémique (étude des espaces) ont relevé un certain nombre de propriétés. Hall (1966) a défini les espaces de l'homme (notamment la distance intime). L'espace inter personnel a également été mis en évidence en réalité virtuelle (Bailenson, Blascovich, Beall, & Loomis, 2003). Ces auteurs notent des sensations de malaise quand les avatars pénètrent dans une distance inférieure à environ 50 cm, des différences liées au sexe des participants de l'expérience avec le maintien d'une distance plus grande pour les femmes et une influence de l'orientation du corps de l'avatar dans le sens où l'on permet éventuellement l'intrusion d'une personne au sein de l'espace personnel si le visage est tourné.

L'éthologie a également contribué à définir et étudier la coordination des mouvements de deux individus à un niveau comportemental. L'étude des combats ritualisés chez les loups captifs (Golani & Moran, 1983; Moran, Fentress, & Golani, 1981) et des interactions entre les blaireaux (Yaniv & Golani, 1987) ont mis en évidence une image de référence centrée sur le partenaire. Ils ont également montré que les mouvements des animaux sont mutuellement influencés et qu'ils sont prédictibles. Les animaux cherchent à maintenir des grandeurs géométriques telles que la distance relative qui les sépare, leur orientation relative et leur point de contact (partie anatomique la plus proche de l'autre animal). Pendant un certain temps ces grandeurs sont conservées (configuration relativement stable), puis, pour une raison sans doute liée à la décision, les auteurs observent une rupture avant de repasser à nouveau dans une configuration relativement stable. Ils ont assimilé ces ruptures à des transitions. De cette manière, il est alors possible de prédire leurs mouvements en tant qu'observateur. Ils ont dénombré de façon précise les configurations relativement stables et les transitions. De plus,

le comportement des animaux semble fortement lié au statut social de ceux-ci (dominant vs dominé). Il a été démontré que le gradient de mobilité (répertoire des mouvements possibles) est directement dépendant de ce statut (Golani, 1992). Ainsi les animaux dominants peuvent être considérés comme libres lors des échanges avec d'autres animaux alors que les animaux dominés, adoptant des postures basses offrant peu de possibilité de mouvements, sont dépendants des stimuli des dominants.

II. Problématique et hypothèses

Dans les activités duelles, la distance entre les combattants est une question récurrente et commune à toutes les disciplines. En escrime, entre autres, le contrôle et la bonne estimation de ce paramètre favorise grandement la victoire. Bien entendu, les notions d'à-propos, de techniques d'arme et de jambes et de tactique (enchaînement des actions, des touches, des matches...) l'influencent également. Cependant, il semble que la gestion et l'estimation correcte de la distance qui sépare une personne de son adversaire soit un des premiers éléments mis en place lors des séances d'entraînement chez les débutants sous forme de jeux non spécifiques tout d'abord (avec des exercices de type courses, sauts...) puis sous forme de jeux spécifiques (à la discipline) et enfin des exercices orientés vers les matches (lorsque le public – les élèves – atteint un certain âge, un certain niveau).

La gestion de sa propre locomotion et celle de son adversaire permettrait de prévoir et de prédire les actions futures. Il est clair que l'entraînement développe cette qualité même si les recherches scientifiques (Rammani & Miall, 2004) dans ce domaine (empathie) émettent des hypothèses autour de la « théorie de la prédiction » (qui suggère que nous simulons directement les processus cognitifs des autres en utilisant les mêmes mécanismes cognitifs) et la « théorie théorie » (qui suppose que nous utilisons des processus inférentiels et déductifs qui n'impliquent pas de simulation). Sebanz et Frith (2004) pensent que nous prédisons une action en imaginant l'autre personne en train de la réaliser. Il semble cependant moins coûteux (en terme de coût attentionnel) de prédire l'action d'une autre personne lorsque celle-ci en est contrainte. En effet, selon le vocabulaire propre à chaque discipline, les entraînements ont incorporé des techniques de feintes, d'actions en seconde intention, qui forcent l'adversaire à réagir d'une certaine manière. Par exemple, au tennis de table, l'effet de raquette effectué sur la balle lors du service indique au joueur une connaissance *a priori* de la position de la balle au moment du retour. L'expertise consiste alors à ne pas réagir ou à réagir de façon atypique afin de contrarier les prévisions faites par l'adversaire.

Si nous omettons volontairement cette notion de seconde intention, le contrôle de la distance semble être l'élément prépondérant à la préparation à l'action. En effet, il semble nécessaire de se placer à une distance adéquate de son adversaire qui permet à la fois d'effectuer une attaque et également de proposer une alternative défensive. A ce contrôle de

distance vient s'ajouter la notion d'équilibre au cours des déplacements si bien connus des athlètes et des entraîneurs.

Au cours de cette étude, nous nous proposons de mettre en évidence les mécanismes mis en jeu lors de situations de maintien de distance et tenterons de dégager des invariants. Une étude préliminaire chez des sujets non experts des activités de combat a montré l'existence de délais temporels entre le déplacement d'un sujet meneur et celui d'un sujet mené (Ducourant, Vieilledent, Freslier, & Berthoz, 2004 ; Ducourant, Vieilledent, & Berthoz, 2005). De plus, les délais sont fortement dépendants de la distance à maintenir. Plus la distance à maintenir est courte et plus le délai est court. Nous pensons que l'expertise des sujets joue une part importante dans le contrôle de la distance. Nous testerons une population d'escrimeurs de haut niveau (confrontés quotidiennement à des situations d'estimation de distance). Les délais relativement courts observés ci-dessus (environ 200 ms lorsque la distance à maintenir est de 1 m) peuvent être en rapport à une appréhension du contact avec l'opposant. Nous testerons alors une population de judokas de haut niveau, qui ne possèdent pas cette appréhension, pour valider cette hypothèse.

III. Protocole expérimental

Dans cette partie, nous allons décrire les méthodes générales communes aux expériences d'un point de vue d'acquisition et / ou du traitement des données.

A. Objectif

L'objectif de cette étude est la mise en place d'un protocole expérimental permettant d'évaluer et de comprendre les mécanismes liés aux interactions entre deux individus lors de situations de duel (un contre un). Nous avons choisi de contrôler la distance initiale séparant deux individus car celle-ci nous semble être un facteur déterminant. D'autre part, nous avons jugé également nécessaire de contrôler le statut des participants (meneur versus mené) étant donné l'usage fréquent de cette notion dans les diverses séances d'entraînement des activités sportives de combat.

B. Méthodes

1. Dispositifs d'acquisition des données

a) Système de reconstruction des mouvements en 3D

Nous utilisons un système optoélectronique infrarouge (Vicon 8, Oxford Metrics, Ltd) à 23 caméras à une fréquence d'échantillonnage de 120 images par seconde pour la première session d'expérimentations afin de recueillir les coordonnées en trois dimensions de points anatomiques particuliers. Ce système (Figure 1) permet d'enregistrer ainsi le déplacement de deux sujets simultanément dans un espace de grandes dimensions.



Figure 1 : Vicon 8

b) Marqueurs portés par les sujets

Les sujets sont équipés de marqueurs passifs réfléchissant la lumière infrarouge émise par les stroboscopes des caméras (M-Cam, Figure 2, Figure 3, Figure 4).



Figure 2 : Photographie d'une M-Cam en position éteinte



Figure 3 : M-Cam vue de côté



Figure 4 : M-Cam vue de face

Nous avons remarqué que les reconstructions en 3 dimensions sont facilitées lorsque nous plaçons des marqueurs supplémentaires sur les bras (1 sur chaque bras) pour établir une dissymétrie. Celle-ci permet alors au système de différencier le côté droit du côté gauche. Ces marqueurs ne constituent qu'une légère modification du modèle anthropométrique utilisé et ne dégradent en rien les données acquises. Pour les raisons citées ci-dessus, nous avons choisi d'inclure ces marqueurs dans notre modèle.

Nous réalisons une capture de chacun des sujets en statique (Figure 5) pour que le système Vicon connaisse l'agencement exact des marqueurs et puisse identifier les deux sujets selon leurs caractéristiques anatomiques propres lorsque nous leur demandons d'évoluer dans le même espace calibré.



Figure 5 : Capture statique d'un sujet

c) Notre espace de travail

Les sujets évoluent dans un grand volume calibré au préalable par le système Vicon. Cette calibration est réalisée par le positionnement précis de chaque caméra « filmant » chacune une partie de l'espace de travail souhaité. Le système Vicon intègre ensuite les images de chaque caméra pour reconstruire en temps réel l'espace en 3 dimensions grâce à une calibration statique (équerre dont les dimensions sont connues, Figure 6) et une calibration dynamique (Figure 8). Une personne se déplace à l'intérieur de l'espace avec une baguette (Figure 7) dont les dimensions sont également connues.



Figure 6 : calibration statique



Figure 7 : baguette



Figure 8 : calibration dynamique

Nous avons choisi de calibrer un espace de travail très large pour que nous puissions effectuer toutes nos conditions expérimentales. Ces conditions expérimentales ne nécessitent pas exactement les mêmes volumes de capture.

Les volumes utilisés sont décrits dans les parties qui suivent.

(1) Les déplacements linéaires

Nous avons choisi de limiter l'espace à une surface rectangulaire au sol (8 m x 2 m). L'espace calibré par le système est de 10 m x 5 m.

La Figure 9 représente l'espace ainsi dessiné au sol. Nous avons placés des repères visuels qui permettent le bon positionnement des sujets selon le protocole expérimental. Ces repères sont les suivants :

- des repères noirs espacés de 1 mètre de distance centrés sur le milieu de la piste,
- des repères bleus espacés de 2 mètres de distance centrés sur le milieu de la piste
- des repères rouges espacés de 3 mètres de distance centrés sur le milieu de la piste
- des repères noirs en pointillés à 2 mètres de chaque extrémité de la piste permettant aux sujets de savoir qu'à partir de cette limite, il reste encore 2 mètres disponibles vers l'arrière pour évoluer.

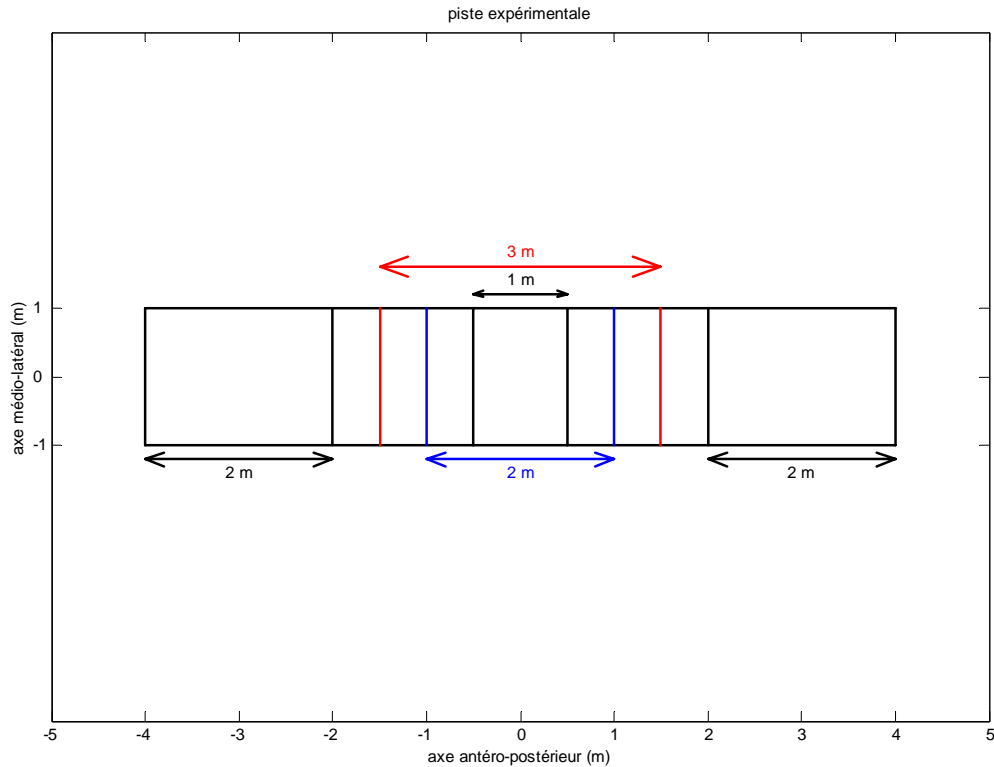


Figure 9 : Schéma de l'espace expérimental utilisé pour les déplacements linéaires

Cette piste matérialisée au sol est utilisée pour les expériences concernant les déplacements linéaires antéro-postérieurs et latéraux. Dans ce dernier cas, seules les limites (bordures) latérales de la piste sont exploitées et les sujets n'ont pas à se soucier des repères au sol.

(2) Les déplacements circulaires

La Figure 10 montre les tracés au sol utilisés lors des expériences concernant les déplacements en rotation. Nous avons choisi de représenter trois cercles de diamètres différents : le cercle en noir sur la figure a un diamètre de 1 mètre, le bleu 2 mètres et le rouge 3 mètres. Le point rouge correspond au centre des cercles qui est identique au centre de l'espace calibré.

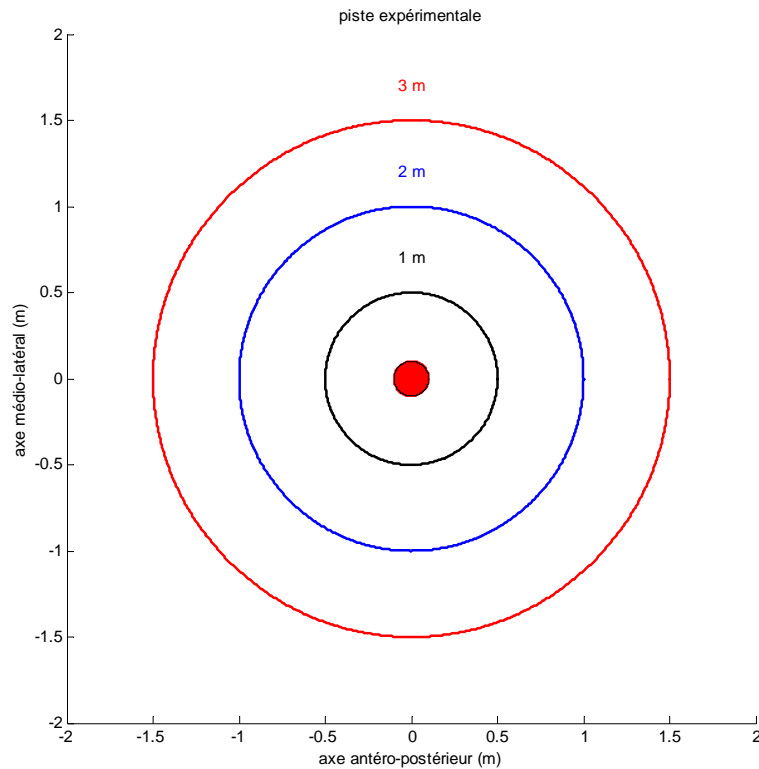


Figure 10 : Schéma de l'espace expérimental utilisé pour les déplacements circulaires

2. Procédure

Les sujets sont répartis en 2 groupes de 3 personnes. Chaque personne sera confrontée aux deux autres personnes du groupe. Nous avons alors 6 couples de sujets.

Lors de la première session expérimentale, nous demandons aux sujets d'interagir selon des conditions libres, dans le sens où nous ne définissons pas par avance un meneur ou un mené. Chaque couple constitué doit effectuer 10 essais dans chacune des conditions expérimentales. Un essai a une durée de 20 secondes.

Les conditions expérimentales sont au nombre de 7. Pour les déplacements linéaires antéro-postérieurs, nous demandons 3 distances de départ différentes (1 m, 2 m et 3 m). Nous avons une seule condition expérimentale pour les déplacements linéaires latéraux. Enfin, pour les déplacements circulaires, nous avons prévus 3 cercles de diamètres différents (1 m, 2 m et 3 m).

Les conditions expérimentales sont tirées au sort par les sujets eux-mêmes (Figure 11 et Figure 12) pour éviter les effets liés à l'apprentissage d'une condition sur les autres.

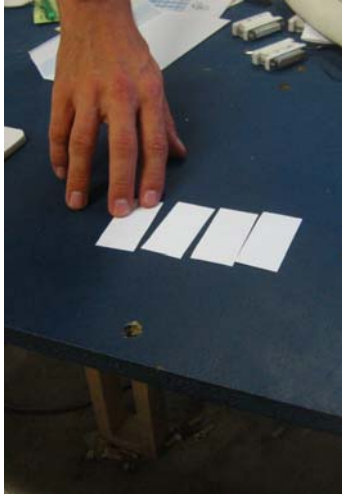


Figure 11 : tirage au sort de la condition expérimentale



Figure 12 : identification de la condition expérimentale

La condition expérimentale est tirée au sort (comme décrit plus haut), puis nous déterminons la personne qui débutera en tant que meneur par tirage au sort (Figure 13).

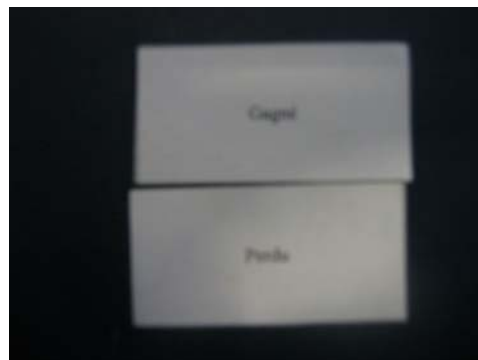


Figure 13 : tirage au sort du statut

Les sujets réalisent 6 essais par statut social, soit 12 essais par condition expérimentale. Les sujets indiquent lorsqu'ils sont prêts à débiter. L'expérimentateur déclenche le système d'acquisition. Celui-ci enregistre 2 secondes puis envoie un signal sonore qui indique le début de mouvement. A partir de ce signal, la durée d'acquisition est de 24 secondes. Nous avons choisi cette nouvelle méthode car le système Vicon utilise un certain nombre d'images pour se stabiliser provoquant des pertes de marqueurs. De plus, le signal sonore est automatisé, ce qui fournit la même information pour tous les sujets.

a) Les escrimeurs

Les escrimeurs sont répartis en 2 groupes de 3 personnes. Nous avons alors 6 couples d'escrimeurs. Nous avons choisi de ne les faire évoluer que dans des tâches de déplacements linéaires antéro-postérieurs en rapport avec leur activité physique quotidienne. Dans cette discipline, les déplacements linéaires et latéraux n'ont pas de signification et les sujets ne sont jamais confrontés à ce type de déplacements. En quelque sorte, nous avons tenté de préserver leur discipline. L'enregistrement des mouvements est réalisé sur une seule session. Cette session comporte trois parties : la partie libre (sans indication quant au statut social), la partie meneur / mené et une partie spécifique à la discipline.

La méthodologie d'acquisition des données est la même que celle décrite pour la deuxième session des sujets non spécialistes. Les sujets réalisent 10 essais pour les conditions libres (3 distances), 6 essais par statut social pour les conditions meneur / mené et un match d'escrime en 15 touches avec arbitre.

Voici le plan expérimental schématisé pour un sujet :

$2 \times [(C \times 10) + (2 \times C \times 6) + M]$. Ce sujet a effectué 66 essais et un match avec un partenaire, soit au total 122 essais et 2 matchs au cours de la session.

b) Les judokas

Nous avons réparti les judokas en 1 groupe de 3 sujets et 1 groupe de 2. Nous avons donc 4 couples de judokas. Les judokas évoluent sur toutes les conditions expérimentales sur un nombre moins important d'essais. Nous avons ajouté 3 conditions expérimentales un peu plus spécifiques à la discipline judo. L'enregistrement des mouvements est réalisé sur une seule session. La méthodologie d'acquisition des données est la même que celle décrite pour la deuxième session des sujets non spécialistes. Ces sujets effectuent 3 essais dans chacune des conditions expérimentales. La session comporte trois parties : la partie libre (sans indication quant au statut social), la partie meneur / mené et une partie spécifique à la discipline.

Voici le plan expérimental schématisé pour un sujet judoka :

$2 \times [(C \times 3) + 2 \times (C \times 3) + (S \times 3)]$. Ce sujet a effectué 72 essais avec un partenaire, soit au total 144 essais au cours de la session.

3. Traitements

Les calculs effectués par la suite porteront sur les marqueurs du milieu de la tête (Figure 14). Nous justifions ce choix car nous pensons que ce marqueur est situé sur l'axe longitudinal du corps et nous pensons que lorsque nous nous déplaçons face à face en situation de duel, nous portons notre attention sur la position de la tête de notre partenaire (ou adversaire). Le système Vicon nous donne la position en valeur absolue de ces marqueurs selon les axes $0x$, $0y$ et $0z$.

Nous vérifierons la position initiale des sujets en utilisant les marqueurs situés sur la pointe des pieds.



Figure 14 : Marqueur utilisé pour les calculs

En connaissant les coordonnées précises de ce marqueur, il nous est possible de calculer des grandeurs géométriques telles que la distance qui sépare ces deux sujets, leur orientation par rapport à un point fixe (comme le centre d'un cercle) ou leur alignement.

Les données sont traitées avec les logiciels 3 D Vision (Gilles Dietrich ©) et Matlab 6 (Mathworks ©).

Après une observation attentive des données brutes, nous avons choisi d'effectuer une interpolation à 8%. Le système Vicon a réalisé en effet un certain nombre de coupures non désirées dans nos fichiers.

Après une étude de la Densité Spectrale de Puissance (DSP) de nos données brutes, nous avons décidé de filtrer les fichiers informatiques par le biais d'un filtre Butterworth à 8 Hz. Ce filtre ne retire pas de données liées au mouvement biologique, mais il écarte le « bruit » généré par le système d'acquisition.

C. Résultats

Dans cette partie, nous ne traiterons que les résultats relatifs aux expérimentations des déplacements antéro-postérieurs.

1. Analyse qualitative

a) Escrimeurs

La Figure 15 et la Figure 16 montrent des exemples de déplacements pour des escrimeurs au cours du temps dans l'enceinte de la piste. Ces figures nous montrent que les sujets oscillent naturellement dans les limites spatiales de la piste tracée au sol, l'oscillation n'étant pas une consigne que nous leur avons donnée. Ce comportement est systématique. Nous n'avons pas remarqué au cours des nombreux essais d'autre attitude (comme un déplacement très lent sans aucun changement de direction). Les oscillations visibles sur les courbes correspondent aux différents changements de direction (de l'avant vers l'arrière ou de l'arrière vers l'avant). De par la nature de la tâche, un changement de direction pour un sujet (de l'avant vers l'arrière, par exemple) est exécuté à l'opposé par l'autre sujet (de l'arrière vers l'avant).

A première vue, il semble que la mise en place de rôles lors des interactions modifie considérablement le comportement des sujets puisque l'on constate davantage d'oscillations (de changements de direction) sur les essais avec rôles.

Sur les deux types de conditions, une certaine rythmicité semble établie avec cependant une fréquence propre différente. En effet, la fréquence des oscillations ne dépend

que du bon vouloir d'une seule personne dans le cas des essais avec rôles (le mené étant contraint de suivre les déplacements du meneur) alors que pour les conditions sans rôle défini au préalable, les oscillations sont la conséquence d'une décision commune.

A la vue des données, il ne semble pas que les caractéristiques oscillantes soient liées à la distance initiale à maintenir. Il est difficile en effet de déterminer différentes fréquences selon les conditions de distance. Cependant, l'amplitude des oscillations (amplitude des allers-retours) se réduirait avec l'augmentation de la distance à maintenir par les contraintes spatiales des bornes de la piste.

b) Judokas

La Figure 17 et la Figure 18 montrent des exemples de résultats comportementaux des judokas. Les judokas, tout comme les escrimeurs, oscillent dans les limites de la piste durant la totalité de la durée des essais.

Les judokas semblent cependant adopter un comportement différent des escrimeurs dans les conditions libres. En effet, le nombre d'oscillations semble plus conséquent. Lors de ces essais, nous apercevons également une certaine rythmicité basée sur l'alternance d'oscillations de faibles et de fortes amplitudes.

Les déplacements réalisés dans les essais avec rôles semblent moins fluides que chez les escrimeurs. La rythmicité dans ces essais est moins évidente et n'est peut-être pas le mode de fonctionnement des judokas. Ici, les enregistrements présentés ont tendance à montrer une sorte d'imprévisibilité comportementale de la part du meneur (cela semble moins être le cas chez les escrimeurs).

c) Les sujets non-spécialistes

Les sujets non-spécialistes (courbes non présentées ici) adoptent des comportements similaires aux deux populations testées ci-dessus.

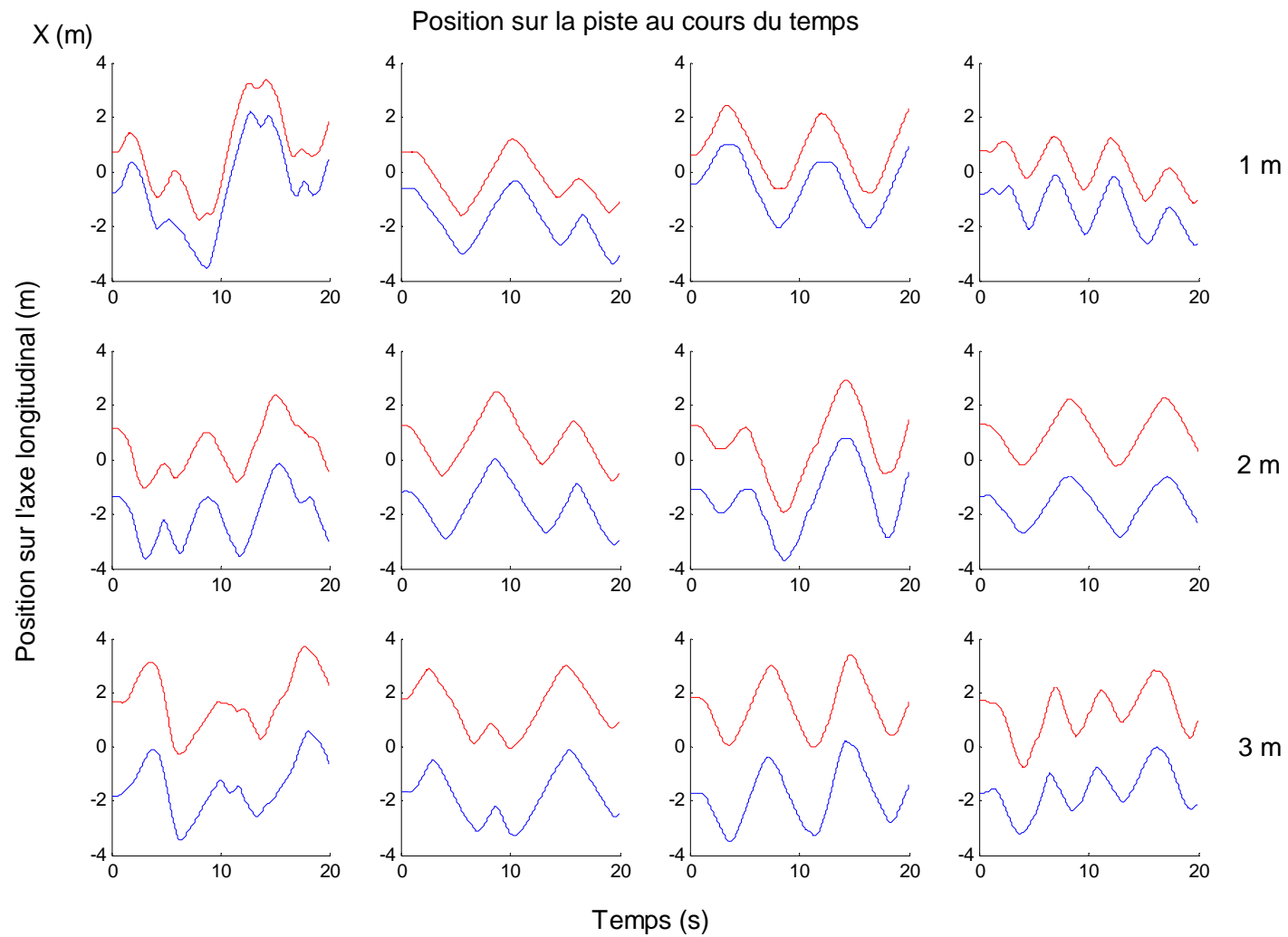


Figure 15 : exemple de déplacements au cours du temps (20 secondes) pour différents couples d'escrimeurs pour les trois conditions de distance initiale pour les séries sans rôles. Chaque courbe représente le déplacement d'un sujet.

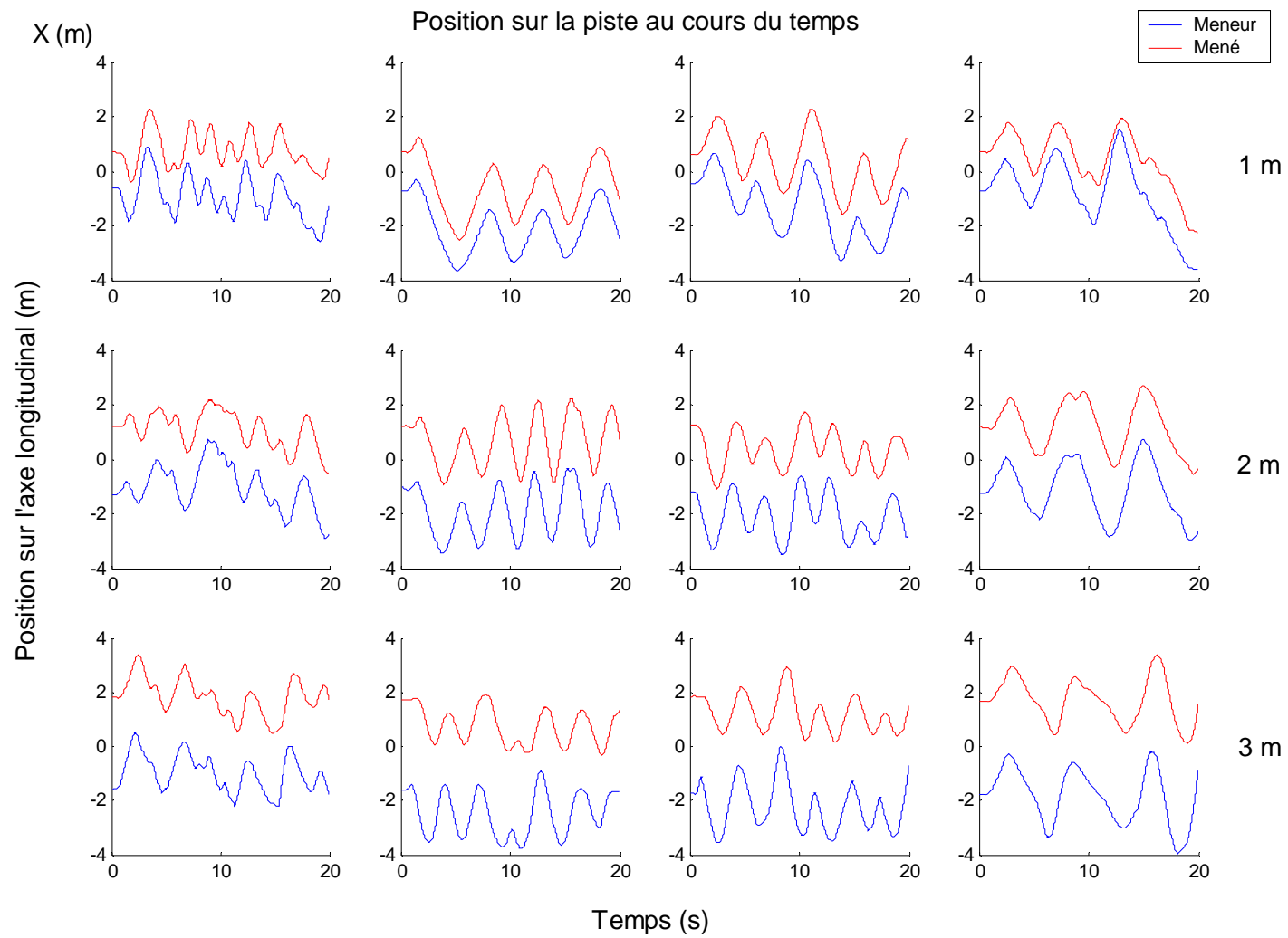


Figure 16 : exemple de déplacements au cours du temps (20 secondes) pour différents couples d'escrimeurs pour les trois conditions de distance initiale pour les séries avec rôles. Le meneur des déplacements est toujours représenté en rouge sur les tracés, le mené est en bleu.

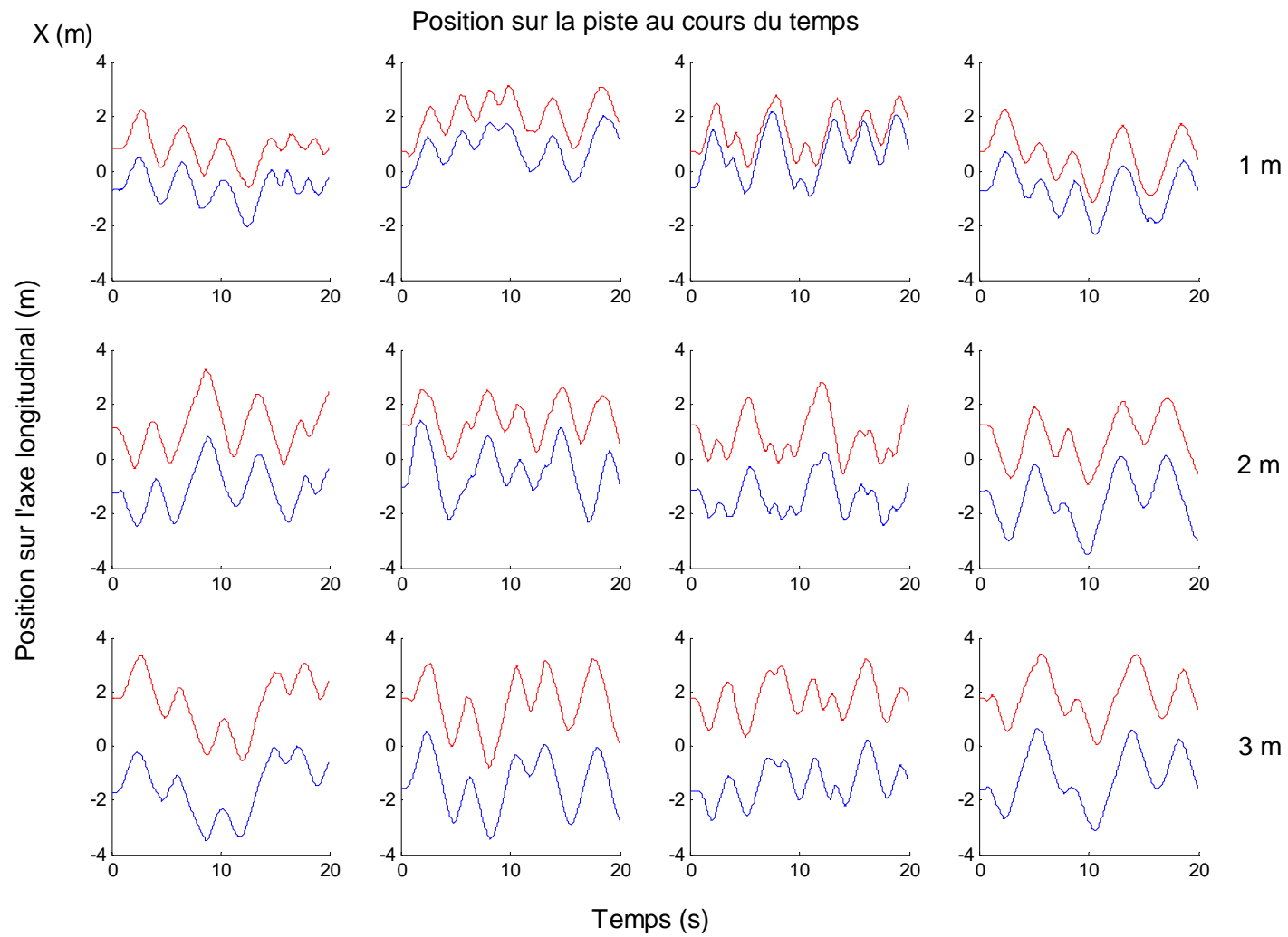


Figure 17 : exemple de déplacements au cours du temps (20 secondes) pour différents couples de judokas pour les trois conditions de distance initiale pour les séries sans rôles. Chaque courbe représente le déplacement d'un sujet.

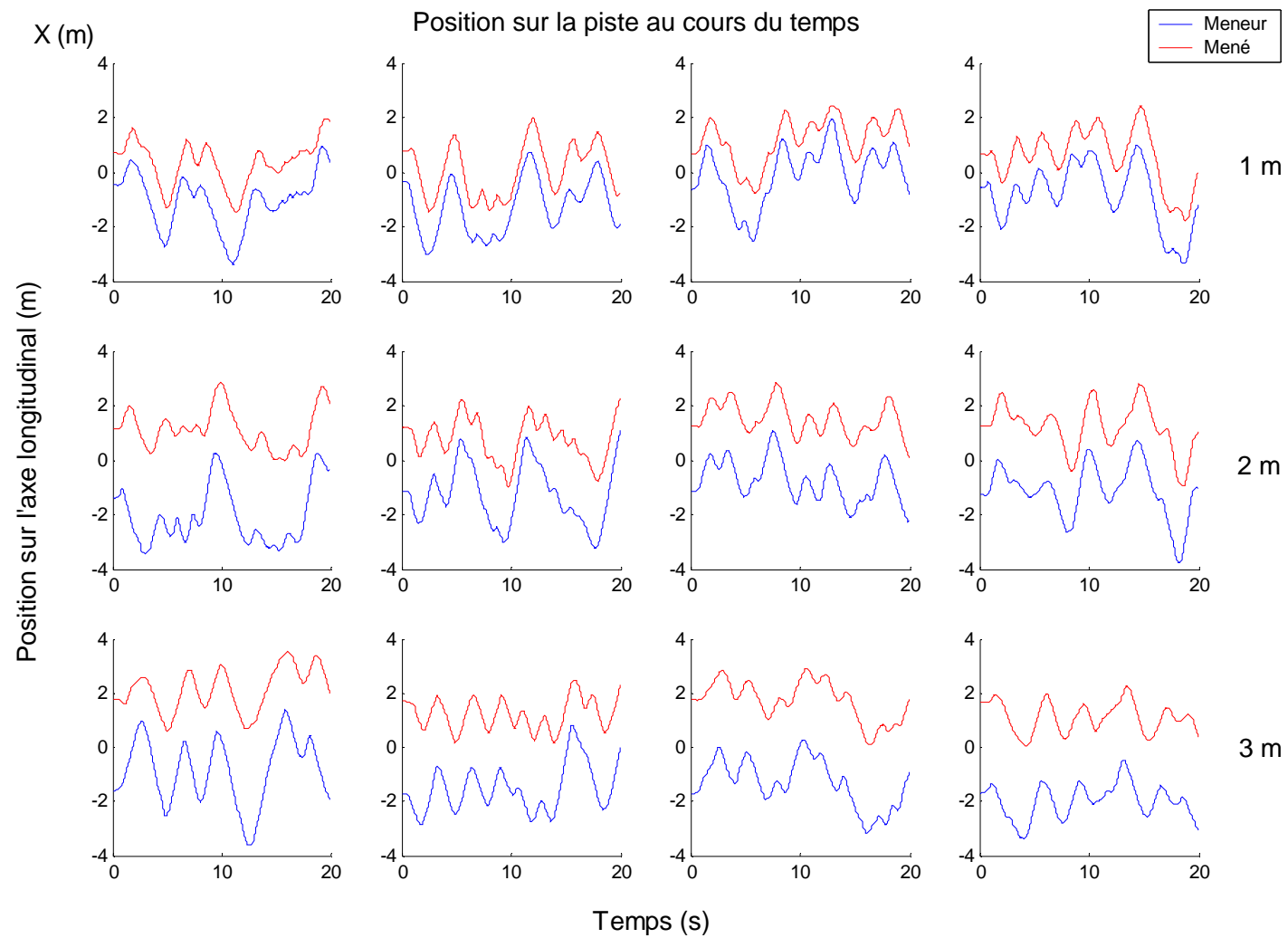


Figure 18 : exemple de déplacements au cours du temps (20 secondes) pour différents couples de judokas pour les trois conditions de distance initiale pour les séries avec rôles. Le meneur des déplacements est toujours représenté en rouge sur les tracés, le mené est en bleu.

2. Analyse quantitative

a) Description de l'évolution temporelle de la distance à maintenir

Les figures suivantes (Figure 19, Figure 20 et Figure 21) montrent des exemples de résultats obtenus pour des essais avec rôles dans les conditions 1 m, 2 m et 3 m. Les tracés magenta représentent l'évolution de la distance qui les sépare au cours du temps. Les résultats de tous les essais (escrimeurs et judokas) sont dans l'ensemble similaires à ceux montrés ici. Cette distance présente des variations dépendant du déplacement des sujets. D'autre part, la distance « maintenue » est assez éloignée de la distance prévue par la condition expérimentale (distances strictes : 1 m, 2 m et 3 m).

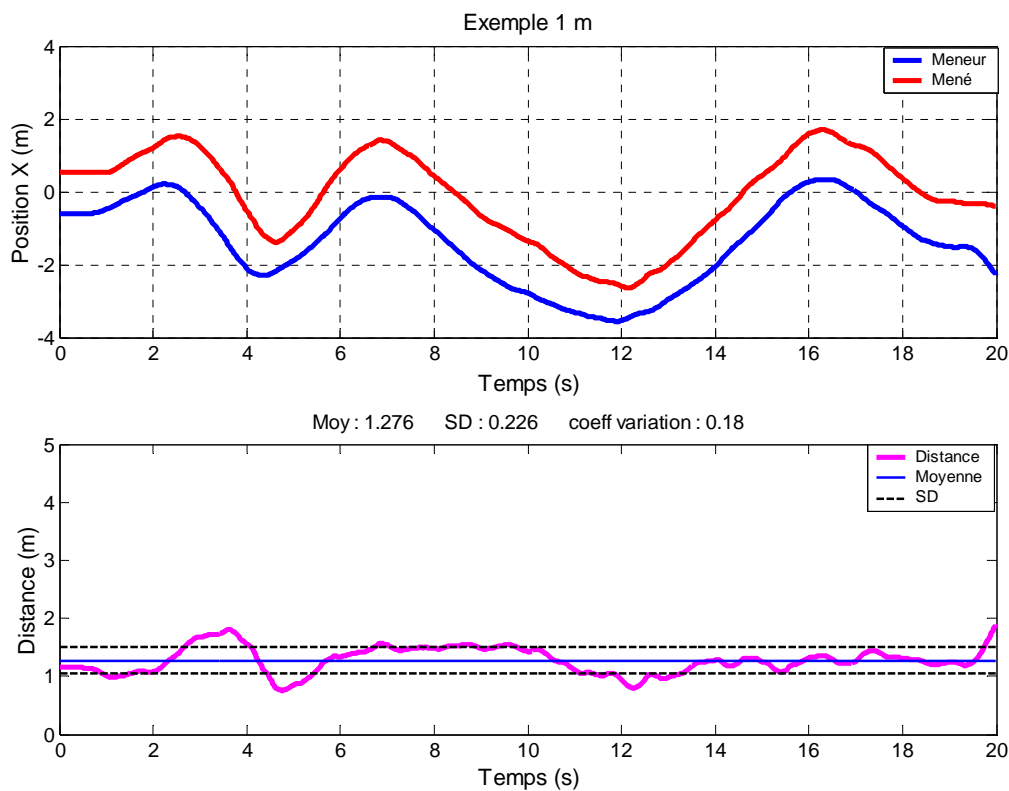


Figure 19 : Exemple d'essai pour la condition 1 m avec rôles pour un couple d'escrimeur. La partie supérieure de la figure montre le déplacement du meneur (en bleu) et du mené (en rouge) dans l'enceinte de la piste au cours du temps (20 secondes). La partie inférieure représente l'évolution de la distance qui les sépare (en magenta) au cours du temps ; en bleu la distance moyenne maintenue est symbolisée ainsi que la variabilité (en pointillés noirs).

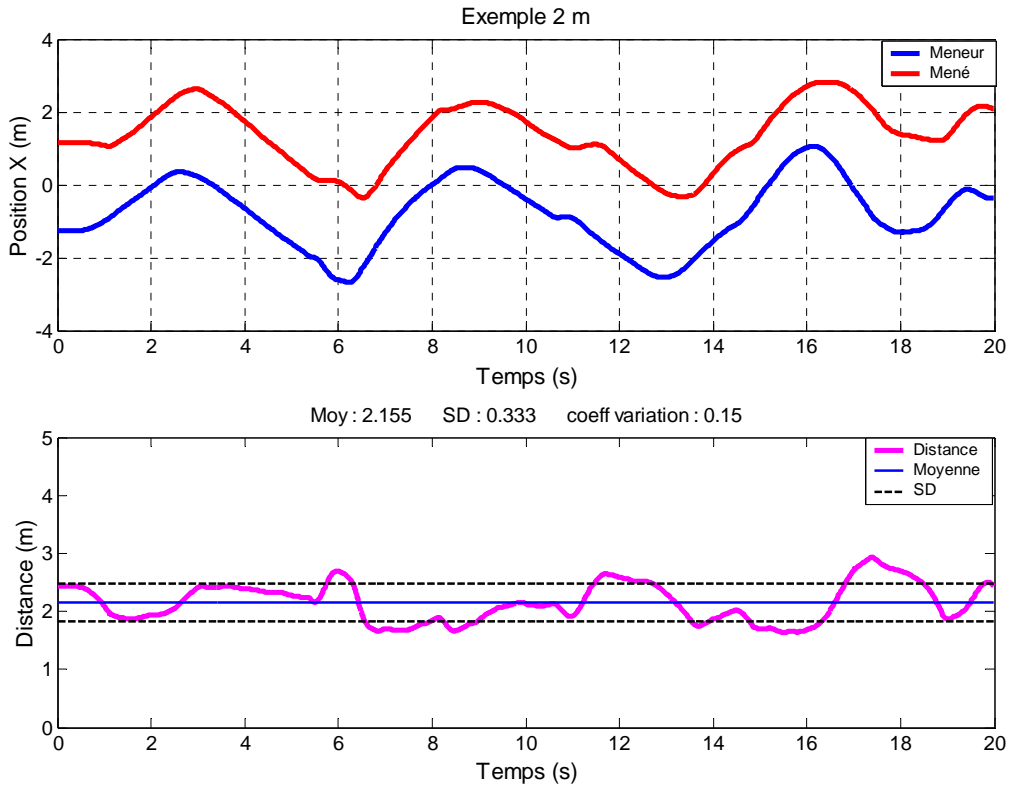


Figure 20 : Exemple d'essai pour la condition 2 m avec rôles pour un couple d'escrimeur. Les explications sont identiques à celles de la Figure 19.

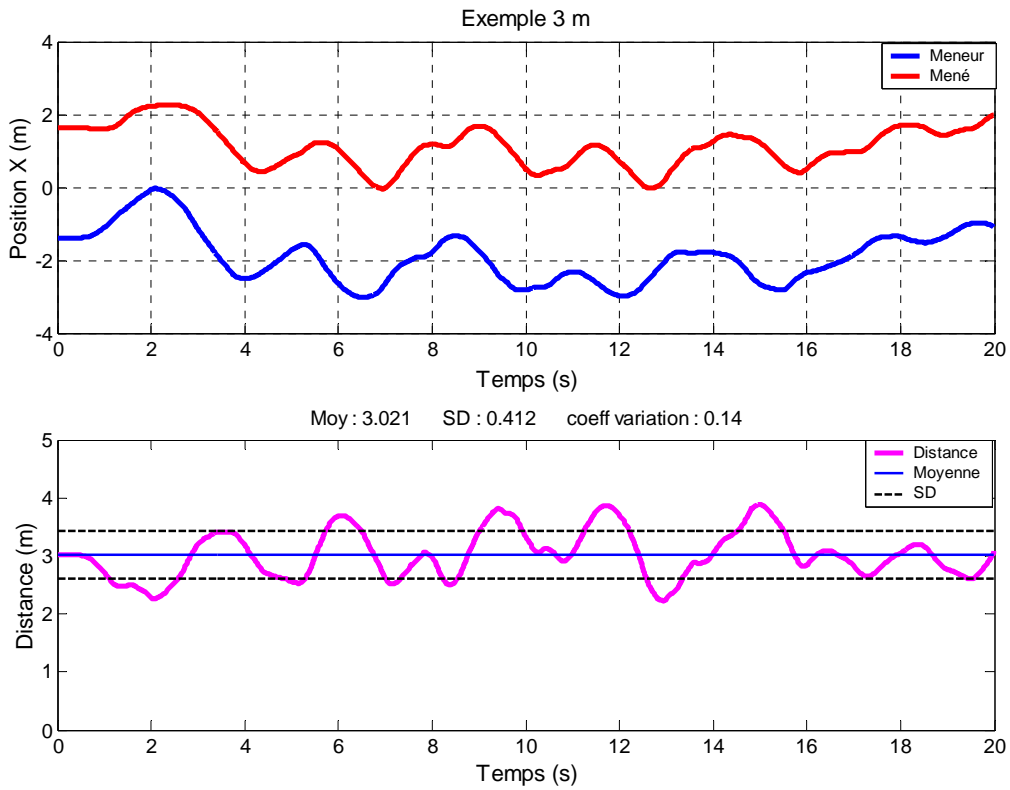


Figure 21 : Exemple d'essai pour la condition 2 m avec rôles pour un couple d'escrimeur. Les explications sont identiques à celles de la Figure 19.

Il pourrait alors se poser deux questions :

1 – Est-ce que les sujets tentent de maintenir une distance à laquelle nous faisons référence (distance stricte) ?

2 – Est-ce que les sujets tentent de maintenir une distance relative reconstruite à partir des conditions initiales ?

Pour répondre à ces questions nous comparerons dans un premier temps les distances moyennes observées aux distances des conditions initiales (distances strictes : 1 m, 2 m et 3 m), puis nous les comparerons aux distances initiales réelles.

(1) Escrimeurs

(a) Essais sans rôles définis

Les escrimeurs sont séparés, lors des essais libres, de 1.37 ± 0.17 m, 2.32 ± 0.22 m et 3.12 ± 0.25 m respectivement pour les conditions 1 m, 2 m et 3 m. Le test de Student rejette l'hypothèse d'une concordance entre les distances moyennes relevées et les distances strictes (1 m, 2 m et 3 m) à $p < 0.001$ ($N = 60$, $dl = 59$, $t = 16.94$, $p < 0.001$; $t = 11.57$, $p < 0.001$; $t = 3.77$, $p < 0.001$, respectivement). Les escrimeurs ne maintiennent pas une distance chiffrée.

Les distances initiales moyennes sont égales à : 1.37 ± 0.14 m, 2.47 ± 0.12 m et 3.47 ± 0.11 m respectivement pour les conditions 1 m, 2 m et 3 m. Seule la condition 1 m semble être susceptible d'être identique ($t = 0.18$; $p = 0.86$), les deux autres conditions étant rejetées par le test (2 m : $t = -6.61$, $p < 0.001$; 3 m $t = -12.41$, $p < 0.001$).

Dans ces conditions expérimentales, les escrimeurs surestiment la distance initiale.

(b) Essais avec rôles

Dans les essais où nous avons défini des rôles, les escrimeurs sont séparés en moyenne de 1.54 ± 0.18 m, 2.38 ± 0.25 m et 3.13 ± 0.31 m respectivement pour les conditions 1 m, 2 m et 3 m. Le test du t de Student rejette la possibilité de correspondance entre les moyennes observées et les distances strictes ($N = 72$, $dl = 71$, $p < 0.001$).

Par contre il accepte la possibilité à $p = 0.58$ que la moyenne observée à 2 m soit similaire à la distance initiale.

(2) Judokas

(a) Essais sans rôles définis

Les judokas sont séparés, lors des essais libres, de 1.20 ± 0.22 m, 2.15 ± 0.16 m et 3.11 ± 0.24 m respectivement pour les conditions 1 m, 2 m et 3 m. Le test de Student rejette l'hypothèse d'une concordance entre les distances moyennes relevées et les distances strictes pour les conditions 1 m et 2 m à $p < 0.01$ ($N = 12$, $dl = 11$, $t = 3.13$, $p < 0.01$; $t = 3.23$, $p < 0.01$, respectivement). La condition 3 m semble être maintenue ($t = 1.58$, $p = 0.14$).

Les distances initiales moyennes sont égales à : 1.37 ± 0.08 m, 2.36 ± 0.10 m et 3.44 ± 0.11 m respectivement pour les conditions 1 m, 2 m et 3 m. Le test de Student rejette la possibilité de similitude entre les distances moyennes observées et les distances moyennes initiales.

(b) Essais avec rôles

Tout comme pour les essais sans rôles définis au préalable, seule la distance moyenne observée à 3 m (3.03 ± 0.34 m) peut être assimilée à une distance stricte ($t = 0.46$, $p = 0.65$). Les distances moyennes des deux autres conditions (1.38 ± 0.19 m et 2.35 ± 0.37 m) sont jugées différentes des distances strictes ($N = 24$, $dl = 23$, $p < 0.001$).

Les distances moyennes observées pour les conditions 1 m et 3 m sont différentes des distances initiales moyennes ($p < 0.05$ et $p < 0.001$), seule la condition 2 m présentant des similitudes ($t = -1.4$, $p = 0.17$).

b) Description de la variabilité

Compte tenu du caractère variable de la distance qui sépare les deux personnes au cours du temps, nous avons calculé un indice de variabilité (coefficient de variation). Cet indice correspond au rapport entre l'écart type observé et la moyenne observée :

$$\text{Coeff de variation (CV)} = \frac{\text{Ecart type observé}}{\text{Moyenne observée}}$$

Il permet de rendre compte de la proportion que prend la variabilité compte tenu de la moyenne.

(1) Escrimeurs

Un test de Student sur des échantillons indépendants (60 essais par condition de distance pour les essais sans rôles et 72 essais par condition de distance pour les essais avec rôles) a été effectué sur les coefficients de variation calculés à partir des moyennes individuelles et de leur écart type. Les résultats sont présentés dans la Figure 22. Ce test montre une similitude des variations entre la condition 1 m sans rôles et la condition 3 m avec rôles ($t = -1.53$, $p = 0.13$).

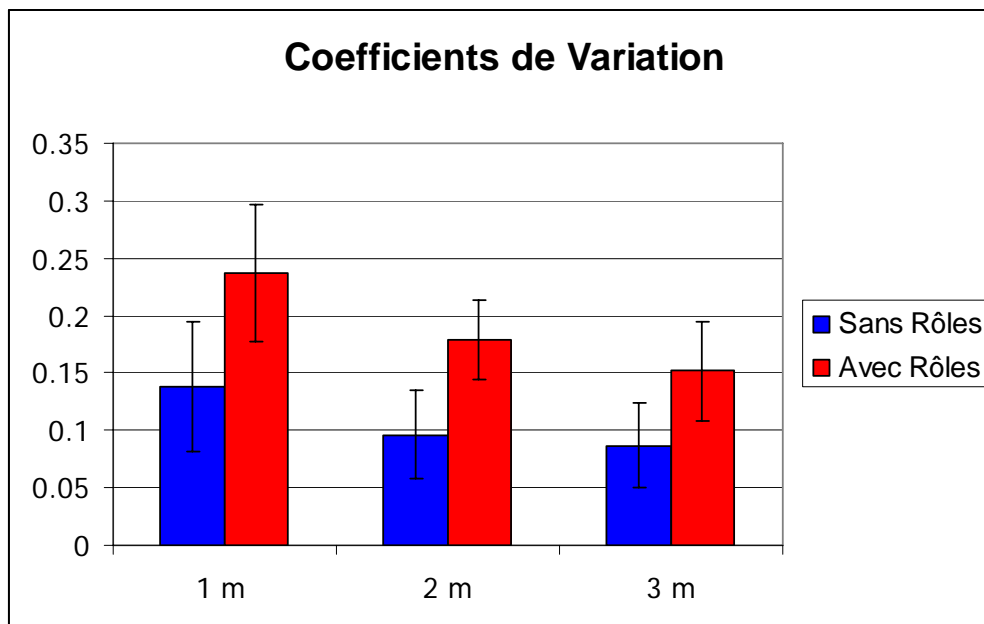


Figure 22 : graphique présentant les coefficients de variation moyens pour les escrimeurs dans les conditions expérimentales 1 m, 2 m et 3 m avec rôles et sans rôles.

Une analyse des variances (ANOVA) a également été effectuée pour comparer les résultats obtenus par les couples d'escrimeurs pour les conditions de distance initiale au sein de chaque condition de rôles.

Systématiquement, la variabilité observée pour les essais avec rôles est plus élevée ($F(1, 54) = 46.5$, $p < 0.001$) que celle pour les essais sans rôles. Ceci montre que le sujet mené ne parvient pas à contrebalancer parfaitement les mouvements du sujet meneur.

Nous observons des différences significatives entre les conditions de distances ($F(2, 108) = 53.2$, $p < 0.001$) avec des variabilités moindres lorsque la condition de distance augmente. En particulier la condition 1 m est différente des deux autres (test post hoc de Scheffé, $p < 0.001$ dans les deux cas). Par contre, il n'y a pas de différence entre 2 m et 3 m ($p = 0.99$)

Nous observons également des différences significatives entre les distances et les conditions de rôles ($F(2, 108) = 285.9, p < 0.001$).

Par ailleurs, nous observons également des différences significatives entre les couples de sujets ($F(5, 54) = 26.102, p < 0.001$) et entre les couples, les distances et les conditions de rôles ($F(10, 108) = 3.2721, p < 0.001$).

(2) Judokas

Un test de Student sur des échantillons indépendants (12 essais par condition de distance pour les essais sans rôles et 24 essais par condition de distance pour les essais avec rôles) a été effectué sur les coefficients de variation calculés à partir des moyennes individuelles et de leur écart type. Les résultats sont présentés dans la Figure 23. Ce test montre une similitude des variations entre la condition 1 m sans rôles et la condition 1 m avec rôles ($t = -1.69, p = 0.099$) et entre la condition 2 m sans rôles et la condition 3 m avec rôles.

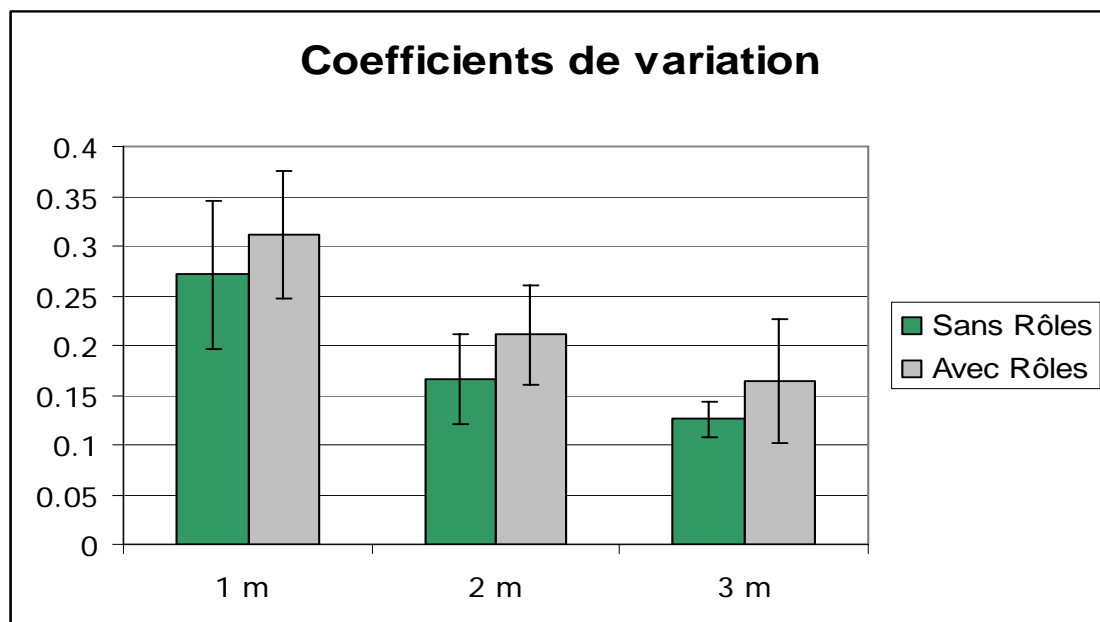


Figure 23 : graphique présentant les coefficients de variation moyens pour les judokas dans les conditions expérimentales 1 m, 2 m et 3 m avec rôles et sans rôles.

Une analyse des variances (ANOVA) a également été effectuée pour comparer les résultats obtenus par les couples de judokas pour les conditions de distance initiale au sein de chaque condition de rôles.

Contrairement aux escrimeurs, la variabilité observée pour les essais avec rôles n'est plus élevée ($F(1, 8) = 0.00514, p = 0.9446$) que celle des essais avec rôles.

Nous observons des différences significatives entre les conditions de distances ($F(2, 16) = 12.176, p < 0.001$) avec des variabilités moindres lorsque la condition de distance augmente. En particulier la condition 3 m est différente des deux autres (test post hoc de Scheffé, $p < 0.001$ et $p < 0.05$). Par contre, il n'y a pas de différence entre 1 m et 2 m ($p = 0.36$)

Nous observons également des différences significatives entre les distances et les conditions de rôles ($F(2, 16) = 70.402, p < 0.001$).

Par ailleurs, nous observons également des différences significatives entre les couples de sujets et les conditions de rôles ($F(3, 8) = 5.3933, p < 0.05$).

c) Description des délais temporels associés au degré de corrélation entre deux personnes

Nous avons choisi de calculer les délais temporels sur les essais avec rôles par une méthode d'inter corrélation. Cette procédure calcule un coefficient de corrélation (r) pour chaque décalage de temps. Ainsi, nous estimons que lorsque la corrélation est optimale (la plus élevée) les tracés de position des sujets sur la piste sont superposables. Le déplacement de mené correspond alors au déplacement du meneur à un délai temporel près.

La Figure 24 illustre une fonction d'inter corrélation (courbe magenta). Dans cet exemple, la fonction d'inter corrélation calcule le coefficient de corrélation pour chaque décalage du tracé du mené (courbe rouge) par rapport au tracé du meneur (courbe bleue). La corrélation maximale vaut $r = 0.939$, le délai est alors estimé à -0.299 s. Il faudrait donc avancer la courbe rouge de 300 ms pour que les courbes de déplacement du meneur et du mené soient corrélées à 94 %.

La Figure 25 montre une portion agrandie de la fonction d'inter corrélation dans sa partie centrale (autour du pic).

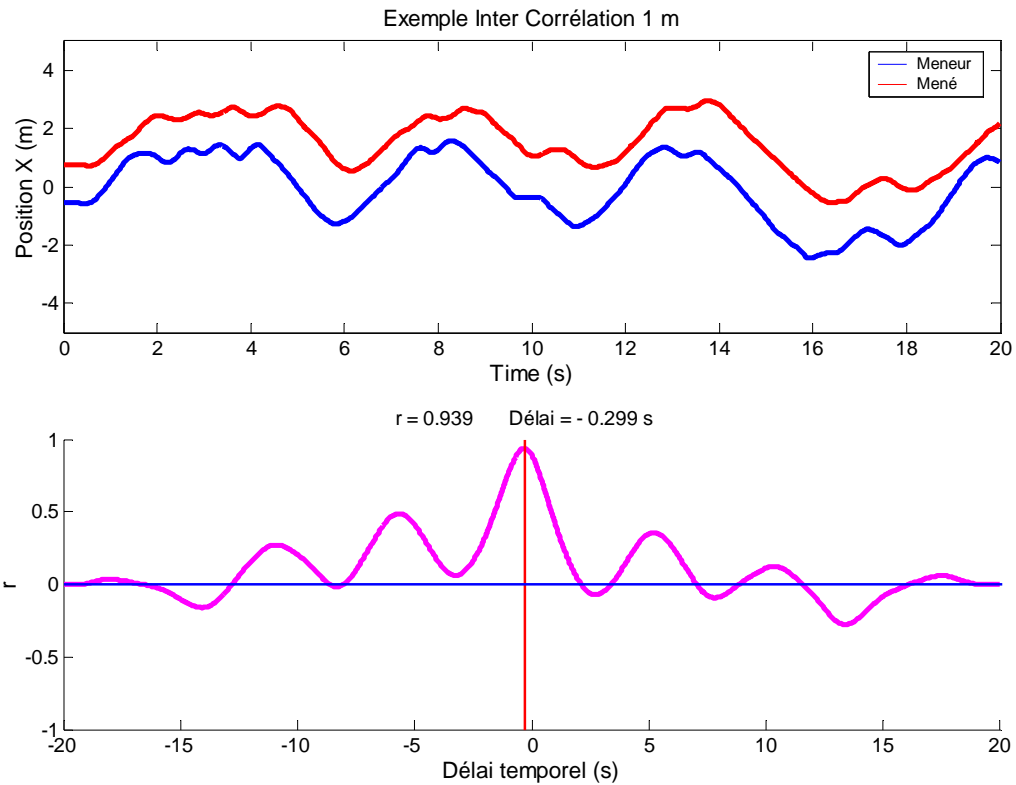


Figure 24 : exemple de tracé d'inter corrélation (magenta) pour un couple de judokas dans la condition 1 m. Dans cet exemple, si l'on décale la courbe de déplacement du mené de 0.299 s, les courbes sont corrélées à 93.4 %.

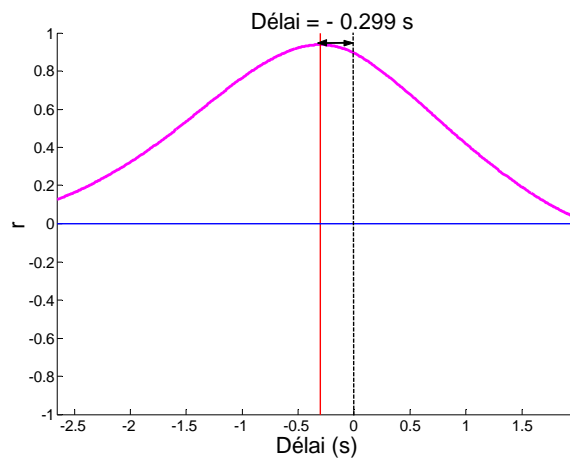


Figure 25 : zoom de la courbe d'inter corrélation de la Figure 24 autour du pic de corrélation. Le délai est estimé sur la date de survenue du pic.

(1) Résultats obtenus par les escrimeurs

Pour chaque essai des conditions avec rôles nous avons relevés les délais temporels séparant les sujets ainsi que les coefficients de corrélation associés.

Une analyse de variance (ANOVA) est effectuée afin de comparer les couples, les distances initiales et les sujets tenant le rôle de meneur au sein du couple.

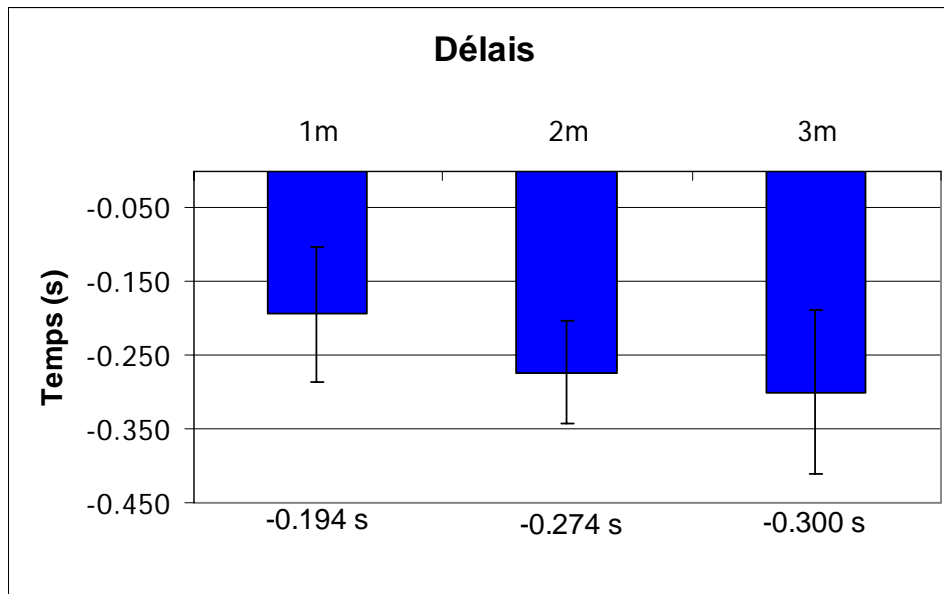


Figure 26 : Délais temporels obtenus par les escrimeurs dans les conditions 1 m, 2 m et 3 m des essais avec rôles.

La Figure 26 montre les différences significatives entre les délais calculés pour les distances ($F(2, 60) = 40.1, p < 0.001$). Plus les conditions de distance augmentent et plus les délais sont importants (-0.194 ± 0.090 s, -0.274 ± 0.070 s et -0.300 ± 0.111 s, respectivement pour les conditions 1 m, 2 m et 3 m). En particulier, la condition 1 m est différente des deux autres (test de Scheffé, $p < 0.001$ dans les deux cas). Par contre, nous n'observons pas de différence entre les conditions 2 m et 3 m ($p = 0.1172$).

En outre, changer de rôle au sein d'un couple change le délai ($F(5, 30) = 12.474, p < 0.001$). Un couple en particulier est représentatif de ce phénomène ($p < 0.005$).

Nous observons également des différences significatives entre les couples ($F(5, 30) = 22.290, p < 0.001$).

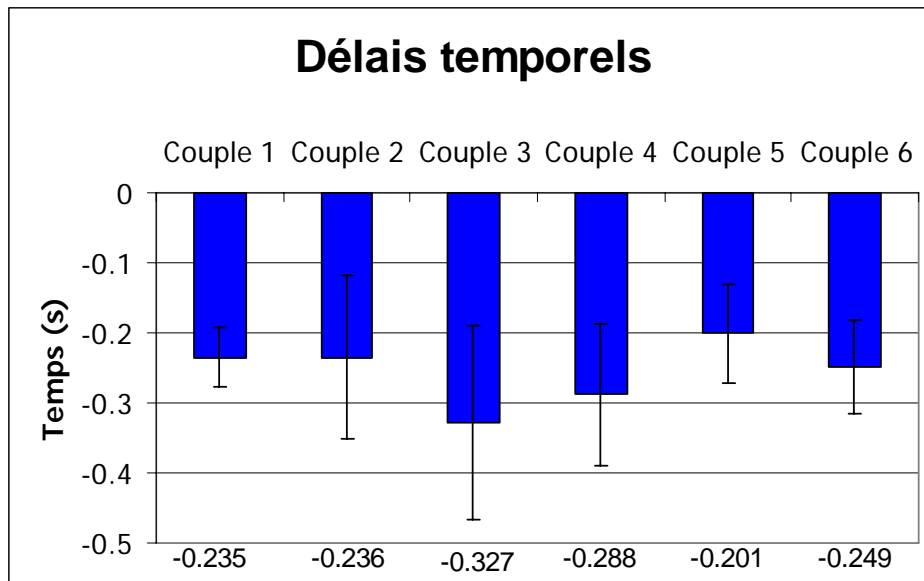


Figure 27 : moyennes des délais temporels calculés pour chaque couple d'escrimeurs .

Le couple 3 est statistiquement différent des couples 1, 2, 5 et 6 ($p < 0.001$ pour les quatre différences). Le couple 4 est différent des couples 1, 2 ($p < 0.05$) et 5 ($p < 0.001$).

Pour comparer les coefficients de corrélation, nous effectuons une transformée de Fischer (z de Fischer) afin de réaliser une analyse de variance (ANOVA) sur ces derniers.

Les coefficients de corrélations présentent des différences significatives ($F(2, 60) = 79.605$, $p < 0.001$) selon les conditions de distance (0.96 ± 0.04 , 0.94 ± 0.04 et 0.88 ± 0.10 , respectivement pour les conditions 1 m, 2 m et 3 m). En d'autres termes, plus la distance est importante et moins les déplacements sont bien corrélés.

Les couples présentent également des différences significatives ($F(5, 30) = 6.97$, $p < 0.001$). Les résultats sont montrés sur la Figure 28. Les sujets composant le couple n°2 ont un comportement mieux corrélé que les couples n°1 ($p < 0.005$) et n°5 ($p < 0.05$).

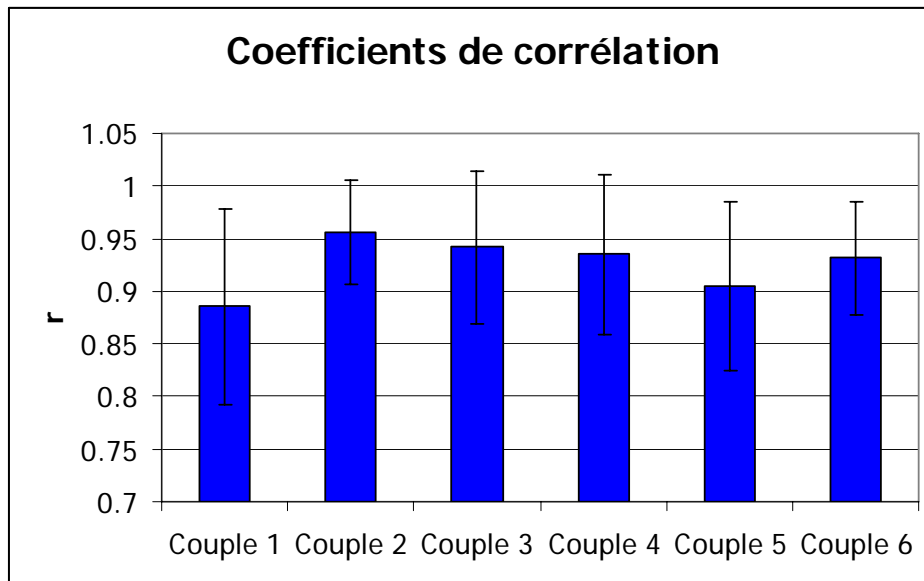


Figure 28 : moyennes des coefficients de corrélation calculés pour chaque couple d'escrimeurs

Le changement des rôles au sein des couples modifie le degré de corrélation entre le sujet meneur et le sujet mené ($F(5, 30) = 5.90, p < 0.001$).

(2) Résultats obtenus par les judokas

Les délais temporels ne présentent pas de différences significatives selon les conditions de distance ($F(2, 16) = 0.526, p = 0.6$) comme le montre la Figure 29. Il semble alors que les judokas réagissent toujours avec le même délai quelle que soit la distance qui les sépare de leur partenaire (adversaire).

Nous remarquons une effet général ($F(1, 8) = 14.38, p < 0.01$) lié au changement de rôle (tous les couples et les distances confondus) mais nous n'observons pas ce phénomène au sein des couples ($F(3, 8) = 3.11, p = 0.089$).

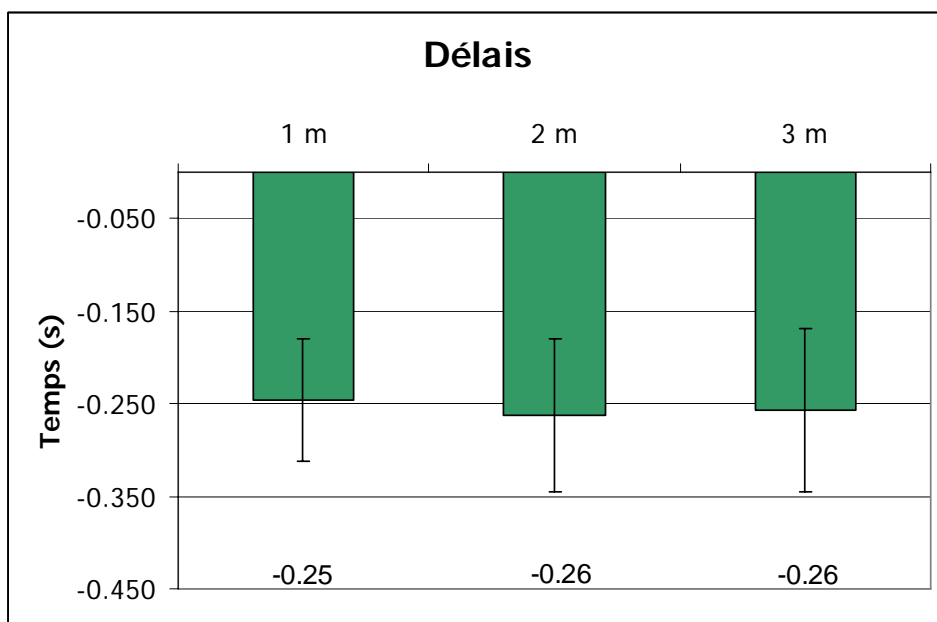


Figure 29 : Délais temporels obtenus par les judokas dans les conditions 1 m, 2 m et 3 m des essais avec rôles.

L'analyse des coefficients de corrélation montre par contre des différences significatives entre les conditions de distance ($F(2, 16) = 44.111, p < 0.001$). En effet, les coefficients de corrélation obtenus dans chaque condition de distance sont différents de ceux obtenus dans les deux autres conditions ($p < 0.001$). Plus la distance est grande et moins les déplacements sont bien corrélés.

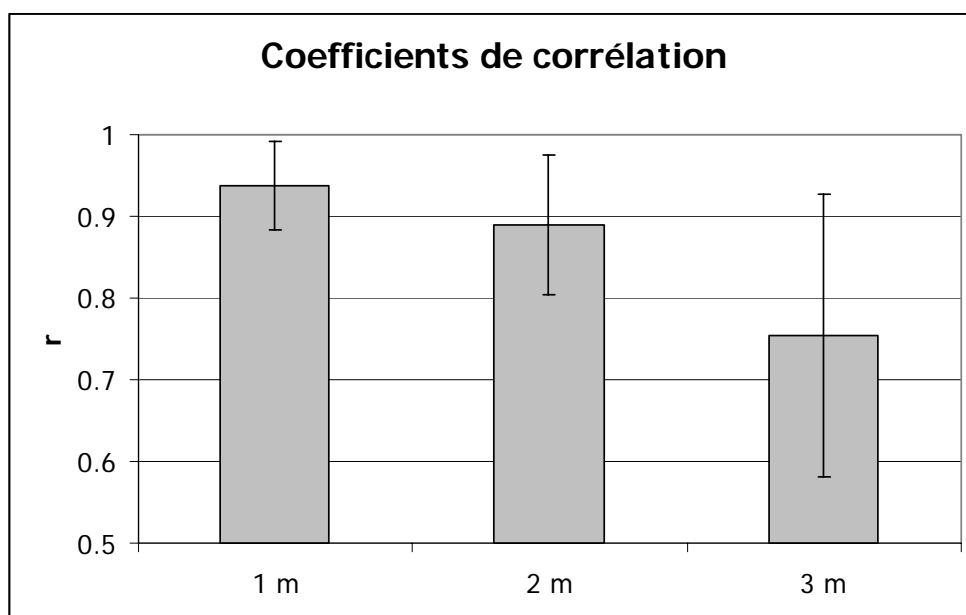


Figure 30 : Coefficients de corrélation obtenus par les judokas dans les conditions 1 m, 2 m et 3 m lors des essais avec rôles.

Nous observons des différences entre les couples ($F(3, 8) = 9.47, p < 0.01$). Sur la Figure 31 nous remarquons que le couple n°2 présente des différences avec les couples n°3 ($p < 0.05$) et n°4 ($p < 0.05$), et que le couple n°1 est différent du couple n°3 ($p < 0.05$).

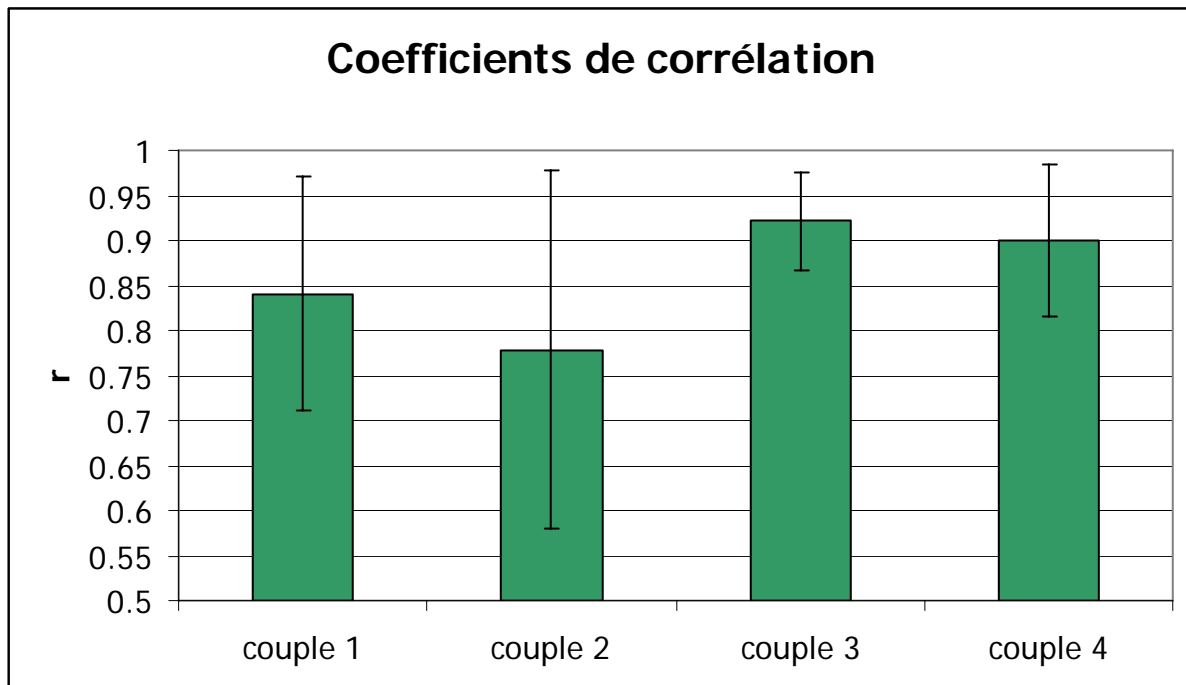


Figure 31 : Coefficients de corrélation pour les couples de judokas.

Par ailleurs, le fait de changer de rôle modifie le degré de corrélation ($F(1, 8) = 7.095, p < 0.05$). Nous n'observons pas d'effet d'interaction entre les couples et le changement de rôle.

d) Distance parcourue par les sujets au cours des essais

La distance parcourue correspond à la distance cumulée par chacun des deux sujets. Nous nous intéressons à ce paramètre car nous pensons que pour respecter la consigne de maintien de distance, le sujet mené doit parcourir à chaque instant la même distance que le sujet meneur.

La Figure 32, la Figure 33 et la Figure 34 montrent des exemples de l'évolution de la distance parcourue par chacun des deux sujets au cours du temps. Lors de l'analyse suivante, nous nous concentrerons sur les valeurs finales (distance totale parcourue à la fin de chaque essai).

Meneur : 21.33 m Mene : 19.08 m

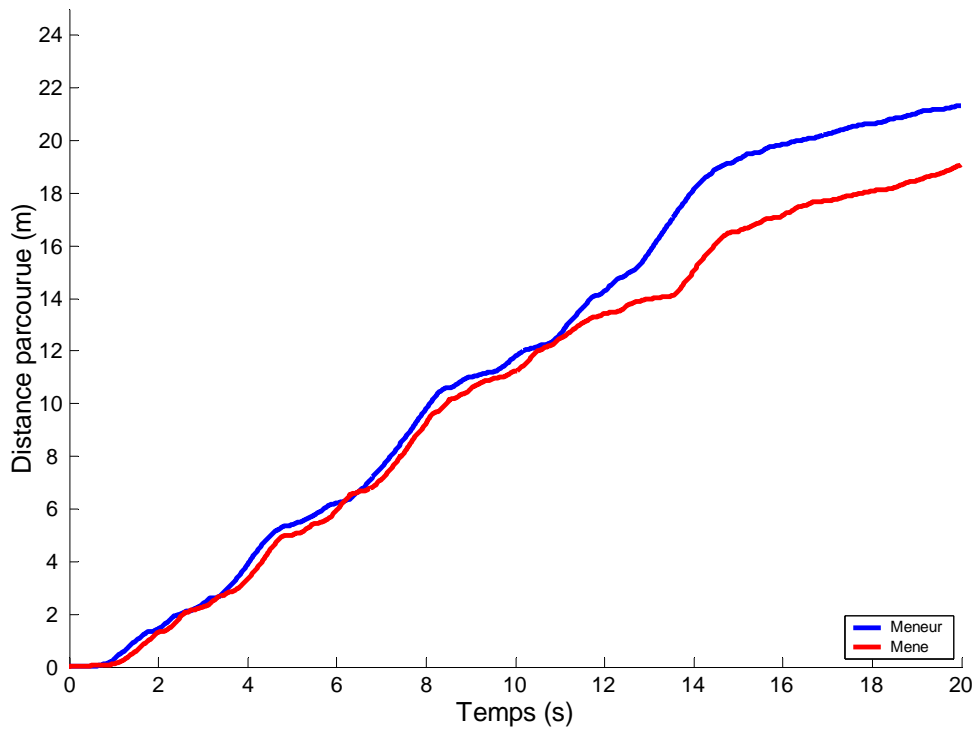


Figure 32 : Exemple de distance parcourue au cours du temps par un couple de judokas pour une condition 1 m.

Meneur : 27.31 m Mene : 24.17 m

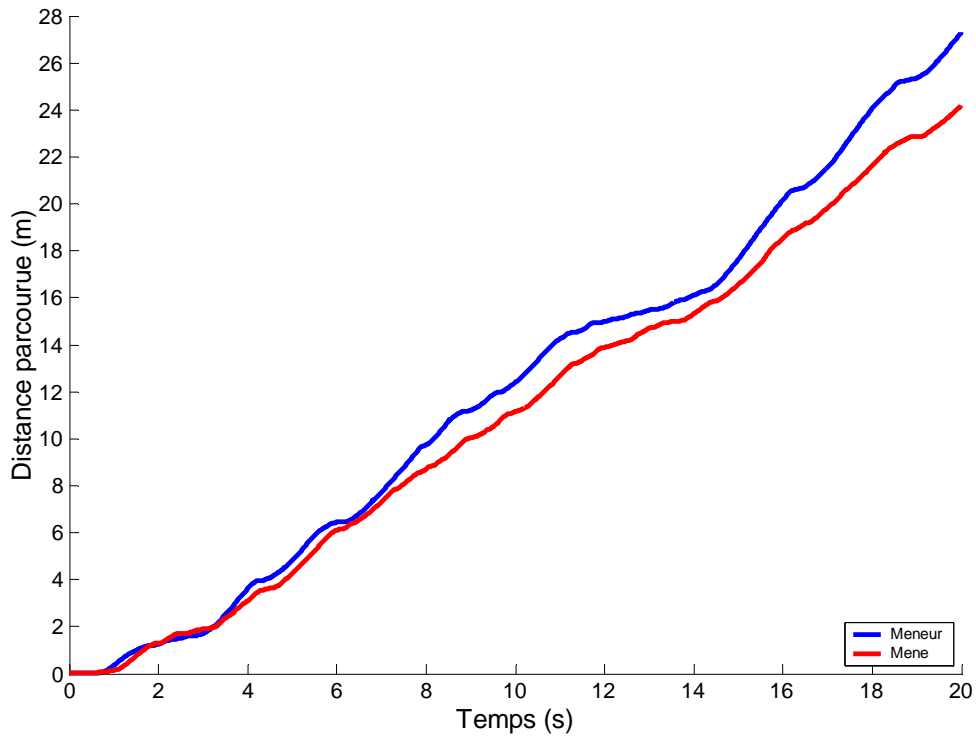


Figure 33 : Exemple de distance parcourue au cours du temps par un couple de judokas pour une condition 2 m.

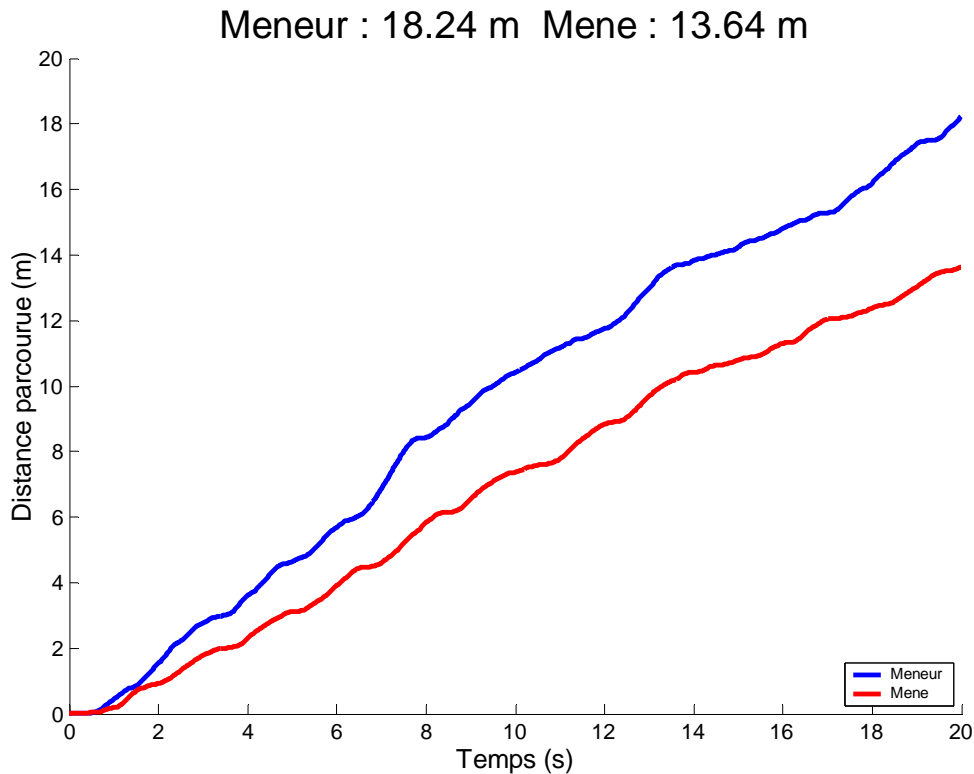


Figure 34 : Exemple de distance parcourue au cours du temps par un couple de judokas pour une condition 3 m.

(1) Les escrimeurs

Au cours de notre analyse, nous relevons que, dans l'ensemble, la distance parcourue par le meneur est supérieure à celle parcourue par le mené ($F(1, 66) = 43.802, p < 0.001$) avec respectivement 19.43 ± 3.92 m contre 18.25 ± 3.65 m. Cette différence se confirme avec l'interaction du rôle joué par chacun des sujets au sein du couple et de la condition de distance ($F(2, 132) = 54.586, p < 0.001$). Cependant (Figure 35), la condition 1 m ne présente pas cette caractéristique ($p = 0.99$) alors que les conditions 2 m et 3 m se différencient à $p < 0.001$.

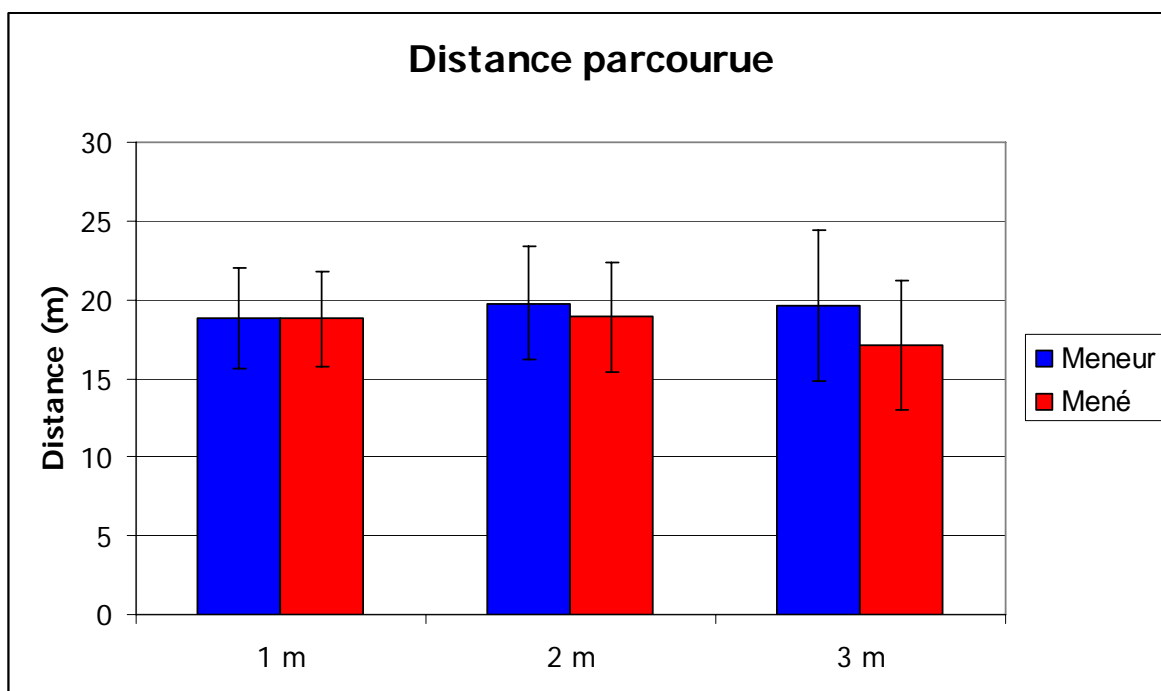


Figure 35 : Distance parcourue par les escrimeurs pour les conditions de distance 1 m, 2 m et 3 m.

Les couples (Figure 36) ne parcourent pas la même distance ($F(5, 66) = 23.698$, $p < 0.001$) avec des différences entre les couples 1, 2 et 3, 1 et 6, 2, 4 et 5, 3 et 4, 3 et 5, 4 et 6, 5 et 6 ($p < 0.001$).

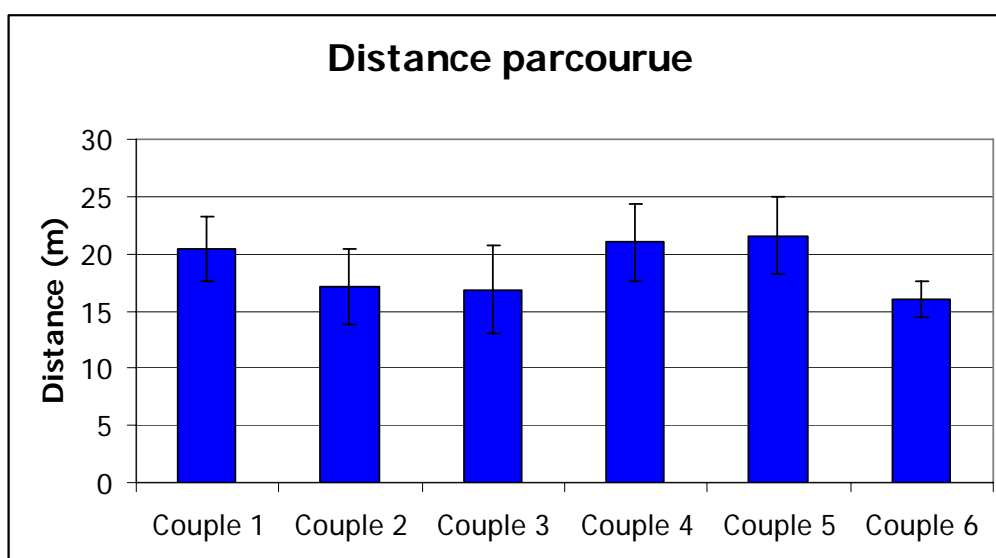


Figure 36 : Distance parcourue par les couples d'escrimeurs.

Au sein des couples nous observons des différences significatives entre la distance parcourue par le meneur et la distance parcourue par le mené ($F(5, 66) = 6.56$, $p < 0.0001$), en

particulier pour le couple 5 ($p < 0.001$) où le meneur parcourt en moyenne 23.06 ± 3.32 m et le mené 20.13 ± 2.95 m.

Nous observons également des différences significatives (Figure 37) liées aux distances initiales ($F(2, 132) = 3.22, p < 0.05$) où en particulier la distance parcourue pour la condition expérimentale 2 m est différente de celle de la condition expérimentale 3 m ($p < 0.05$).

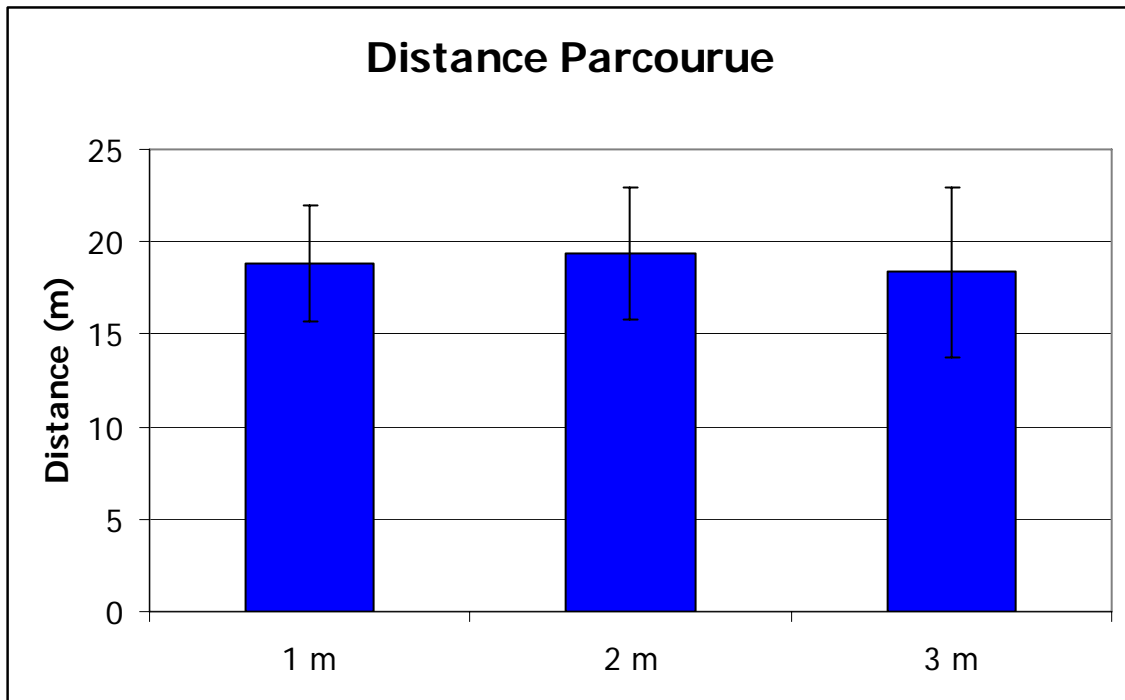


Figure 37 : distance parcourue par les escrimeurs pour les trois conditions expérimentales.

(2) Les judokas

Au cours de notre analyse, nous relevons que, dans l'ensemble, la distance parcourue par la meneur est supérieure à celle parcourue par le mené ($F(1, 20) = 196.31, p < 0.001$) avec respectivement 20.74 ± 2.96 m contre 17.67 ± 2.62 m. Cette différence (Figure 38) se confirme avec l'interaction du rôle joué par chacun des sujets au sein du couple et de la condition de distance ($F(2, 40) = 3.41, p < 0.05$).

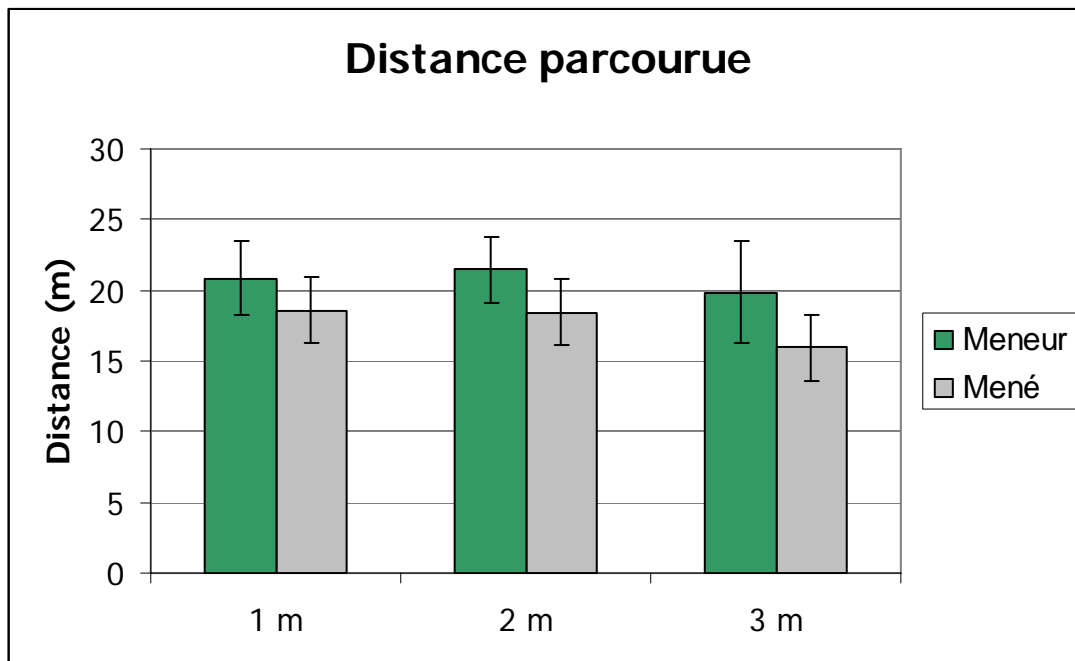


Figure 38 : distance parcourue par les judokas pour les conditions de distance 1 m, 2 m et 3 m.

Les couples (Figure 39) ne parcourent pas la même distance ($F(3, 20) = 21.83$, $p < 0.001$) avec des différences pour le couple n°2 et les trois autres ($p < 0.001$).

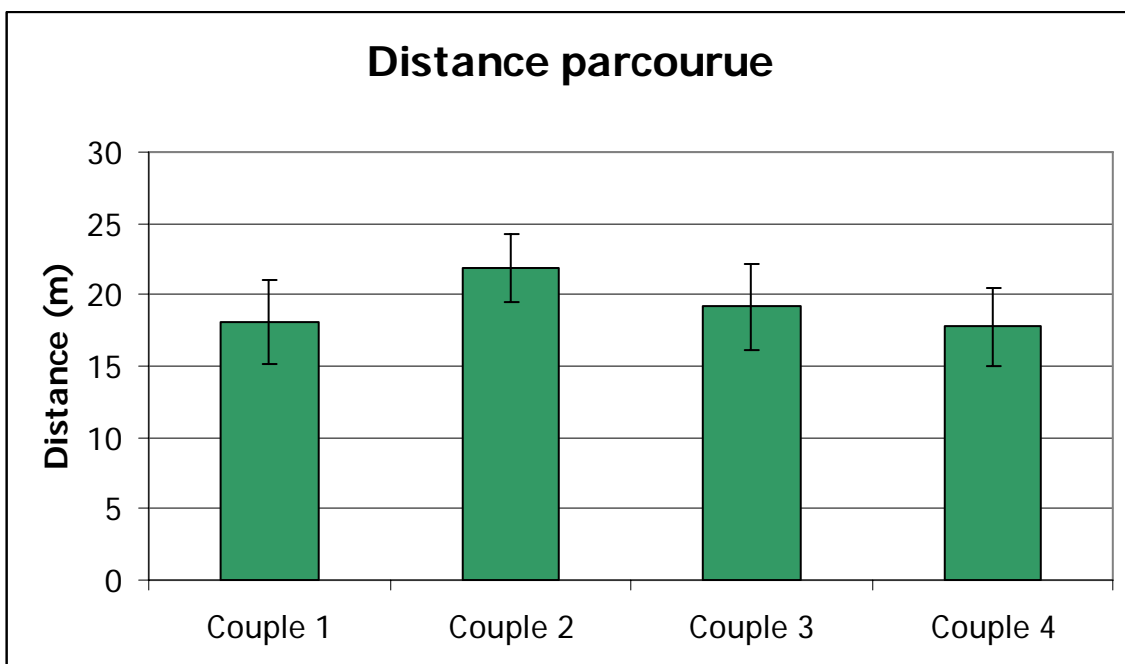


Figure 39 : Distance parcourue par les couples de judokas.

Au sein des couples nous observons des différences significatives entre la distance parcourue par le meneur et la distance parcourue par le mené ($F(3, 20) = 5.60$, $p < 0.001$).

Nous observons également des différences significatives (Figure 40) liées aux distances initiales ($F(2, 40) = 9.52, p < 0.0005$) où en particulier la distance parcourue pour la condition expérimentale 3 m est différente de celles parcourues dans les deux autres ($p < 0.005$).

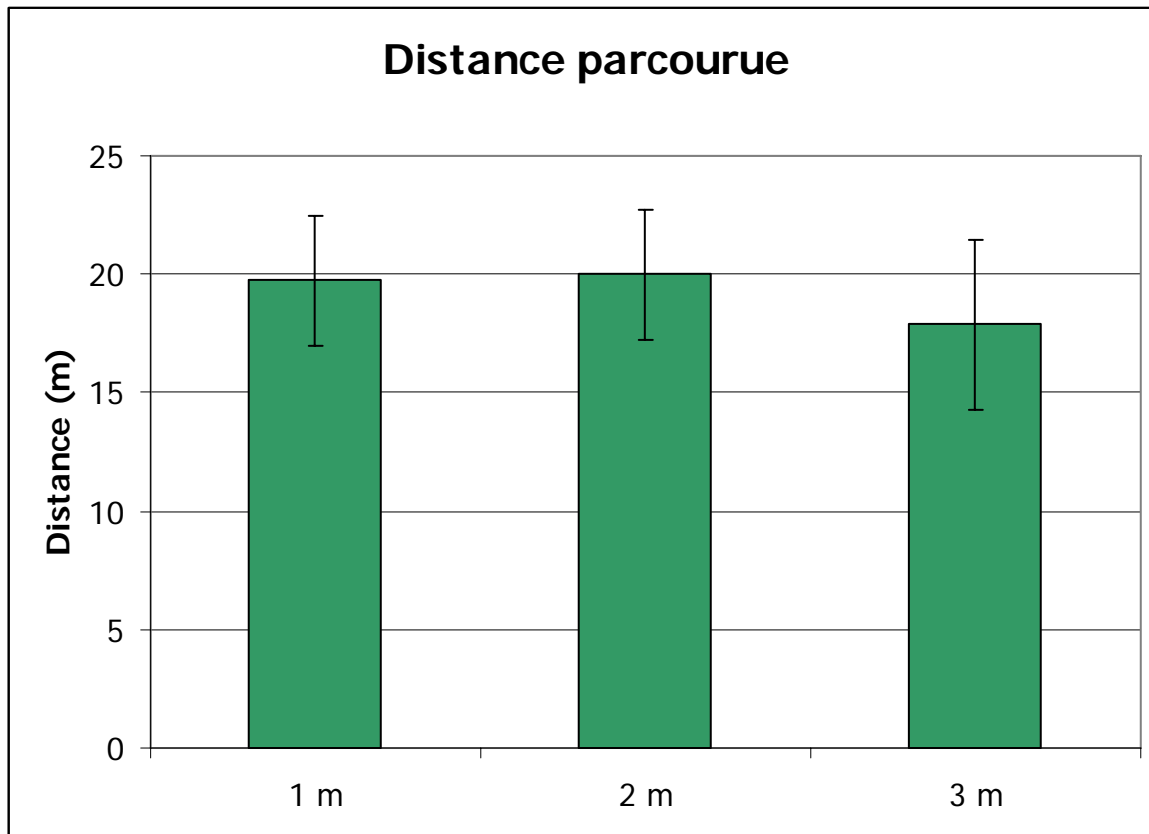


Figure 40 : distance parcourue par les judokas pour les trois conditions expérimentales.

IV. Conclusion

Nos résultats sont encourageants malgré l'extrême difficulté de la question. En effet, il est encore, à l'heure actuelle, prématuré de porter des conclusions hâtives sur nos résultats. Cependant, les observations que nous avons faites ne semblent pas liées au hasard et seraient probablement le résultat d'un dialogue comportemental entre deux personnes. Une analyse dynamique, au sens scientifique du terme, enrichirait davantage la compréhension des mécanismes mis en jeu lors des interactions.

D'autre part, il semble que les deux populations expertes des sports de combat fonctionnent selon des mécanismes différents, liés aux disciplines elles-mêmes et à leurs méthodes d'apprentissage.

De nombreuses captures de mouvement restent à faire. Cette première partie a été possible par l'utilisation complète de la première partie du financement alloué à ce projet (capture de mouvement, traitement). C'est pourquoi nous sollicitons le versement de la deuxième partie du financement pour cette année 2005 afin de poursuivre, finaliser et clore cette étude.

V. Bibliographie

Bailenson, J. N., Blascovich, J. J., Beall, A. C., & Loomis, J. M. (2003). Interpersonal distance in immersive virtual environments. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 29, 1-15.

Bernstein, N. (1967). *The Coordination and Regulation of Movements*. Pergamon Press.

Bonnard, M. & Pailhous, J. (1989). Contribution du flux visuel au contrôle locomoteur. *Psychologie Française*, 34-1, 63-70.

deRugy, A., Montagne, G., Buekers, M. J., & Laurent, M. (2000a). The control of human locomotor pointing under restricted informational conditions. *Neuroscience Letters*, 281,2-3, 87-90.

deRugy, A., Montagne, G., Buekers, M. J., & Laurent, M. (2000b). The study of locomotor pointing in virtual reality: The validation of a test set-up. *Behav.Res Method.Instrum.Comp.2000.NOV;32(4):515-520.*, 32, 515-520.

deRugy, A., Montagne, G., Buekers, M. J., & Laurent, M. (2002). Temporal information for spatially constrained locomotion. *Experimental Brain Research*, 146, 129-141.

Ducourant, T., Vieilledent, S., & Berthoz, A. Timing and distance characteristics of interpersonal coordination during locomotion. *Neuroscience Letters*, (in press).

Ducourant, T., Vieilledent, S., Freslier, M., & Berthoz, A. (2004). Temporal delays during locomotor interactions between Human subjects. *Journal of Vestibular Research*, 14, 236-237.

Dutra, M. S., De Pina Filho, A. C., & Romano, V. F. (2003). Modeling of a bipedal locomotor using coupled nonlinear oscillators of Van der Pol. *Biol.Cybern.*, 88, 286-292.

Freslier, M., Ducourant, T., Slotine, J. J., Flash, T., & Berthoz, A. (2004). Modeling of the interaction between two subjects maintaining a constant distance during locomotion: a mathematical approach with Van der Pol oscillators. *Journal of Vestibular Research*, 14, 265-266.

Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world*. Boston: Houghton-Mifflin.

Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to the visual perception*. Boston: Houghton-Mifflin.

Golani, I. (1992). A mobility gradient in the organization of vertebrate movement: The perception of movement through symbolic language. *Behavioral and Brain Sciences*, 15, 249-308.

Golani, I. & Moran, G. (1983). A mobility-immobility gradient in the behavior of the "inferior" wolf during "ritualized fighting". In J.F.Eisenberg & D. G. Keeiman (Eds.), *Advances in the study of mammalian behavior*. (pp. 65-94). Special Publ. N° 7. Am. Soc. Mammal.

Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51, 347-356.

Hall, E. T. (1966). *The hidden dimension*. New York: Doubleday.

Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 246, R1000-R1004.

Kelso, J. A. S. (1997). Relative timing in brain and behavior: Some observations about the generalized motor program and self-organized coordination dynamics. *Human Movement Science, 16*, 453-460.

Kelso, J. A. S., Holt, K. G., Rubin, P., & Kugler, P. N. (1981). Patterns of human interlimb coordination emerge from the properties of non-linear, limit cycle oscillatory processes: theory and data. *Journal of Motor Behavior, 13*, 226-261.

Kerzel, D., Hecht, H., & Kim, N. G. (2001). Time-to-passage judgements on circular trajectories are based on relative optical acceleration. *Perception and Psychophysics, 63*(7), 1153-1170.

Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception, 5*, 437-459.

Lee, D. N. & Aronson, E. (1974). Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Perception and Psychophysics, 15*, 529-532.

Lee, D. N., Lishman, J. R., & Thomson, J. A. (1982). Regulation of gait in long jumping. *Journal of Experimental Psychology, 3*, 448-457.

Lee, D. N. & Reddish, P. E. (1981). Plummeting gannets: a paradigm of ecological optics. *Nature, 293*, 293-294.

Lee, D. N., Young, D. S., & Rewt, D. (1992). How do somersaulters land on their feet? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 18*, 4, 1195-1202.

Montagne, G., Buekers, M. J., deRugy, A., Camachon, C., & Laurent, M. (2002). Control of human locomotion under various task constraints. *Experimental Brain Research*, *143*, 133-136.

Moran, G., Fentress, J. C., & Golani, I. (1981). A description of relational patterns of movement during "ritualized fighting" in wolves. *Animal Behavior*, *29*, 1146-1165.

Rammani, N. & Miall, R. C. (2004). A system in the human brain for predicting the actions of others. *Nature Neuroscience*, *7*, 85-90.

Redlick, F. P., Jenkin, M., & Harris, L. R. (2001). Humans can use optic flow to estimate distance of travel. *Vision Research*, *41*, 213-219.

Schmidt, R. C., Bienvenu, M., Fitzpatrick, P. A., & Amazeen, P. G. (1998). A comparison of intra- and interpersonal interlimb coordination: coordination breakdowns and coupling strength. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *24*,3, 884-900.

Schmidt, R. C., Carello, C., & Turvey, M. T. (1990). Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *16*,2, 227-247.

Schmidt, R. C., O'Brien, B., & Sysko, R. (1999). Self-organization of between-persons cooperative tasks and possible applications to sport. *International Journal of Sport Psychology*, *30*, 558-579.

Schoner, G. & Kelso, J. A. S. (1988). Dynamic pattern generation in behavioral and neural systems. *Science*, *239*, 1513-1520.

Sebanz, N. & Frith, C. (2004). Beyond simulation? Neural mechanisms for predicting the actions of others. *Nature Neuroscience*, 7, 5-6.

Swinnen, S. P. (2002). Intermanual coordination: from behavioural principles to neural-network interactions. *Nature Reviews Neuroscience*, 3, 348-359.

Temprado, J. J. & Laurent, M. (2004). Attentional load associated with performing and stabilizing a between-persons coordination of a rhythmic limb movements. *Acta Psychologica*, 115, 1-16.

Wann, J. P. & Land, M. (2000). Steering with or without the flow : is the retrieval of heading necessary ? *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 319-324.

Warren, W. H., Kay, B. A., Zosh, W. D., Duchon, A. P., & Sahuc, S. (2001). Optic flow is used to control human walking. *Nature Neuroscience*, 4(2), 213-216.

Warren, W. H., Young, D. S., & Lee, D. N. (1986). Visual control of step length during running over irregular terrain. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12(3), 259-266.

Wiesendanger, M., Kazennikov, O., Perrig, S., & Kaluzny, P. (1996). Two hands - one action. The problem of bimanual coordination. In A.Wing, P. Haggard, & R. Flanagan (Eds.), *Hand and Brain* (pp. 283-300). Oxford: Oxford University Press.

Yaniv, Y. & Golani, I. (1987). Superiority and inferiority: a morphological analysis of free and stimulus bound behavior in honey badger (*Mellivora capensis*) interactions. *Ethology*, 74, 89-116.