



HAL
open science

L'UTILISATION D'UN DISQUE PLUS LEGER A L'ENTRAINEMENT ALTERE T-ELLE LA TECHNIQUE GESTUELLE ?

Daniel Dinu, Françoise Natta, Jean-Michel Lévêque, Henry Vandewalle,
Portero Pierre, Michel Tranchant

► **To cite this version:**

Daniel Dinu, Françoise Natta, Jean-Michel Lévêque, Henry Vandewalle, Portero Pierre, et al..
L'UTILISATION D'UN DISQUE PLUS LEGER A L'ENTRAINEMENT ALTERE T-ELLE LA
TECHNIQUE GESTUELLE ?. [Rapport de recherche] INSEP. 2005. hal-01845136

HAL Id: hal-01845136

<https://insep.hal.science//hal-01845136>

Submitted on 20 Jul 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.



DÉPARTEMENT DES SCIENCES DU SPORT
Laboratoire de Biomécanique et Physiologie

Dinu Daniel
Rapport de recherche

**L'UTILISATION D'UN DISQUE PLUS LEGER A L'ENTRAINEMENT
ALTERE T-ELLE LA TECHNIQUE GESTUELLE ?**

**Collaborateurs scientifiques : Natta Françoise¹, Levêque Jean-Michel², Vandewalle Henry³
Portero Pierre⁴; Collaborateur fédéral : Tranchant Michel⁵**

¹ Laboratoire Mouvement Action et Performance - INSEP, ² Laboratoire de Biomécanique et
Physiologie - INSEP, ³ Département de la Formation - INSEP, ⁴ Université Paris XII

⁵ Fédération Française d'Athlétisme



SOMMAIRE

Résumé	3
Chapitre 1 - Etat de l'art.....	4
1.1 Introduction générale	4
1.2 Analyse du mouvement du système athlète-engin à l'intérieur de l'aire de lancer	6
1.2.1 Introduction.....	6
1.2.2 Phase de départ en double appui.....	8
1.2.3 Phase de départ en simple appui	8
1.2.4 Phase aérienne.....	9
1.2.5 Phase finale en simple appui	9
1.2.6 Phase finale en double appui.....	10
1.3 Conditions initiales optimales de la trajectoire du disque après le lâcher	11
1.3.1 Paramètres d'éjection propres au disque	12
1.3.2 Facteurs environnementaux (vitesse du vent).....	14
1.3.3 Comparaison entre les performances théorique et réelle.....	14
1.3.4 Conclusion	15
1.4 Objectifs de la recherche.....	17
Chapitre 2 - Plan Expérimental et Protocole.....	18
2.1 Introduction.....	18
2.2 Population	18
2.3 Etapes expérimentales.....	18
Chapitre 3 - Approche Historique de la Technique Vidéographique	20
3.1 Introduction.....	20
3.2 Etude du mouvement en trois dimensions	21
3.2.1 Principe de reconstruction 3D.....	21
Chapitre 4 - Matériel et Méthode.....	24
4.1 Matériel vidéographique	24
4.2 Matériel et méthode de détection et d'enregistrement de l'activité électromyographique	25
4.3 Système de synchronisation	27
4.4 Méthodes utilisées dans les protocoles d'enregistrement des données Vidéo-EMG.....	28
4.4.1 Protocole d'enregistrement des données	28
4.4.2 Protocole d'enregistrements vidéo	29
4.4.3 Traitement des données mécaniques.....	31
4.4.4 Traitement des données électromyographiques.....	32
4.4.5 Traitement statistique.....	32
Chapitre 5 - Résultats.....	33
5.1 Cinématique du disque.....	33
5.2 Plan d'excitation musculaire des muscles de la ceinture scapulaire - Evaluation des niveaux d'activation musculaire	35
5.2.1 Chronologie des actions musculaires pour un lancer avec les deux conditions de masse (1,7 kg vs 2 kg)	35
5.2.2 Comparaison des actions musculaires dans les deux conditions de lancer	39
5.2.3 Analyse quantitative de quantités électriques (EMG _{in} /dt) avec les deux conditions de masse (1,7 kg vs 2 kg)	41
5.3 Discussion	44
5.4 Conclusion	45
3.5 Références.....	46

RESUME

Introduction.- Le but de cette étude est d'analyser l'influence de la masse du disque (1,7 vs 2 kg) sur les paramètres cinématiques et l'activité des muscles de la ceinture scapulaire au cours du lancer. Les techniques employées sont l'analyse vidéo 3D et l'électromyographie de surface (sEMG).

Méthodes et résultats. -7 lanceurs de haut niveau (âgés de 23 ± 3 ans, poids de 108 ± 19 kg, taille de 190 ± 6 cm, performance personnelle de 57 ± 3 m) ont participé à l'étude. Les enregistrements des données cinématiques ont été réalisés au moyen de trois caméras numériques, (Panasonic AG-455, 50 Hz), permettant de reconstruire le mouvement en trois dimensions. L'activité électromyographique de surface (sEMG) de 5 muscles a été enregistrée à l'aide d'un appareil numérique embarqué (ME3000P8). L'analyse cinématique a montré que la durée absolue et relative des différentes phases de lancer et de l'ensemble du jet est la même pour les deux masses, du disque (1,7 vs 2 kg). Par ailleurs, la modification de la masse du disque n'a pas d'effet sur la chronologie de la mise en action des muscles de la ceinture scapulaire. En effet, pour les deux conditions de masse nous avons montré d'une part, une coopération musculaire au début du geste entre le *Trapezius pars descendens* et le *Deltoideus pars medialis*, et d'autre part une mise en action différenciée à la fin du geste entre le *Biceps brachii*, le *Pectoralis major*, le *Deltoideus pars anterior* et le *Trapezius pars descendens*. Enfin, les valeurs moyennes de quantités électriques (EMGin/dt) pour chacun des muscles de la ceinture scapulaire, semblent ne présenter aucune différence significative en fonction de la masse du disque.

Conclusion.- Ces résultats suggèrent qu'un disque plus léger pourrait être employé pour l'entraînement des athlètes de haut niveau sans altération cinématique du lancer. Ceci pourrait diminuer le risque de blessure lié aux contraintes mécaniques de la charge pendant des périodes d'entraînement et plus particulièrement pour des débutants.

Mots clés : lancer de disque, cinématique, électromyographie.

CHAPITRE 1 - ETAT DE L'ART

1.1 Introduction générale

La gestuelle du lanceur de disque a depuis longtemps exercé une grande fascination. De part sa complexité et son esthétisme, elle est devenue un symbole de la perfection du geste sportif immortalisé par Myron et son discobole.

Avec l'ère moderne, cette discipline, devenue olympique, a déjà été l'objet d'études émanant principalement du monde sportif. Ces analyses, s'appuyant souvent sur l'observation directe, décrivent les séquences gestuelles des lanceurs et la manière dont les meilleurs compétiteurs du moment les enchaînent (Lenz et Ward, 1985 ; Kemp, 1988 ; Reneaud, 1989). Un nombre plus restreint d'études utilisant des techniques d'investigation plus précises ont permis d'aborder l'analyse du mouvement d'un point de vue biomécanique. Dans ce contexte, il est classique d'appréhender l'étude du lancer de disque par l'analyse de la phase de vol du disque (A) et par l'étude du mouvement du système athlète-engin à l'intérieur de l'aire de lancer (B).

A - L'analyse de la phase de vol (mouvement parabolique du disque après le lâcher) a été réalisée au moyen de tests de soufflerie qui ont décrit l'action des forces gravitationnelles et aérodynamiques sur le disque (Ganslen, 1964 ; Tutjowitsch, 1976 ; Soong, 1976). Ces résultats apportent des indications sur les valeurs optimales des différents paramètres du disque au moment du lâcher (vitesse, hauteur, angle d'éjection). Ils peuvent être comparés aux résultats dynamiques donnés par Hubbard en 1989.

B - Quant au mouvement du système athlète-engin à l'intérieur de l'aire de lancer, il existe des travaux qui fournissent des résultats quantitatifs concernant essentiellement le trajet du disque pendant le tour préalable à l'éjection et à l'instant du lâcher lui-même (Schluter et Nixdorf, 1984 ; Gregor et al., 1985 ; Stepànek et Susanka, 1986 ; Susanka et al., 1988 ; Bartlett, 1990 ; Knicker, 1990 ; Lindsay, 1991). En effet, le lanceur, placé dans les conditions réglementaires, doit enchaîner des actions simultanées de rotation et de translation afin de communiquer au système « lanceur-disque » dans un premier temps, puis au disque seul dans un second temps, la plus grande vitesse possible (Dapena, 1978).

Plusieurs de ces auteurs recueillent leurs données par le moyen d'enregistrements couplés de deux caméras. Cette technique a permis d'analyser des paramètres qui concernent ainsi la vitesse, l'angle et la hauteur du disque au moment de l'éjection. Ces paramètres sont mis en rapport avec l'organisation gestuelle du lanceur, comme par exemple l'inclinaison du tronc avant

le lâcher. Néanmoins, pour rendre compte de la cinématique d'un tel mouvement qui comporte, à la fois, un déplacement en rotation et un déplacement en translation, une analyse en trois dimensions nécessitant au minimum trois caméras semble s'imposer. Une telle analyse tridimensionnelle des différents paramètres caractérisant la cinématique du lancer du disque au moment du lâcher a été faite en 1999 lors du championnat du monde d'athlétisme à Séville (Herrera & Blanco, 1999). La méthode employée dans cette étude couple des enregistrements vidéo à haute vitesse (deux caméras vidéo digitales à 125 Hz) et à basse vitesse (deux caméras vidéo analogiques à 50 Hz). Toutefois, le fait que l'expérimentation se soit effectuée en conditions de compétition n'a pas rendu possible la pose de marqueurs au niveau des articulations et a limité, de ce fait, les possibilités d'analyse et d'interprétation.

Si la technique du lancer de disque est étudiée surtout à partir de données vidéographiques, d'autres outils classiques d'analyse biomécanique ont été également utilisés. Ainsi, deux publications relatent les forces de réactions au sol à l'aide d'une plate-forme de force :

- Hoffman (1990) propose une interprétation de l'évolution temporelle de la force. En effet, pour les meilleurs lanceurs analysés dans son étude, il constate des valeurs importantes de la force de réaction au sol, lors de la phase finale en double appui. A l'inverse, pour les lanceurs les moins performants, le pic maximal de la force de réaction au sol est enregistré bien avant cette phase finale. La différence temporelle des deux pics (expert, non-expert) est estimée par l'auteur à 0,8 s.
- Ces résultats sont confirmés par Bartlett et al (1991) qui utilisent une plate-forme de force principalement comme un moyen de contrôle des distributions de la pression plantaire du pied obtenue chez un lanceur de disque employant une semelle de pression EMED.

Enfin, ces deux méthodologies (cinématique et dynamique) ont été complétées par l'étude des sollicitations musculaires, à l'aide d'enregistrements électromyographiques de surface (sEMG). Dans sa revue bibliographique sur la biomécanique du lancer de disque, Bartlett (1992) fait référence à une étude électromyographique, celle de la thèse de Finanger qui date de 1969. L'étude de Finanger a été réalisée sur quatre populations de lanceurs hommes ; pour chaque lanceur, dix muscles ont été sélectionnés. Pour Bartlett, l'interprétation des résultats de cette étude électromyographique est difficile car la validité des mesures cinématiques reste peu fiable, et la quantification de l'sEMG a été perturbée par de nombreux artéfacts sur la plupart des tracés. Il apparaît, que le nombre restreint d'études sur le lancer du disque, est dû d'une part, aux difficultés techniques rencontrées par les expérimentateurs et d'autre part, à la complexité du

geste lui-même (mouvement à haute dynamique, composé d'une translation et d'une rotation simultanées)

1.2 Analyse du mouvement du système athlète-engin à l'intérieur de l'aire de lancer

1.2.1 Introduction

En général, les scientifiques et les entraîneurs s'accordent à dire que le geste technique optimal du lanceur de disque, repose sur les principes de base de la biomécanique (Nytro, 1987).

Pour faciliter la description technique du geste de lanceur de disque, le mouvement a été divisé par phases, elles-mêmes séparées par des événements clefs relatifs aux appuis

Généralement, dans la littérature, les auteurs divisent le lancer de disque en cinq phases, précédées par un geste de mise en action préliminaire et suivies par un repositionnement du lanceur après le lâcher du disque (Bartlett, 1990).

Les différentes phases, énoncées dans l'ordre chronologique sont les suivantes (*cf. figure 1*) :

la phase de départ en double appui (Δt_{1da}),

la phase de départ en simple appui (*pivot*, Δt_{1sa}),

la phase aérienne (*volte*, Δt_s),

la phase finale en simple appui (Δt_{2sa}),

la phase finale en double appui (Δt_{2da})

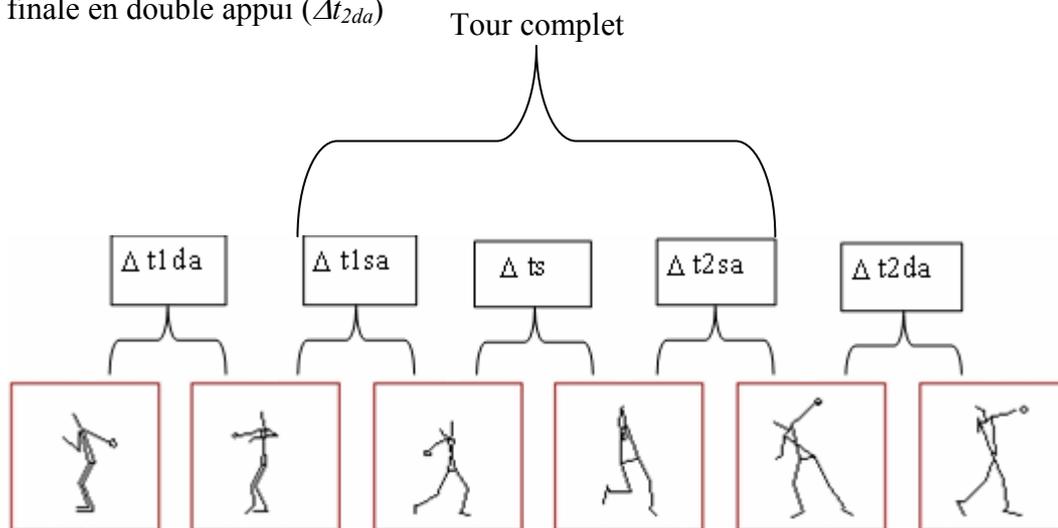


Figure 1-1 : Kinogramme illustrant les différentes phases du lancer de disque

Δt_{1da} : phase de départ en double appui ; Δt_{1sa} : phase de départ en simple appui (*pivot*) ;

Δt_s : phase aérienne ; Δt_{2sa} : phase finale en simple appui ; Δt_{2da} : phase finale en double appui.

Après une première phase sur deux appuis comportant un ou plusieurs balancés des bras, le lanceur effectue un premier demi-tour par pivotement du corps sur un appui, suivi d'une phase

aérienne, enchaînée d'un deuxième demi-tour sur le pied de réception et terminé par un troisième demi-tour par pivotement du corps, les deux appuis au sol. Les trois phases suivantes : Δt_{1sa} , Δt_s , Δt_{2sa} , constituent un tour complet de 360° effectué par le lanceur lors de son geste (Susanka et al., 1988).

Le mouvement du système athlète-engin à l'intérieur de l'aire de lancer a été étudié surtout sur deux aspects : la durée des différentes phases et l'évolution de la norme de la vitesse du disque au cours de l'ensemble du "jet" (Terauds, 1978 ; Stepanek, 1986 ; Stepanek et Susanka, 1986 ; Susanka et al., 1988 ; Bartlett, 1990 ; Knicker, 1990 ; Lindsay, 1991).

Des résultats issus des mesures effectuées lors des compétitions internationales pour des performances de plus de 60 m montrent que : l'analyse de la durée des différentes phases présente une variation temporelle importante, avec une phase de départ en double appui plus longue que les autres, comprise entre 0,38 s et 0,64 s selon les différents auteurs, suivie d'une phase de départ en simple appui plus courte d'une durée comprise entre 0,25 s et 0,47 s. Cette dernière est suivie, par une phase aérienne très courte, d'une durée entre 0,07 s et 0,13 s. Les deux dernières phases sont relativement équilibrées et leurs durées sont comprises entre 0,18 s et 0,24 s pour la phase finale en simple appui et entre 0,18 s et 0,32 s pour la phase finale en double appui. La durée totale du geste varie entre une valeur minimale de 0,75 s et une valeur maximale de 1,12 s.

L'évolution de la norme de la vitesse du disque lors des différentes phases du mouvement (en valeurs absolues et relatives) a été analysée par Schluter et Nixdorf (1984) et Knicker (1990).

Les résultats issus des mesures effectuées par ces auteurs, montrent les variations de la vitesse du disque suivantes :

Il apparaît que la phase de départ en double appui est une phase "motrice" avec une vitesse du disque de $+ 5,8 \pm 1,2 \text{ m.s}^{-1}$ en valeur absolue qui apporte une contribution en valeur relative de 25,1 % de la vitesse totale. Ceci est suivi par un pseudo "plateau" de vitesse lors des trois phases (Δt_{1sa} , Δt_s , Δt_{2sa}), qui constituent un tour complet de 360° :

- ▶ $+ 2,8 \pm 1,8 \text{ m.s}^{-1}$ en valeur absolue de la vitesse du disque et 9,8 % en valeur relative de la vitesse totale réalisée lors de la phase de départ en simple appui (Δt_{1sa}).
- ▶ $- 0,7 \pm 1,1 \text{ m.s}^{-1}$ en valeur absolue de la vitesse du disque et - 3,4 % en valeur relative de la vitesse totale réalisée lors de la phase aérienne (Δt_s).
- ▶ $+ 1,3 \pm 3,4 \text{ m.s}^{-1}$ en valeur absolue de la vitesse du disque et - 6,3 % en valeur relative de la vitesse totale réalisée lors de la phase finale en simple appui (Δt_{2sa}).

L'essentiel de la vitesse du disque, environ $+ 14,5 \pm 2,5 \text{ m.s}^{-1}$ en valeur absolue et 62 % en valeur relative, est produit pendant la phase finale de deuxième double appui (Δt_{2da}).

Schluter et Nixdorf (1984) trouvent une valeur de $23,1 \pm 1,7 \text{ m.s}^{-1}$ pour la vitesse finale au moment du lâcher. Les résultats de Knicker (1990) montrent une plus grande variabilité de ces valeurs de vitesse, par exemple, la valeur de la vitesse du disque lors de la phase finale de deuxième double appui est comprise entre 13,2 et 18,1 m.s^{-1} selon les sujets.

L'ensemble de ces résultats pour une population de lanceurs de niveau international, montre une grande variabilité, non seulement en termes de durée absolue, mais aussi en termes de valeurs des vitesses du disque lors des phases clefs du mouvement (Susanka et al., 1988 ; Bartlett, 1990). En raison du nombre restreint d'études et des moyens techniques employés (reconstruction du mouvement à l'aide seulement de deux caméras vidéo), Bartlett conteste la conclusion de Wilkins (1986) qui plaide pour un tour optimal plus lent et celle de Silvester (1988), qui défend un tour très rapide.

1.2.2 Phase de départ en double appui

Cette première phase n'est pas homogène d'un athlète à l'autre, certains effectuent deux balancés préparatoires du bras lanceur, tandis que d'autres en font jusqu'à cinq. Elle comporte aussi de grandes différences concernant la posture globale de l'athlète avant le début effectif du lancer (Lindsay, 1991). La réalisation de ces balancés préparatoires, aide l'athlète à se relaxer et lui confère une mise en conditions mentale et psychique, optimales, avant l'exécution du jet (Hay, 1985). Du fait d'une gestuelle propre à chaque lanceur au début de son mouvement, l'influence de cette phase, sur la technique globale du geste de l'athlète est considérée comme minime (Lindsay, 1991 ; Stepanek et Susanka, 1986). De plus, les corrélations entre la durée de cette phase et la valeur de la vitesse d'éjection ne sont pas significatives (Schöllhorn, 1989). Ceci est confirmé par des études similaires (Schluter et Nixdorf, 1984), qui certifient l'absence de corrélations entre la durée de cette phase et la valeur de la vitesse d'éjection mais montrent aussi cependant que 25 % de cette vitesse a été produite pendant la phase de départ en double appui.

1.2.3 Phase de départ en simple appui

Cette phase en simple appui demeure une phase délicate. Dans la littérature scientifique et technique elle est discutée surtout sur l'aspect de l'organisation gestuelle de l'athlète autour du pivot. En effet, certains auteurs suggèrent que la variation en hauteur des positions successives de la jambe qui tourne autour de l'appui permet un accroissement du moment d'inertie et une bonne conservation de la vitesse angulaire de l'ensemble du système (Wilkins, 1987 ; Silvester, 1988). A l'inverse, l'étude de Susanka et al., (1988), basée sur l'analyse des déplacements des deux pieds au cours de l'ensemble du lancer, suggère qu'une montée du pied droit lors de son passage aérien au cours de cette phase, nuit à l'équilibre postural lors de cette phase. Cette divergence est finalement tranchée par Lindsay (1991) qui dans son étude, analyse

simultanément les trajets de la position du pied et de celui du disque, et conclut qu'il n'y a pas de certitude quant à l'effet positif de l'organisation gestuelle du pied côté lanceur sur l'augmentation du moment angulaire de l'athlète. De plus, Bartlett, (1990) dans sa revue bibliographique suggère qu'un éclairage sur le transfert du moment angulaire nécessite le calcul des contributions segmentaires, basé sur une reconstruction en trois dimensions du mouvement. Les études de Susanka et al., (1988) et Lindsay (1991) font penser à l'organisation segmentaire suivante : une avance de la position de la hanche par rapport à celle des épaules. Les mesures effectuées par ces auteurs montrent une grande variation angulaire (21° à 86°), entre l'axe de la hanche et l'axe de l'épaule lors de cette phase.

1.2.4 Phase aérienne

Pendant cette phase aucune accélération du système lanceur-engin n'est possible.

Le rôle de cette phase, (Hay, 1985) consiste essentiellement à favoriser l'accroissement du décalage entre l'axe de la hanche et l'axe de l'épaule. Ceci est possible par une mise en action des rotateurs du tronc et un rapprochement des deux jambes. Une des conséquences de cette organisation segmentaire est une baisse du moment d'inertie et une augmentation de la vitesse angulaire du bas du corps. A l'inverse, il semble que l'organisation posturale du haut du corps, permette le positionnement du disque sur la trajectoire la plus éloignée par rapport à son axe de rotation. Elle implique une hausse du moment d'inertie et une baisse de la vitesse angulaire du haut du corps (Hay, 1985). Cette "séparation" des deux axes, a pour conséquence un début de transfert des quantités de mouvement du bas vers le haut du corps dans la phase suivante de deuxième simple appui. De plus, Schluter et Nixdorf (1984) trouvent des corrélations significatives négatives. ($r = -0,85$; $p < 0,05$), entre la durée de la phase aérienne et la vitesse du lâcher. Cependant, l'étude de Lindsay (1991) montre des résultats plus nuancés concernant l'analyse de cette phase aérienne. En effet, y sont relatées, une durée très courte de cette phase pour les meilleures lanceuses femmes et d'autre part, une durée en valeur relative moyenne, plutôt longue, pour les meilleurs compétiteurs hommes de son étude.

1.2.5 Phase finale en simple appui

L'accroissement de la vitesse du disque lors de cette phase en simple appui, n'est pas conseillé. En effet, dans leur étude, Schluter et Nixdorf (1984) trouvent des corrélations significatives négatives ($r = -0,93$; $p < 0,04$) entre la variation de la vitesse du disque lors de cette phase et celle du lâcher. De plus, ils mettent en évidence, l'existence d'autres corrélations significatives négatives entre la vitesse du disque au moment du lâcher et la vitesse de la hanche ($r = 0,92$; $p < 0,02$) et entre cette même vitesse du lâcher et celle de l'épaule lanceuse ($r = 0,82$; $p < 0,05$).

Ces auteurs attribuent l'augmentation de la vitesse du disque lors de la deuxième phase en simple appui à une erreur d'organisation segmentaire. Ils suggèrent que les lanceurs les plus inexpérimentés, sont incapables de gérer la "séparation" des deux sous-systèmes (le bas du corps et le haut du corps) et de conserver l'avance de l'axe de la hanche par rapport à celui de l'épaule. L'analyse de ces auteurs est confirmée par Schöllhorn (1989) qui met en évidence les conséquences néfastes de l'augmentation de la vitesse du disque lors de la deuxième phase de simple appui. En effet, celui-ci suggère que les lanceurs les plus inexpérimentés "accélèrent" le disque pendant cette phase en simple appui et enregistre de faibles valeurs des vitesses du disque lors de la phase finale en double appui. Schluter et Nixdorf (1984), concluent que la phase finale en simple appui est une phase principalement de transfert des quantités de mouvement du bas vers le haut du corps et non pas une phase "motrice" pour le disque.

1.2.6 Phase finale en double appui

L'essentiel de la vitesse du disque, environ 62 %, selon Schluter et Nixdorf (1984) et 73 %, selon Schöllhorn (1989), est produit pendant la phase finale de deuxième double appui.

Schluter et Nixdorf (1984) montrent que plus cette vitesse est élevée plus la performance du lanceur est importante.

Ils trouvent plusieurs corrélations significatives :

- entre la vitesse du disque au moment du lâcher et la variation de cette même vitesse lors de la phase finale ($r = -0,96$; $p < 0,02$)
- entre la vitesse du disque au lâcher et la durée de cette phase ($r = 0,83$; $p < 0,05$)
- entre la vitesse du disque au lâcher et l'accélération du disque lors de la phase finale ($r = 0,84$; $p < 0,05$).

Un aspect intéressant souligné par Schluter et Nixdorf, (1984) et confirmé par Schöllhorn, (1989), est l'influence de la masse du disque (1 kg pour les lanceuses femmes *vs.* 2 kg pour les lanceurs hommes) sur l'évolution des paramètres cinématiques des lanceurs femmes et hommes. En effet, ces auteurs montrent que la courbe d'accélération est plus longue chez les hommes qui emploient un disque de 2kg que chez les femmes qui lancent avec un disque plus léger d'une masse de 1kg. Stepanek et Susanka (1986) attribuent cet accroissement de l'accélération du disque lors de la phase finale chez les femmes, à la masse du disque (1kg au lieu de 2kg pour les hommes). A l'inverse, McCoy et al. (1985), trouvent des valeurs de vitesse du lâcher significativement plus importantes pour les lanceurs hommes que pour les lanceurs femmes ($p < 0.001$). Cependant, aucune étude n'a mis en évidence l'influence de la masse du disque sur l'évolution des paramètres cinématiques d'une même population hommes ou femme.

L'organisation segmentaire lors de cette phase finale en double appui semble être très différente des autres phases. En effet, si dans la phase précédente en simple appui, le décalage des axes hanche-épaule entraîne une variation angulaire importante, il semblerait que lors de la phase finale en double appui, les deux axes soient parallèles et la variation angulaire égale à zéro (Lindsay, 1991 ; Knicker, 1990). Ceci signifie d'une part, que le transfert du moment cinétique du bas vers le haut du corps a déjà eu lieu lors de la phase précédente de simple appui et d'autre part, que cette phase finale en double appui sert principalement au transfert du moment cinétique du haut du corps vers le disque.

Deux autres paramètres semblent importants lors de la gestion de la phase finale en double appui : l'angle et la hauteur du lâcher du disque. En effet, une vitesse du disque élevée n'est pas la seule condition pour la réalisation d'un jet performant. Gregor et al., (1985) suggèrent l'existence d'une relation entre l'inclinaison du tronc et l'angle optimal du lâcher du disque. Cependant, ils ne trouvent pas de corrélation significative entre ces deux paramètres. Concernant la hauteur optimale du lâcher du disque, il est communément admis, que celle-ci doit être au-dessus de la ligne des épaules (McCoy et al., 1985 ; Gregor et al., 1985).

1.3 Conditions initiales optimales de la trajectoire du disque après le lâcher

Le disque après son lâcher, décrit une trajectoire qui a la forme d'une courbe appelée aussi trajectoire parabolique. La réalisation d'un tel mouvement est conditionnée d'une part, par les paramètres d'éjection propres au disque (la vitesse finale, les différents angles et de la hauteur du disque au moment du lâcher) et d'autre part, par les facteurs environnementaux (la vitesse du vent et le frottement avec l'air).

L'optimisation de paramètres d'éjection propres au disque au moment du lâcher (*cf. figure 1-2*) suit le même objectif : l'augmentation de la performance (Taylor, 1932 ; Cooper et al., 1959 ; Samozwetow, 1960 ; Ganslen, 1964 ; Voight, 1972 ; Tutjowitsch, 1976).

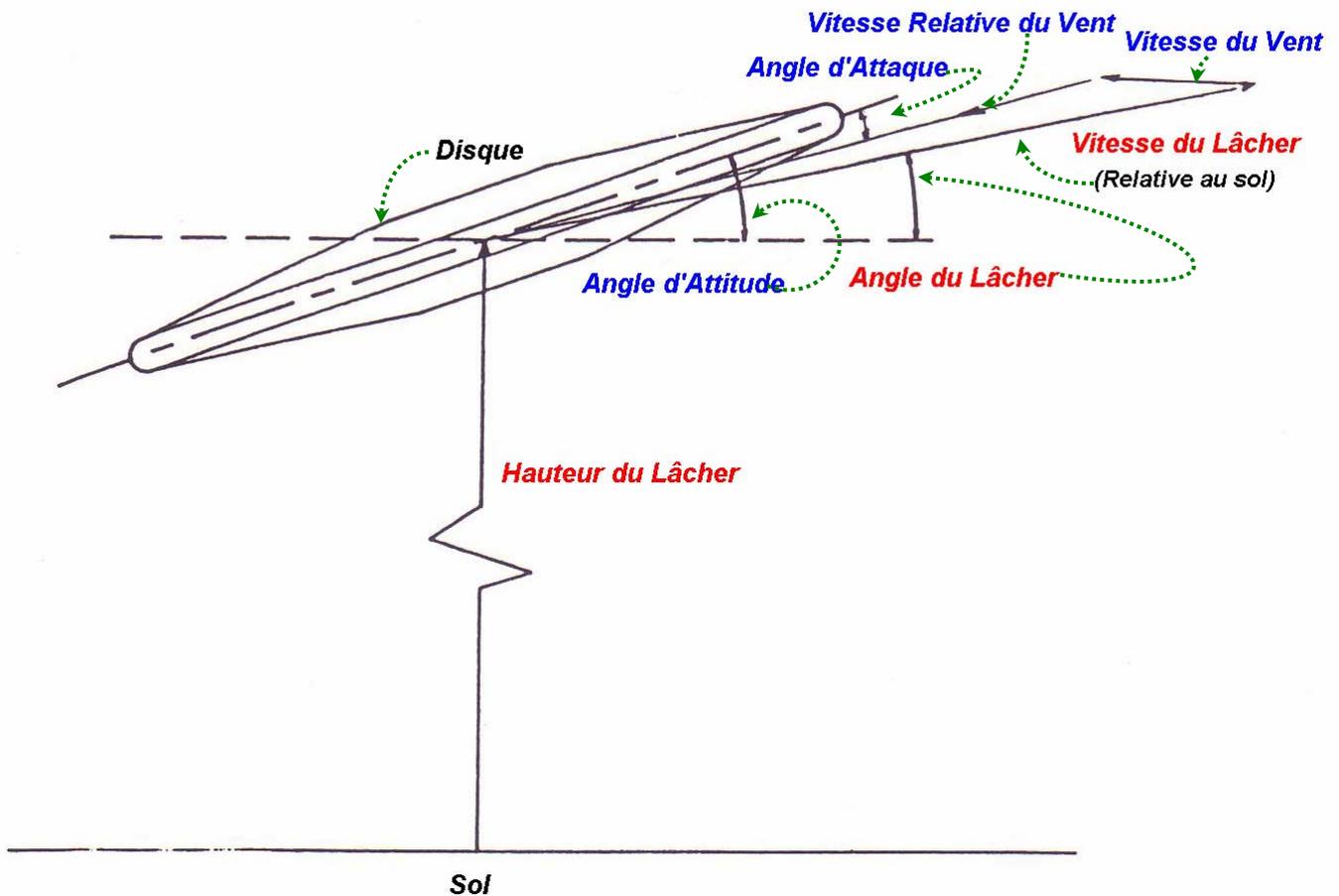


Figure 1-2 : Conditions initiales de la trajectoire parabolique du disque après le lâcher.

Facteurs environnementaux :

- différents angles du disque au moment du lâcher (angles : d'attitude, lâcher, d'attaque)
- vitesse du lâcher
- vitesse relative du vent
- hauteur du lâcher

1.3.1 Paramètres d'éjection propres au disque

1. La vitesse du disque au moment du lâcher

La vitesse du lâcher est le paramètre le plus important contribuant à la réalisation de la performance (Bartoneietz, 1984). Dans leur étude effectuée sur huit lanceurs, Schluter et Nixdorf (1984) trouvent une corrélation significative ($r = 0,86$; $p < 0,03$) entre la valeur de la vitesse d'éjection et la performance réalisée, estimée entre 45 et 62 m. Cependant, Knicker, (1990), trouve des résultats plus nuancés avec une corrélation de $r = 0,41$ ($p < 0,05$) entre ces deux paramètres.

Dans ce contexte, la plupart des entraîneurs conseillent à leurs athlètes une vitesse du disque maximale au moment du lâcher. Cependant, pour optimiser la performance, une telle augmentation de la vitesse du disque au moment du lâcher, doit être impérativement en accord avec les autres paramètres d'éjection : hauteur du lâcher, angles du lâcher, vitesse du vent (Samozwetow, 1960).

2. Les différents angles du disque au moment du lâcher (cf. figure 1-2)

La vitesse du disque au moment du lâcher n'est pas le seul paramètre important dans la réalisation de la performance Knicker (1990).

En effet, un lâcher optimal du disque dépend de plusieurs angles : d'attaque, d'attitude et du lâcher.

- l'angle d'attaque défini par rapport à la coulée de l'air autour du disque. Plusieurs études réalisées, au moyen de tests en soufflerie, par Ganslen (1964), Tutjowitsch (1976) et Soong (1976, 1982) montrent l'existence d'une relation linéaire directe d'une part, entre la valeur de cet angle d'attaque du disque et les coefficients de la portance et de la traînée, et d'autre part, entre la valeur de ce même angle et l'action des forces aérodynamiques exercées sur le disque pendant le vol. Les valeurs optimales de cet angle d'attaque sont comprises entre -9 et -10 degrés.

- l'angle d'attitude défini par deux droites qui se coupent : une droite parallèle au sol et une droite qui constitue l'axe bissectrice du disque. Le point d'intersection de deux droites est situé au centre de gravité du disque.

- l'angle du lâcher précisé par l'intersection du vecteur vitesse du disque et la droite parallèle au sol qui passe par le centre du disque (cf. figure 1-2).

- les angles du lâcher et d'attitude définis par rapport au référentiel lié à la terre. Les mêmes auteurs cités ci-dessus mettent en évidence les valeurs optimales de ces deux angles : $35-37^\circ$ pour l'angle du lâcher et $26-27^\circ$ pour l'angle d'attitude.

L'ensemble de ces valeurs d'angle mesurées au moment du lâcher, sont en adéquation avec le comportement optimal du disque en vol, observé par les tests réalisés en soufflerie.

3. La hauteur du lâcher du disque

Un accroissement de la hauteur du lâcher d'un mètre augmenterait la performance finale de 2 m (Forhlich, 1981). Cependant, dans la pratique courante, différents résultats suggèrent une hauteur maximale du lâcher du disque. La valeur de cette hauteur du lâcher du disque est très variable selon les auteurs : elle est située entre 2,26 m pour son maxima et 1,43 m pour son minima (McCoy et al., 1985 ; Gregor et al., 1985., Terauds, 1978).

En effet, il semble que la performance en lancer du disque dépende aussi de la hauteur et de l'angle d'éjection.

Voigt. (1972) trouve que pour les valeurs optimales des trois paramètres : une vitesse du lâcher de 20 m.s^{-1} , un angle d'éjection de 36° et une hauteur de lâcher de 1,9 m, le lanceur peut améliorer sa performance jusqu'à 3,75 m. Le même auteur remarque que si seulement un des trois paramètres est loin de sa valeur optimale, ceci altère la réalisation d'un jet. De plus, il a été montré que les athlètes de haut niveau sont capables de reproduire des paramètres d'éjection très

proches des valeurs optimales. A l'inverse, une diminution de 2° en dessous de la valeur optimale de l'angle du lâcher, réduit la longueur du jet de 1,2 m (Tutjowitsch, 1976). En effet, pour les athlètes moins performants, des mesures ont montré par exemple une variation jusqu'à $\pm 5^\circ$ pour l'angle d'éjection autour de sa valeur optimale (Stepànek et Susanka, 1986 ; Susanka et al., 1988).

1.3.2 Facteurs environnementaux (vitesse du vent)

L'action de différents facteurs environnementaux (vitesse et direction du vent, densité de l'air) a des conséquences importantes sur le vol du disque après lâcher. Ces contraintes environnementales qui échappent au contrôle direct du lanceur, font l'objet d'une attention particulière de la part des athlètes et des entraîneurs (Frohlich, 1981).

Dans son étude, Tutjowitsch (1976) montre qu'un lancer effectué avec des paramètres d'éjection optimaux (angle d'attaque négatif -10° , vitesse d'éjection $\geq 23 \text{ m.s}^{-1}$), auxquels s'ajoute une vitesse du vent (dans la direction du lanceur) de 5 m.s^{-1} , permet une augmentation de la performance de 5,4 m.

Unger (1977) trouve une relation linéaire directe entre la vitesse du vent (au-delà de 5 m.s^{-1}) et l'augmentation de la longueur du jet. Suite à ses tests pratiqués en soufflerie, Soong (1986) recommande une diminution de la valeur de l'angle du lâcher pour des vitesses du vent supérieures à $15\text{-}20 \text{ m.s}^{-1}$ (dans la direction du lanceur). Il apparaît que les angles du lâcher devront être adaptés en fonction de la vitesse du vent arrière. En effet, Frohlich (1981) montre dans son étude que pour conserver la longueur initiale du jet avec une altération minimale de $\pm 1\text{m}$, lors d'un lancer où la vitesse du vent arrière est de 10 m.s^{-1} , les angles du disque au lâcher peuvent enregistrer les variations suivantes : $\pm 5^\circ$ pour l'angle d'éjection et de $\pm 3^\circ$ pour l'angle d'attitude. Quant à la direction du vent, Pharoah (1957) suggère que cette direction est optimale à 20° du côté lanceur de l'axe du lanceur. Cette analyse, s'appuie sur l'observation directe.

1.3.3 Comparaison entre les performances théorique et réelle

Lors des Jeux Olympiques de Montréal (Canada), Terauds (1978) compare la performance théorique (recalculée à l'aide de la vitesse, de l'angle et de la hauteur du lâcher et en conditions de vide) des six meilleurs lanceurs de disque avec celle réelle mesurée.

Il trouve des variations importantes entre la longueur théorique et réelle : pour Schmidt, il estime le jet à 6,71 m en moins de sa performance réelle, à l'inverse, pour Thiede, ces calculs montrent une surestimation de 7,01 m.

De ce fait, une erreur même minimale sur les conditions initiales du mouvement parabolique

($\pm 1^\circ$ pour l'angle du lâcher, ± 1 cm pour la hauteur du lâcher et $\pm 1 \text{ m.s}^{-1}$ pour la vitesse du lâcher) peut générer une erreur importante de $\pm 5\text{m}$ sur la longueur du jet (Bartlett et Payton, 1991).

1.3.4 Conclusion

En général, la plupart des auteurs s'accordent à dire que les conditions initiales du mouvement parabolique optimales sont définies comme suivantes :

- la vitesse du disque au lâcher doit être la plus grande possible et elle s'impose comme le paramètre le plus important dans la réalisation de la performance.
- la hauteur du lâcher doit être la plus élevée possible, mais en adéquation avec les autres paramètres d'éjection.
- la valeur optimale de l'angle du lâcher doit être comprise entre 35 et 37° et celle de l'angle d'attitude autour de 10° .
- pour un lancer avec un vent arrière important (plus de 10 m.s^{-1}), l'angle d'éjection doit être diminué légèrement, et l'angle d'attaque doit être négatif (-9° , -10°).

1.4 Approche électromyographique

Pour étudier le lancer de disque d'un point de vue biomécanique, l'enregistrement d'indices mécaniques associé au signal électromyographique constitue un principe de base de cette analyse. Cependant, l'acquisition du signal sEMG demeure un exercice difficile, particulièrement lors d'un mouvement à haute dynamique comme le lancer du disque. En effet, il a peu des publications qui traite de l'approche électromyographique du lancer du disque. Dans sa revue bibliographique sur la biomécanique du lancer de disque, Bartlett (1992) fait référence à une seule étude électromyographique sur l'engagement musculaire du lanceur, celle de la thèse de Finanger qui date de 1969. L'étude de Finanger a été réalisée sur quatre populations de lanceurs hommes, pour des performances estimées entre $42,4$ et $48,8$ m. Pour chaque lanceur, l'activité électromyographique de surface (sEMG) a été recueillie par quatre canaux pour les dix muscles sélectionnés (*Biceps Brachii*, *Deltoideus pars anterior et pars medialis*, *Pectoralis Major claviculaire et sternal*, *Obliquus externus*, *Obliquus internus*, *Latissimus dorsi*, *Serratus pars anterior*, *Teres major*). Chaque lanceur a effectué douze essais.

Compte tenu du nombre limité de voies d'enregistrement EMG (4) et du nombre de muscles choisis (10), Finanger a scindé le protocole d'enregistrement en trois groupes de quatre muscles, tout en gardant le *Deltoideus pars anterior* comme muscle référent durant toute l'expérimentation. L'objectif de cette méthode est la reconstitution du plan d'excitation musculaire de l'ensemble des muscles choisis pour l'analyse. Pour se faire, seuls les groupes de

quatre muscles ou le *Deltoideus pars anterior* (enregistré comme muscle témoin), présentent un niveau d'excitation musculaire équivalent ont été associés pour la reconstitution du plan global d'excitation musculaire.

A l'inverse, les mesures vidéographiques effectuées en simultané avec l'acquisition du signal électromyographique n'ont pas été prises en compte car la validité des données cinématiques reste peu fiable (utilisation d'une seule caméra d'où l'impossibilité de reconstruction en trois dimensions du mouvement). De plus, pour Bartlett, l'interprétation des résultats de cette étude électromyographique est difficile car la quantification de l'EMG a été perturbée par de nombreux artefacts sur la plupart des tracés.

En dépit des limites de son étude, les résultats de Finanger montrent quelques pistes intéressantes :

- le niveau de recrutement électromyographique ainsi que la durée de "bouffées" sont très variables entre les lanceurs et suivant les différents muscles : par exemple pour certains lanceurs, c'est le *Biceps brachii* qui semble être le plus activé, en revanche, pour d'autres, l'activité la plus importante a été mesurée pour le *Deltoideus pars anterior*.

- il a été remarqué que certains lanceurs utilisent les rotateurs du tronc d'une manière complètement inefficace. En effet, ces muscles sont activés seulement après le lâcher du disque.

- dans son étude, Finanger suggère que pour la plupart des sujets, les obliques sont toujours activés avant les muscles de la ceinture scapulaire. Cette chronologie de mise en action a été observée lors des deux phases finales en simple et double appui. Mais l'auteur n'a pris en compte aucun des muscles de la jambe, ce qui empêche l'étude complète de la chaîne cinématique.

- lors des deux phases en simple appui (entrée et sortie du tour), il a été remarqué une forte activation pour les muscles suivants : *Latissimus dorsi*, *Teres major* et *Pectoralis major*.

L'auteur attribue ce type de comportement à un maintien actif du bras lanceur par une abduction partielle de celui-ci. Ceci va à l'encontre de la théorie du bras relâché soutenue par Dayson (1873) mais conforte l'hypothèse de Lockwood (1963) du maintien actif du bras lanceur. De plus, l'auteur suggère que lors de la phase aérienne, les mêmes muscles favorisent d'une part la diminution de la vitesse du disque, et d'autre part, la conservation de la distance entre l'axe de la hanche et l'axe de l'épaule.

- en accord avec l'étude de Mapes (1964) sur le baseball, Finanger conclut que du fait de la persistance du signal électrique au delà du lâcher, le lancer du disque ne serait pas un mouvement balistique.

1.4 Objectifs de la recherche

La performance dans les lancers en général, et en particulier le lancer du disque, dépend principalement des paramètres d'angle et de vitesse d'éjection de l'engin lors du lâcher (Stepànek et Susanka, 1986). L'optimisation de ces paramètres requiert obligatoirement chez le lanceur de disque la maîtrise d'une gestuelle (ou habileté motrice) complexe exécutée dans l'espace restreint qu'est l'aire de lancer du disque. Le lanceur, placé dans les conditions réglementaires, doit enchaîner des actions simultanées de rotation et de translation afin de communiquer au système « lanceur-disque » dans un premier temps puis au disque seul dans un second temps, la plus grande vitesse possible (Dapena, 1978). Il s'avère que les meilleurs lanceurs de disque sont capables de tourner très vite à l'intérieur de l'aire de lancer et d'augmenter la vitesse du disque surtout dans la phase finale de double appui.

En condition d'entraînement, de nombreux entraîneurs préconisent l'utilisation d'un disque plus léger que celui utilisé en compétition Senior (1,7 *versus* 2 kg). Cette démarche a pour objectif de limiter le risque de blessures lié à la surcharge mécanique induite par la répétition du geste de lancer. Néanmoins aucune donnée expérimentale n'a démontré s'il y avait des conséquences néfastes dans cette situation d'apprentissage. Lancer avec un disque plus léger ne présente un intérêt que dans la mesure où il n'y a pas de modifications importantes des paramètres cinématiques et de l'organisation gestuelle du lancer (Dinu et coll., 2004).

L'objectif objectif de cette étude, réalisée avec les sept meilleurs lanceurs de disque français, est de répondre aux différentes hypothèses discutées par les entraîneurs :

- lancer avec un disque plus léger entraîne-il des modifications importantes des paramètres cinématiques et des patrons de recrutement EMG ?
- l'existence ou pas de ces modifications implique-elle une coordination plus au moins efficace du mouvement ?

En résumé, l'utilisation d'un disque plus léger à l'entraînement altère-t-elle la technique gestuelle ?

CHAPITRE 2 - PLAN EXPERIMENTAL ET PROTOCOLE

2.1 Introduction

Les techniques de mesure ou d'analyse d'un geste sportif reposent sur des approches différentes mais complémentaires. En effet, il convient dans toute étude biomécanique de rendre compte à la fois de la cinématique du mouvement mais aussi d'évaluer les engagements musculaires de différents groupes de muscles qui jouent un rôle important dans le niveau de réalisation du geste. Pour ce faire, deux outils d'analyse sont utilisés : l'analyse vidéo tridimensionnelle (3D) permet de reconstruire les mouvements 3D alors que l'analyse électromyographique permet d'une part, d'apprécier la chronologie des actions musculaires et d'autre part, d'évaluer les quantités électriques fournies par les muscles agonistes lors du geste étudié.

La connaissance de ces deux entités est essentielle dans toute approche biomécanique du geste sportif, elle permet, en outre, en les combinant, de déterminer la relation entre les paramètres mécaniques du mouvement le niveau d'engagement musculaire dans ce même mouvement.

2.2 Population

Sept lanceurs de haut niveau international (meilleure performance : 57 ± 3 m ; âge : 23 ± 3 ans ; poids : 108 ± 19 kg ; taille : $1,90 \pm 0,6$ m) ont participé à l'étude. Les athlètes étaient préalablement informés sur les procédures d'expérimentation et se sont engagés à s'investir pleinement sur tous les tests proposés.

2.3 Etapes expérimentales

Les étapes expérimentales sont les suivantes :

1. *Echauffement spécifique du lanceur*
2. *Détermination de l'activité maximale (EMG max) pour chaque muscle analysé lors d'exercices spécifiques au cours desquels les athlètes devaient effectuer une contraction maximale volontaire isométrique du muscle ciblé (CMVi).*

Les exercices proposés sont les suivants :

- Pour le *DA* et *PM* : l'athlète était dans la position debout, son bras était tendu placé à 90° d'abduction dans le plan frontal et environ 30° de flexion antérieure dans le plan sagittal (plan de la scapula), pouce était orienté vers le haut. La résistance était appliquée au niveau du poignet vers l'arrière (axe antéro-postérieur).
- Pour le *BB* : l'athlète était dans la position debout, son bras était placé le long du corps avec une flexion du coude de 90° dans le plan sagittal, son avant bras était en supination.

La résistance était imposée au niveau du poignet vers le bas (axe vertical).

- Pour le *DM* : l'athlète était dans la position debout, bras tendu, placé à 90° d'abduction dans le plan frontal et environ 30° de flexion antérieure dans le plan sagittal (plan de la scapula). Pouce orienté vers l'avant, la résistance était appliquée au niveau du poignet vers le bas (axe vertical)
- Pour le *TM* : l'athlète était dans la position assise sur un banc, genoux à 90°, bras tendus le long du corps, la résistance était imposée au niveau du poignet, vers le bas sur l'axe vertical.

Ces exercices étaient proposés dans un ordre aléatoire (2 répétitions par exercice et 2 minutes de récupération entre chaque répétition) :

Ces tests (sous résistance manuelle imposée et proportionnelle à l'effort effectué par le sujet de manière à obtenir une contraction isométrique maximale) ont été réalisés par deux examinateurs selon la méthodologie empruntée par Knudson et Blackwell (2000). En effet, pour chaque mouvement un examinateur imposait la résistance et le deuxième stabilisait le sujet.

Pour l'évaluation de l'EMG max, nous avons pris en compte une fenêtre de 0,5s sur la durée totale de la CMVi qui était de 3s.

3. *Analyse des lancers*. Toutes les séances recueil des données comportaient deux types d'enregistrements simultanés et synchronisés: les prises de vue au cours du mouvement et l'acquisition des quantités électrique de différents groupes de muscles qui jouent un rôle important dans le niveau de réalisation du geste

4. *Traitement du signal vidéo-emg*

Les sujets ont exécuté douze jets dans la même séance de mesure (6 avec un disque de 1,7 kg et 6 avec un disque de 2 kg), dans un ordre aléatoire.

CHAPITRE 3 - APPROCHE HISTORIQUE DE LA TECHNIQUE VIDEOGRAPHIQUE

3.1 Introduction

Jules Etienne Marey (1830-1904), physiologiste, s'est intéressé à l'analyse du mouvement pour répondre à des questions de physiologiste. Ces différentes études sur la locomotion animale et humaine, ne se contentaient pas d'une simple analyse descriptive des phénomènes. Ainsi, pour chaque expérimentation il lui fallut concevoir et construire des appareils adaptés comme la caméra chronophotographique et la table dynamométrique.

Marey avait un assistant, nommé George Demeny. Ce dernier employa les outils conçus par Marey pour l'enregistrement du mouvement sportif (*cf. photo 3-1*)

Le même Demeny, fût à l'origine de la table dynamométrique, capable d'enregistrer les efforts verticaux. Ainsi, les principaux outils, encore d'actualité aujourd'hui, existaient déjà : l'analyse vidéo d'une part, et la plateforme de force d'autre part. Bien évidemment, l'exploitation simultanée de ces deux sources d'informations permet une approche plus fine et complète de l'étude du mouvement.



Photo3-1 : Décomposition photographique de Demeny sur le lancer de disque.

3.2 Etude du mouvement en trois dimensions

L'analyse cinématique de la plupart des activités sportives passe par une analyse du mouvement en trois dimensions (3D). Les techniques de mesure 3D à partir d'images photo ou d'images issues de caméras cinématographiques, soit la stéréo-photogrammétrie, nécessitent la connaissance des paramètres internes des caméras.

Pendant longtemps, l'utilisation de caméras dont on connaissait précisément les paramètres optiques, était indispensable pour la stéréo-photogrammétrie. Cette méthode, restait peu utilisée du fait du coût élevé du matériel et du temps de traitement des données, excessivement long avant l'ère des ordinateurs modernes.

En 1971, Abdel-Aziz et Karara, développèrent une méthode qui permit d'appliquer les techniques de la stéréo-photogrammétrie à des caméras classiques. Cette méthode, appelée "Direct Linear Transformation" (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 %.

3.2.1 Principe de reconstruction 3D

Une caméra vidéo peut se représenter simplement par une boîte munie sur sa face avant d'une petite ouverture (lentille de l'objectif). La lumière, provenant d'un objet situé dans le champ de la caméra, passe par cette ouverture et produit une image inversée dans le fond de la boîte où se trouve le film (plan du film). En suivant le procédé inverse, les images du film peuvent être inversées, élargies puis projetées sur un écran.

En l'absence de distorsion, les images projetées coïncident avec les points d'intersection de la lumière et du plan de projection idéal (Π), qui est parallèle au plan du film et situé à une

certain distance de l'objectif. On définit alors l'axe optique comme l'axe perpendiculaire au plan du film passant au centre de l'objectif et le point principal P_0 , comme l'intersection de cet axe avec le plan du film (cf. figure 3-1).

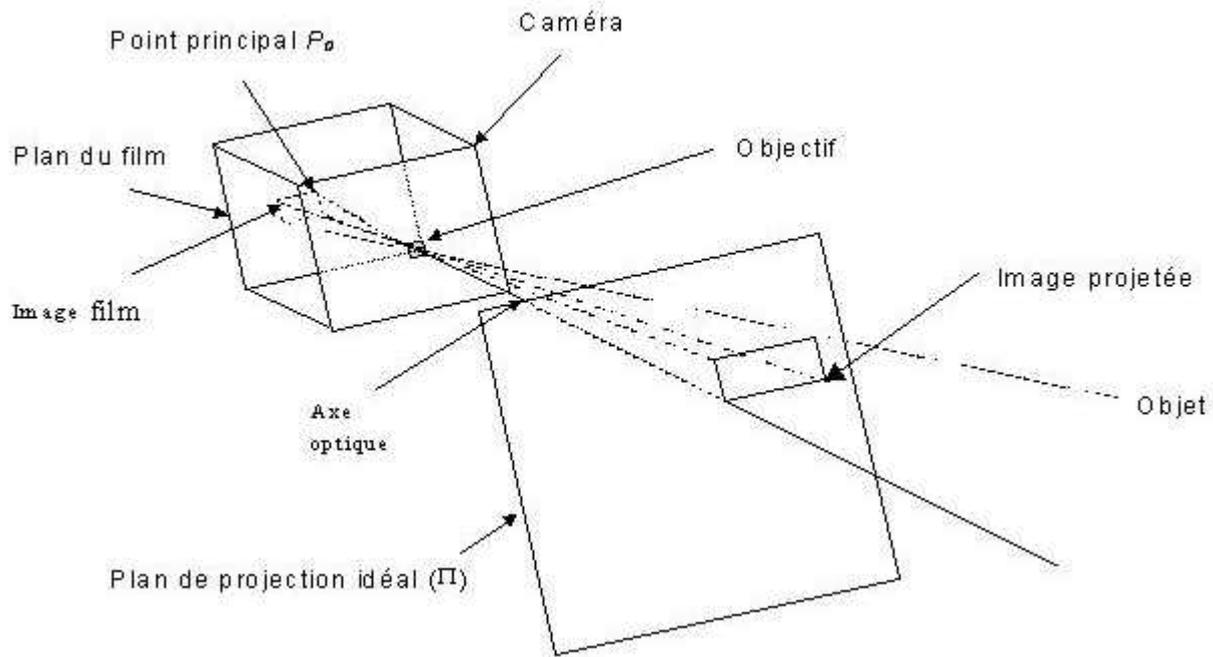


Figure 3-1: Modèle simplifié d'une caméra

L'objectif de la DLT est d'exprimer les coordonnées (u, v) dans le plan de digitalisation d'un point d'un objet placé dans le champ d'une caméra par rapport à ses coordonnées 3D dans un repère attaché à une mire de contrôle et cela pour un réglage donné de la caméra (mise au point, profondeur de champ, obturation, ...).

En outre, la prise de vue d'un même point d'un objet de l'espace par au moins deux caméras positionnées différemment permet de reconstruire les coordonnées 3D de ce point dans le repère attaché à l'objet de calibration. Le principe de la DLT est basé sur des relations géométriques provenant du modèle simplifié de la caméra énoncé précédemment. L'algorithme de reconstruction prend en compte uniquement les distorsions linéaires suivant les deux axes du plan de digitalisation de l'image et repose sur un étalonnage linéaire du volume filmé.

Afin de déterminer les 11 valeurs de la DLT, il faut filmer au moins 5 points et $\frac{1}{2}$ d'un objet de contrôle dont on connaît les coordonnées (x_i, y_i, z_i) dans $\{R\}$ puis numériser cette image afin de mesurer pour chaque point les coordonnées (u_i, v_i) correspondantes, ce qui conduira à 11

équations et 11 inconnues. Evidemment, en surdimensionnant le système, c'est-à-dire en plaçant un plus grand nombre de points de contrôle, nous allons homogénéiser les valeurs des constantes de la DLT dans le volume défini par ces points.

CHAPITRE 4 - MATERIEL ET METHODE

4.1 Matériel vidéographique

Trois caméras vidéo numériques placées à 120° autour de l'aire de lancer sont utilisées pour permettre une reconstruction en trois dimensions, afin d'appréhender l'ensemble du mouvement qui se compose d'une rotation et d'une translation simultanées.

Ces caméras vidéo numériques de marque Panasonic AG-455, 25 Hz ont les caractéristiques suivantes :

La capture d'image est réalisée avec des Dispositifs à Transfert de Charge (DTC) en français ou CCD (charge coupled device) en anglais, de 1/3 pouces (=27.07mm)

Le principe de fonctionnement du capteur CCD se présente en deux temps. Le premier correspond à un temps de charge d'une capacité obtenue par l'application d'une tension produite par une réception photoélectrique. Le second est un temps de transfert de l'information sur une mémoire. Plus la lumière est intense, plus la valeur de la tension ainsi accumulée aux bornes de la capacité est grande.

Le format d'enregistrement, Mini DV (format vidéo numérique), utilise une bande vidéo de 6.35 mm. L'objectif se caractérise par un diaphragme automatique de F1.4 et une variation de la focale de 4.7 à 47 mm. La sensibilité se traduit par un éclairage minimal requis de 1 lux.

L'obturateur électronique (shutter) est réglé manuellement pour une vitesse d'obturation de 1/1000^{ième} pour avoir une bonne définition des marqueurs sur l'image. Le signal de sortie est de type S-Vidéo (Y/C), luminance et chrominance séparées.

Pour le transfert des données vidéo sous format informatique, notre système comporte une station complète de numérisation de l'image type PC Pentium III, avec une carte d'acquisition Miro DC 30 + intégrée (*cf. figure 4-1*)

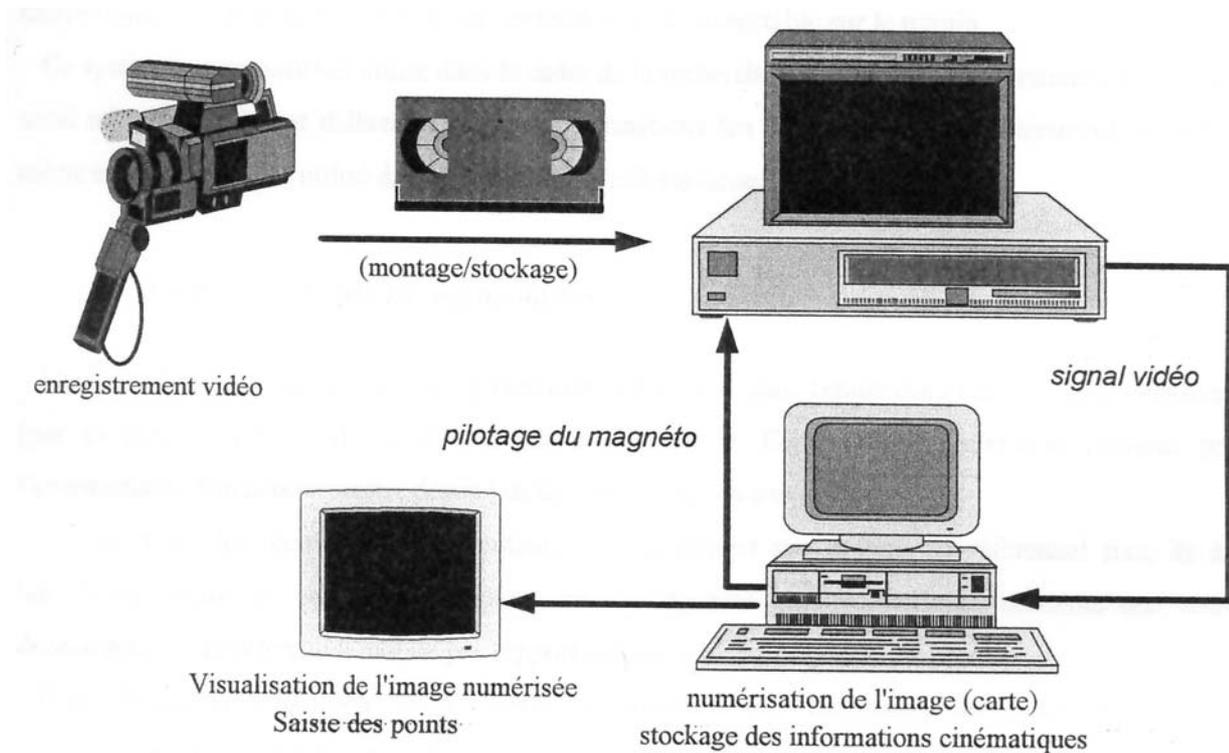


Figure 4-1 : *Système d'analyse vidéo du mouvement*

Cette figure représente le cheminement des données cinématiques à partir des images vidéo.

Ce type de système exploitable sur le terrain, permet la saisie manuelle ou automatique des mires réfléchissantes posées sur le sujet et l'acquisition des données cinématiques bidimensionnelles et même tridimensionnelles du mouvement.

Derrière chaque objectif, un projecteur d'une puissance de 2000 watts a été installé pour obtenir une concentration maximale de lumière sur l'ensemble des marqueurs

Les trois caméras ont été placées à 120°, (cf. figure 2-3) autour de l'aire de lancer. Cette disposition évite que le projecteur placé derrière une caméra aveugle l'une des autres caméras. Chaque marqueur pouvait ainsi être vu par au moins deux caméras. Des panneaux noirs ont été placés à l'opposé du champ des caméras pour augmenter le contraste lumineux.

4.2 Matériel et méthode de détection et d'enregistrement de l'activité électromyographique

L'activité électromyographique était recueillie à l'aide d'un appareil embarqué de type ME3000P8 (Mega Electronique Ltd, Kuopio, Finlande), destiné à l'enregistrement du signal électromyographique de surface (sEMG). Cet appareil portatif permet de faire une acquisition du signal sur huit canaux en temps réel. Les données sont stockées sur une carte mémoire d'une capacité de 32 Mo de type PCMCIA permettant d'effectuer jusqu'à 10 secondes d'enregistrement à la fréquence d'échantillonnage utilisée lors de l'acquisition (1000 Hz).

L'activité électromyographique de surface (sEMG) a été recueillie par dérivation bipolaire en utilisant des électrodes de surface de type « Argent-Chlorure d'argent » (type Blue Sensor Medicotest, Danemark) placées par paire sur les différents muscles analysés (espace inter-électrodes de 15 mm) (cf. *photo 4-1*). Préalablement à la pose des électrodes, la surface de la peau était frottée et nettoyée avec une solution d'alcool afin de réduire la valeur d'impédance. Pour chaque faisceau musculaire, la paire d'électrodes était fixée sur le « ventre » du muscle, dans l'axe longitudinal des fibres musculaires. Une électrode de référence, permettant de relier le sujet à la masse, était placée sur la clavicule. Le signal EMG préalablement amplifié (Z input = 2 G Ω ; gain = 600), était transmis jusqu'à la carte d'acquisition numérique placée dans l'appareil embarqué de type ME3000P8 et recueilli au cours du mouvement pour une analyse ultérieure (logiciel « Origine », OriginLab corporation, USA). Lors de l'acquisition, une bande passante de 5 à 500 Hz (Takaishi et coll., 1994) était utilisée et la fréquence d'acquisition était de 1000 Hz.

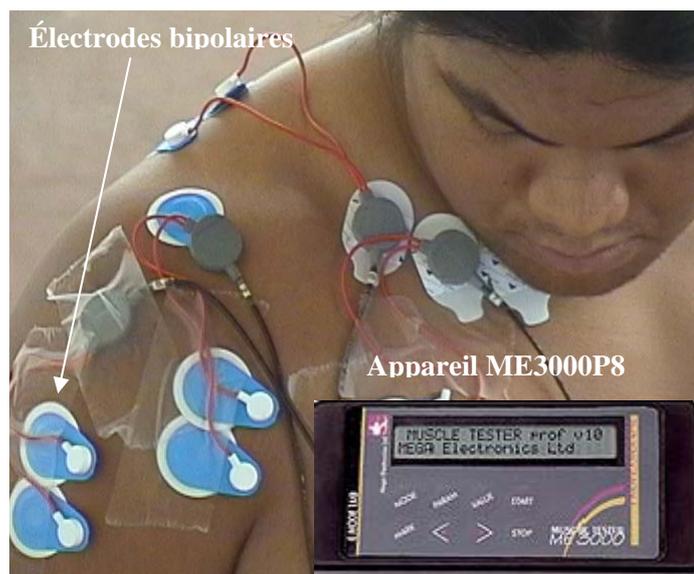


Photo 4-1: Représentation de l'enregistreur de l'activité électromyographique de type ME3000P8 et ses électrodes bipolaires (BLUE SENSOR M-00-S)

Nous avons choisi de recueillir l'activité électromyographique des principaux muscles de la ceinture scapulaire situés sur le côté du « bras lanceur » (*Biceps brachii [BB]*, *Deltoideus pars anterior [DA]* et *pars medialis [DM]*, *Pectoralis major [PM]*, *Trapezius pars descendens [TM]*). Les 5 muscles que nous avons choisis sont reconnus comme étant particulièrement actifs dans cette activité (Finanger, 1969). En effet, ces muscles sont caractérisés pas les fonctions anatomiques suivantes :

Le *BB* sert classiquement à l'antépulsion du bras et à la flexion du coude. Lorsque l'humérus est en rotation externe, la longue portion du *BB* peut participer à l'abduction.

Le *DA* est antépulseur du bras et participe à sa rotation interne. Il a également un rôle de stabilisation dans l'abduction du bras.

Le *PM* intervient dans l'adduction et la rotation interne de l'humérus. Ses insertions sur le sternum permettent lorsqu'elles sont fixes d'animer le bras en adduction lorsque celui-ci est placé en rotation interne. Ses faisceaux supérieurs ont également un rôle antépulseur.

Ayant pour point fixe le rachis, le *TM* joue un rôle dans la bascule de l'omoplate (cavité glénoïde regardant en haut) et dans son élévation. Lorsque le point fixe est sur l'omoplate, l'action unilatérale du *Trapezius* entraîne l'extension, l'inflexion latérale et la rotation controlatérale de la tête et du cou. La contraction simultanée des chefs supérieurs des 2 trapèzes provoque l'extension de la tête et du cou.

Préalablement à la séance de lancers l'activité maximale (EMG max) était recueillie pour chaque muscle lors d'exercices spécifiques au cours desquels les athlètes devaient effectuer une contraction maximale volontaire isométrique (CMVi). Pour l'évaluation de l'EMG max, nous avons pris en compte une fenêtre de 0,5s sur la durée totale de la CMVi qui était de 3s.

Ces exercices étaient proposés dans un ordre aléatoire (2 répétitions par exercice et 2 minutes de récupération entre chaque répétition).

4.3 Système de synchronisation

Pour synchroniser les signaux multiples, vidéo-EMG, nous avons conçu un système de synchronisation multi-outils.

Ce système de synchronisation est composé d'un boîtier émetteur, d'un récepteur et de trois diodes (*cf. figure 4-2*). Les diodes reliées entre elles par un câble de liaison, sont 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. En même temps, un train d'impulsions électriques à très haute fréquence est envoyé par onde radio du boîtier émetteur au récepteur connecté à l'enregistreur EMG. La durée de cette impulsion électrique correspond au temps d'allumage de trois diodes fixées devant chaque caméra. Ce train d'impulsions est décodé par le récepteur qui envoie un signal carré sur la voie d'entrée EMG. Le décalage entre le signal envoyé sur les diodes et le signal enregistré était égal à 4 ms.

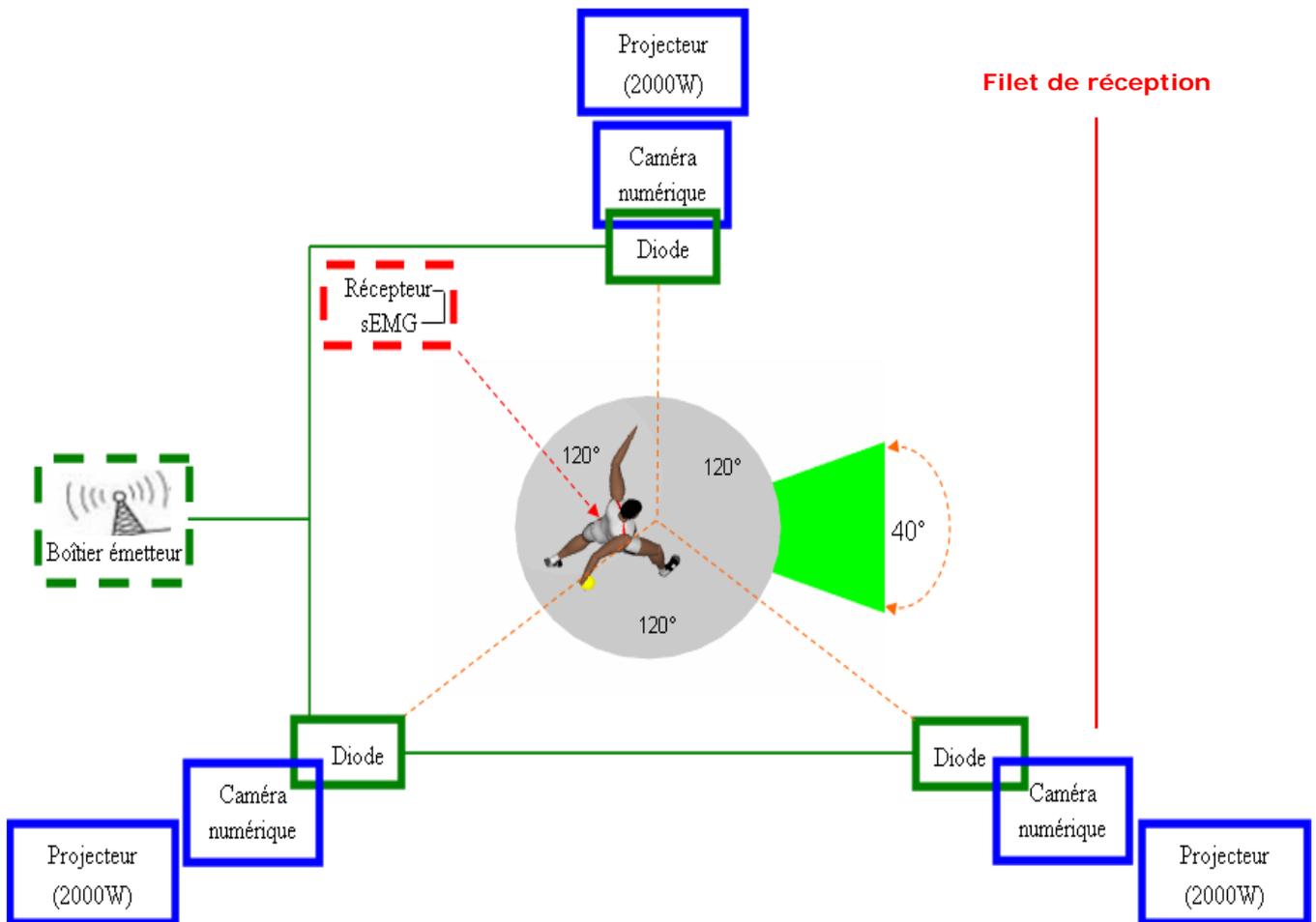


Figure 4-2 : Ensemble du dispositif de synchronisation : Vidéo-EMG (vu du dessus)
 40 : Angle de déviation de la trajectoire admis dans les compétitions internationales correspondant à l'aire de lancer

4.4 Méthodes utilisées dans les protocoles d'enregistrement des données Vidéo-EMG

4.4.1 Protocole d'enregistrement des données

L'expérimentation s'est déroulée dans le stade couvert de l'INSEP. Lors de séances habituelles d'entraînement, l'environnement du plateau de lancer a été aménagé pour recevoir le dispositif vidéographique d'analyse du mouvement en trois dimensions. Le lâcher du disque s'effectue dans un filet de sécurité disposé à une quinzaine de mètres devant le lanceur (cf. figure 4-2).

L'expérimentation commençait par un échauffement spécifique du lanceur, sous le contrôle de l'entraîneur national.

Une fois l'échauffement terminé et l'activité électromyographique maximale enregistrée (cf. chap. 2) pour chaque muscle choisi pour l'expérimentation, les sujets ont exécuté douze jets dans la même séance de mesure (6 avec un disque de 1,7 kg et 6 avec un disque de 2 kg ; ceci représente le nombre moyen des jets réalisés lors d'une séance d'entraînement).

Pour le traitement final des données, seulement dix jets ont été pris en compte (5 avec un disque de 1,7 kg et 5 avec un disque de 2 kg). En effet, seuls les jets égaux à au moins 80 % de la meilleure performance individuelle et avec un angle de déviation de la trajectoire $\beta = \pm 20^\circ$ (admis dans les compétitions internationales) ont été pris en compte dans cette analyse.

Lors de chaque session d'évaluation et sous le conseil de l'entraîneur national tous les athlètes ont effectué les lancers avec trois minutes de récupération entre chacun.

Toutes les séances de recueil de l'activité périphérique du mouvement comportaient deux types d'enregistrements simultanés : les prises de vue au cours du mouvement et l'acquisition des quantités électriques de différents groupes de muscles qui jouent un rôle important dans le niveau de réalisation du geste

4.4.2 Protocole d'enregistrements vidéo

Le protocole des enregistrements vidéo s'effectue en deux temps : phase de calibration de l'espace (une fois par journée expérimentale), puis recueil des données expérimentales.

- Calibration de l'espace du lancer.

L'étalonnage vidéo nécessite au minimum 11 points afin de déterminer les 11 constantes de la DLT pour chaque caméra utilisée lors des manipulations expérimentales. Pour se faire, il faut disposer d'un objet de contrôle ou de calibration dont on connaît précisément les coordonnées 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. Celui-ci possède 12 repères de calibration, visibles par les caméras dont on connaît précisément les coordonnées 3D dans un repère défini comme repère de contrôle (*cf. tableau 4-1*). Ces repères sont revêtus d'un matériau réfléchissant (Scotch-liteR). Ce parallélépipède, placé sur l'aire de lancer, (*cf. photo 4-2*) délimite le volume à l'intérieur duquel le mouvement de lancer de disque sera ensuite effectué. 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 de l'athlète. 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 du jet.

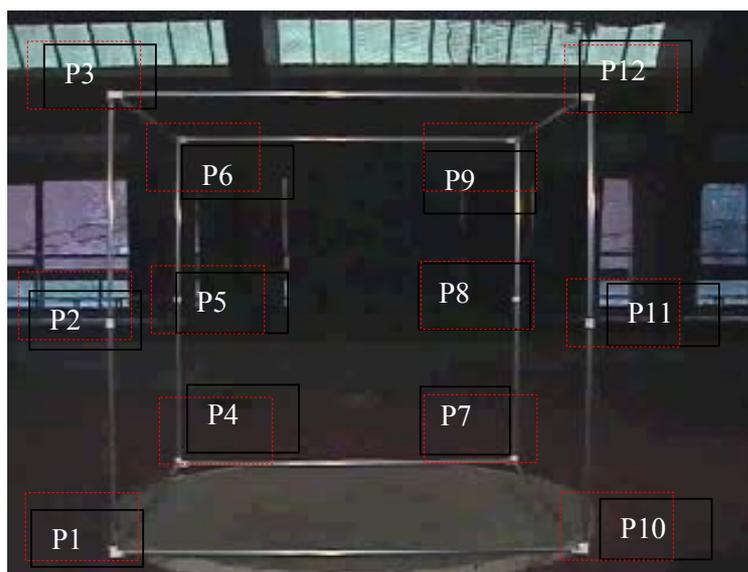


Photo4-2 : Parallélépipède d'étalonnage de l'espace d'évolution du lanceur de disque
P₁-P₁₂ : points de repère de la calibration

Points	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
P1	0	0	0
P2	0	210	0
P3	210	210	0
P4	210	0	0
P5	0	0	100
P6	0	210	100
P7	210	210	100
P8	210	0	100
P9	0	0	200
P10	0	210	200
P11	210	210	200
P12	210	0	200

Tableau 4-1 : Coordonnées physiques des repères du parallélépipède de calibration.

Le mouvement a été décrit par rapport à un repère Galiléen R_0 , d'origine P_1 , avec des axes x , y et z parallèles respectivement aux segments de droite P_1 - P_{10} (latéral), P_1 - P_4 (antéro-postérieur) et P_1 - P_3 (vertical).

- Prises de vue au cours du mouvement du lancer de disque.

Afin d'augmenter les contrastes, les athlètes étaient vêtus d'une combinaison intégrale moulante noire, du modèle utilisé en hiver par les patineurs et portaient des couvre-chaussures de la même couleur (cf. photo 4-3)

Sur cette combinaison intégrale, 18 marqueurs, constitués de petits carrés de 2 cm de diamètre, recouverts de (Scotch-lite[®]), étaient fixés au moyen d'une bande adhésive double face.

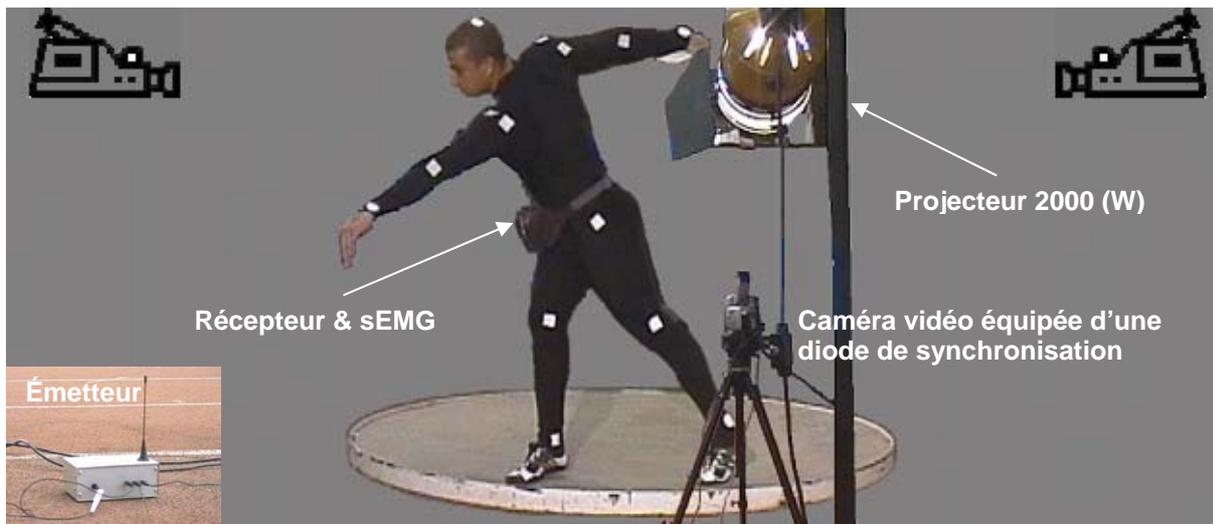


Photo 4-3 : Lanceur équipé

4.4.3 Traitement des données mécaniques

Les enregistrements sur bandes magnétiques ont ensuite été stockés sous forme de fichier AVI sur le disque dur d'un ordinateur compatible PC sous Windows (NT 2000) après numérisation au moyen d'une carte spécifique (carte de numérisation Miro DC30+).

Une fois enregistrées sous le fichier AVI à 25 images par seconde, les trames paires et impaires de la même image ont été séparées (détramage). Le détramage des images permet donc de doubler le nombre de trames et d'atteindre une fréquence d'échantillonnage de 50Hz.

Ces fichiers étaient ensuite traités à l'aide du logiciel « 3D VISION » (Biometrics France).

Ce traitement comportait quatre étapes essentielles :

1. Saisie de la position des marqueurs à partir des images vidéo, effectuée à l'aide du sous-programme Snap32. Les cibles sont fortement contrastées par rapport à l'image vidéo. La discrimination des cibles se fait par un cueillage en « vraie couleur », c'est-à-dire avec une palette de couleurs la plus étendue possible (32 bits). Du fait de la complexité du mouvement (rotation plus translation) et du modèle choisi, la saisie de la position des marqueurs a été effectuée manuellement en cliquant avec la souris au centre de chaque cible dans un ordre déterminé afin d'obtenir la plus grande précision possible. Toutes les images des trois caméras ont été traitées afin d'obtenir une reconstruction 3D, ce qui représente environ 375 images pour un seul jet.
2. Elimination du bruit : les données ont été filtrées au moyen d'un filtre Butterworth, avec une fréquence de coupure de 12 Hz.
3. Reconstruction en 3D à partir de plusieurs fichiers 2D par la méthode DLT (Direct Linear Transformation).

4. Calculs de données cinématiques dans le sous-programme 3D VIEW de paramètres comme la vitesse, l'accélération et l'angle d'éjection du disque. Ce sous-programme affiche les kinogrammes sous plusieurs angles de vue sur le même écran que le fichier vidéo correspondant. De plus, les animations de ces différentes fenêtres peuvent être synchronisées. Il est ainsi possible de suivre en même temps la vidéo et le déroulement des kinogrammes. Il est aussi possible de comparer plusieurs fichiers différents (plusieurs mouvements différents).

A partir des données de position de chaque marqueur identifié, nous avons calculé principalement, des paramètres de durée, de vitesse, d'angle et l'estimation de la longueur de lancer (performance).

4.4.4 Traitement des données électromyographiques

Dans un premier temps nous avons synchronisé l'ensemble des données mécaniques avec les données électromyographiques.

Dans un deuxième temps nous avons daté l'activité musculaire au cours des différentes phases de lancers identifiées grâce à l'analyse cinématique.

Enfin, nous avons quantifié l'activité EMG en prenant en considération le signal intégré (EMG intégré, EMGi en mV.s) calculé pour toutes les bouffées à partir du signal redressé, et exprimé en rapport avec les différentes phases mécaniques et pour la durée totale du mouvement. Pour chaque muscle analysé, l'EMGi était normalisé (EMGi normalisé, EMGin) pour chacune des bouffées par rapport à son activité maximale (EMGimax obtenu sur une période de 0,5s) observée lors d'un effort maximal CMVi.

4.4.5 Traitement statistique

Les valeurs sont exprimées sous forme de moyennes et d'écart types. Pour comparer les différents indices mécaniques et électromyographiques, nous avons utilisé un test paramétrique pour des échantillons indépendants (t de Student). Le seuil significatif a été fixé à $p < 0,05$.

CHAPITRE 5 - RESULTATS

5.1 Cinématique du disque

L'évolution des moyennes des vitesses du disque pour l'ensemble des jets réalisés par tous les sujets avec les deux conditions de masse (1,7 vs 2 kg), (cf. figure 5-1), fait apparaître les constats suivants :

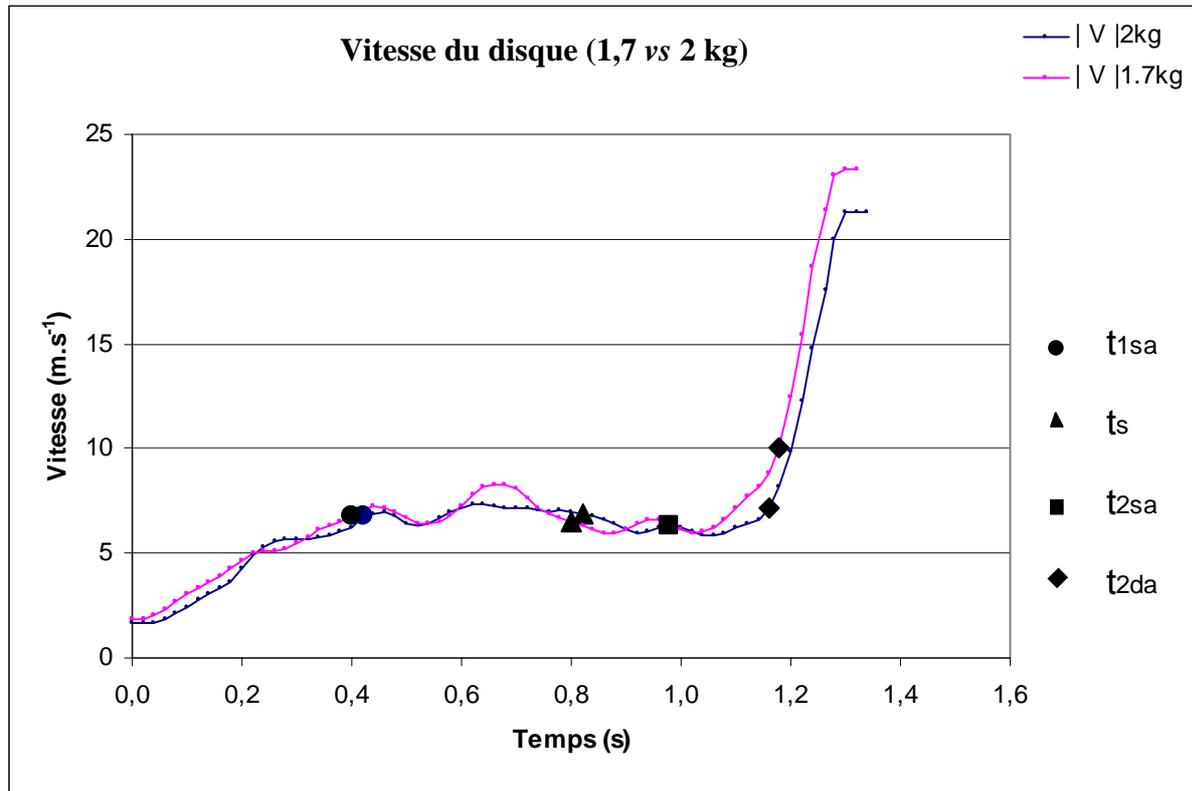


Figure 5-1 Evolution de vitesses du disque pour l'ensemble des jets réalisés par tous les sujets avec les deux conditions de masse (1,7 vs 2 kg).

t_{1sa} : début de la première phase de simple appui, t_s : début de la phase aérienne, t_{2sa} : début de la deuxième phase de simple appui, t_{2da} : début de la deuxième phase de double appui.

L'examen global des trajets de deux vitesses du disque (V à 2 kg et V à 1,7 kg) ne montre pas *a priori*, des modifications importantes du patron cinématique du disque pour les deux conditions de masse. Cependant, nous pouvons distinguer les variations suivantes :

- la durée de la première phase est légèrement plus élevée pour le disque lourd.
- en revanche, la durée de la phase Δt_{1sa} est la même pour les deux conditions de masse, mais la vitesse du disque léger au cours de cette phase est *a priori* plus élevée.
- la durée de la phase Δt_s est légèrement plus importante pour le disque léger.

- au début de la phase Δt_{2sa} , les valeurs des vitesses du disque sont égales pour les deux conditions de masse. En revanche, cette phase de deuxième simple appui présente une durée légèrement plus importante pour le disque léger. De plus, la vitesse de celui-ci apparaît comme plus élevée au cours de deux dernières phases du lancer. On observe donc, une « accélération » plus marquée du disque léger au cours de ces deux phases.

Il apparaît, que le temps total du lancer est plus court pour les jets réalisés avec un disque de 1,7 kg. De plus, la vitesse d'éjection est plus élevée lors des lancers effectués avec un disque léger.

Paramètres Cinématiques		Moyennes et écart-types (\pm SD)		Tests Statistiques
		2 kg	1,7 kg	
Durée de la phase de départ en double appui (Δt_{1da})	Δt_{1da} (s)	0,5 \pm 0,11	0,46 \pm 0,10	NS
	Δt_{1da} (%)	33 \pm 4,48	31,40 \pm 3,38	NS
Durée de la phase de départ en simple appui (Δt_{1sa})	t_{1sa} (s)	0,5 \pm 0,11	0,45 \pm 0,09	NS
	Δt_{1sa} (s)	0,46 \pm 0,06	0,46 \pm 0,06	NS
	Δt_{1sa} (%)	30,94 \pm 2,81	32 \pm 1,75	NS
Durée de la phase aérienne (Δt_s)	t_s (s)	0,96 \pm 0,15	0,92 \pm 0,15	NS
	Δt_s (s)	0,11 \pm 0,04	0,10 \pm 0,04	NS
	Δt_s (%)	7,23 \pm 2,83	7,19 \pm 3,25	NS
Durée de la phase finale en simple appui (Δt_{2sa})	t_{2sa} (s)	1,07 \pm 0,16	1,02 \pm 0,15	NS
	Δt_{2sa} (s)	0,24 \pm 0,06	0,24 \pm 0,06	NS
	Δt_{2sa} (%)	16,18 \pm 3,54	16,38 \pm 3,41	NS
Durée de la phase finale en double appui (Δt_{2da})	t_{2da} (s)	1,31 \pm 0,19	1,26 \pm 0,19	NS
	Δt_{2da} (s)	0,19 \pm 0,06	0,19 \pm 0,06	NS
	Δt_{2da} (%)	12,64 \pm 3,49	13,03 \pm 3,84	NS
Durée totale du jet (t_e)	t_e (s)	1,50 \pm 0,20	1,44 \pm 0,19	NS
Vitesse du disque lors de la phase (Δt_{1da})	$\Delta V_{t_{1da}}$ (m.s ⁻¹)	5,16 \pm 1,30	5,29 \pm 1,30	NS
Vitesse du disque lors de la phase (Δt_{1sa})	$V_{t_{1sa}}$ (m.s ⁻¹)	5,17 \pm 1,30	5,29 \pm 1,30	NS
	$\Delta V_{t_{1sa}}$ (m.s ⁻¹)	2,13 \pm 1,37	1,86 \pm 1,30	NS
Vitesse du disque lors de la phase (Δt_s)	V_{t_s} (m.s ⁻¹)	7,29 \pm 1,36	7,15 \pm 1,22	NS
	ΔV_{t_s} (m.s ⁻¹)	0,32 \pm 0,70	0,03 \pm 0,87	NS
Vitesse du disque lors de la phase (Δt_{2sa})	$V_{t_{2sa}}$ (m.s ⁻¹)	6,97 \pm 1,00	7,12 \pm 0,94	NS
	$\Delta V_{t_{2sa}}$ (m.s ⁻¹)	1,72 \pm 1,94	1,63 \pm 2,31	NS
Vitesse du disque lors de la phase (Δt_{2da})	$V_{t_{2da}}$ (m.s ⁻¹)	8,69 \pm 2,12	8,75 \pm 2,14	NS
	$\Delta V_{t_{2da}}$ (m.s ⁻¹)	10,92\pm2,20	11,87\pm2	p=0,04
Vitesse d'éjection	V_{dt_e} (m.s ⁻¹)	19,61\pm0,78	20,62\pm0,94	p=0,0003
Angle d'éjection	α (°)	36,41\pm3,91	36,05\pm3,23	NS
Performance	d_j (m)	39,38\pm3,43	43,16\pm4,27	p=0,0001

Tableau 5-1 : Ensemble des valeurs (moyennes et écart-types) des paramètres cinématiques de la trajectoire du disque pour les deux conditions de masse.

Moyennes et Ecart-types des paramètres cinématiques calculés pour les 7 athlètes avec les deux disques de masses différentes (1,7 kg vs 2 kg). La durée (Δt , exprimée en valeur absolue (s) et relative (%) par rapport à la durée totale du mouvement) et la variation de vitesse (ΔV , en m.s⁻¹) sont calculées pour chacune des 5 phases caractéristiques du lancer (cf. méthodologie) ; Δt_{1da} : phase de départ en double appui, Δt_{1sa} : phase de départ en simple appui, Δt_s : phase aérienne, Δt_{2sa} : phase finale en simple appui, Δt_{2da} : phase finale en double appui. p : le seuil significatif a été fixé à $p < 0,05$, NS : non significatif.

L'analyse statistique (cf. tableau 5-1) n'a pas montré de différence significative entre les durées des différentes phases du lancer pour les deux masses du disque (1,7 vs 2 kg). Ceci est vrai aussi pour la durée totale du mouvement. A l'inverse, nous avons trouvé que les valeurs moyennes des vitesses d'éjection calculées pour les deux masses du disque sont significativement différentes ($p = 0,0003$). Il en est de même pour la performance recalculée ($p = 0,0001$) dans les deux cas. Cette différence semble liée à un gain de vitesse du disque (1,7 kg vs 2 kg) plus important pendant la phase finale en double appui (Δt_{2da}), ($12,93 \pm 1,36 \text{ m.s}^{-1}$ vs $11,04 \pm 1,01 \text{ m.s}^{-1}$).

5.2 Plan d'excitation musculaire des muscles de la ceinture scapulaire - Evaluation des niveaux d'activation musculaire

L'EMG montre l'existence de plans d'excitation musculaire variant à l'intérieur d'une même discipline, d'une même spécialité et selon le style adopté par l'athlète. A l'inverse, il existe des séquences communes à différents gestes sportifs, lorsque ce-ci entrent dans le même groupe d'activités (Bouisset et Maton, 1995). C'est le cas pour les lancers ou les frappes de balles qui impliquent un mouvement du haut en bas du membre supérieur et une latéralisation du sujet.

De plus, l'action de muscles de la ceinture scapulaire joue un rôle essentiel dans la réalisation d'un mouvement balistique. Pour se faire, nous avons analysé l'activité électrique de *Trapezius pars descendens* [TM], *Deltoideus pars medialis* [DM], *Biceps brachii* [BB], *Deltoideus pars anterior* [DA] et *Pectoralis major* [PM] sur la totalité du geste du lancer de disque.

5.2.1 Chronologie des actions musculaires pour un lancer avec les deux conditions de masse (1,7 kg vs 2 kg)

L'examen des tracés électromyographiques de muscles de la ceinture scapulaire pour un lancer avec un disque lourd, montre deux périodes d'activation (cf. figure 5-2 A). La première période d'activation est située au début du geste et concerne le [TM] et le [DM]. A l'inverse la deuxième période d'activation est située à la fin du mouvement et concerne le [BB], le [DA], le [PM] et le [TM]. Pour le [TM], seules les données de 4 sujets sur 7 ont été exploitables. Ceci ne nous permet pas de généraliser le comportement du [TM] pour l'ensemble de la population étudiée.

Lancers avec les deux conditions de masse (1,7kg et 2kg)

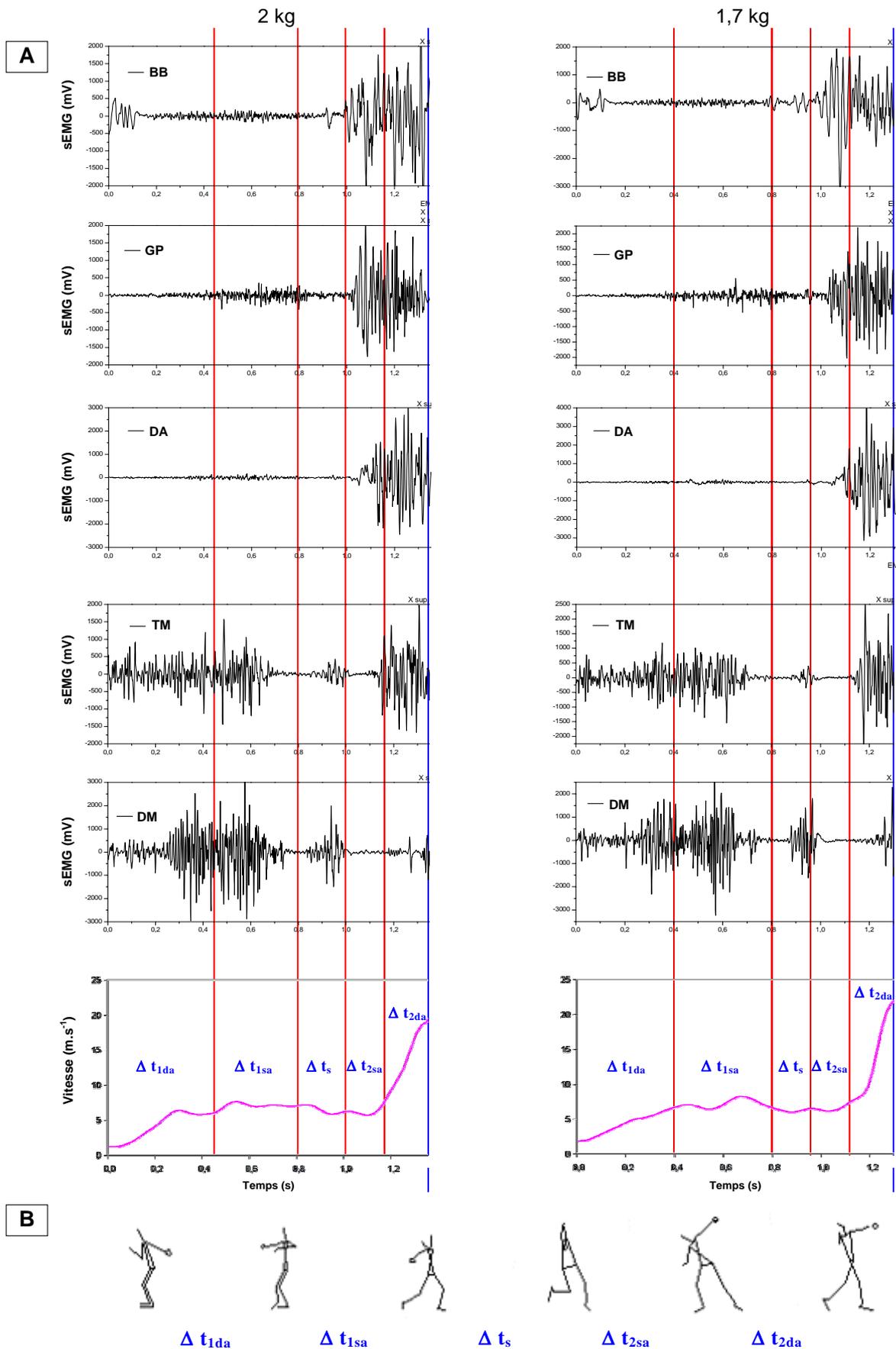


Figure 5-2 A: Exemple d'activité électromyographique de surface sEMG (μV) enregistrée sur 5 muscles et synchronisée (traits verticaux rouges délimitant les 5 phases) avec l'évolution de la vitesse du disque pour les deux conditions de masse (1,7 vs 2kg).

Figure 5-2 B: Représentation schématique des 5 phases spécifiques du lancer de disque

Analyse de la première période pour un lancer avec un disque de 2 kg :

L'analyse des temps normalisés en pourcentage du temps total de mouvement, bornant cette première période, montre qu'au début de bouffée le [TM] est activé en premier, à T_{12,32} (soit à 12,32 % du temps total du mouvement). Il est suivi par le [DM] activé à T_{18,26}. De plus, en fin de bouffée le [TM] s'arrête le premier à l'instant T_{48,16} et le [DM] à T_{51,02} (cf. tableau 5-2).

Cependant, les tests statistiques montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre le début et la fin de l'activation du [TM] et du [DM] ($p = 0,22$ et $p = 0,53$ respectivement). Le début de cette première bouffée est situé au cours de la première phase « double appui » (t1da) et la fin de cette même bouffée est située au cours de la première phase « simple appui » (t1sa).

Par conséquent, on en déduit que ces 2 muscles travaillent en coopération au début du lancer pour maintenir le bras en position horizontale et dans l'axe des épaules.

Chronologie d'activation des muscles de la ceinture scapulaire	Moyennes et écart-types des valeurs relatives (en %)	
	Disque de 2 kg	Disque de 1,7 kg
1^{ère} période		
TM début (%)	12,32 ± 7,25	12,61 ± 9,84
DM début (%)	18,26 ± 6,63	14,18 ± 8,74
TM Fin (%)	48,16 ± 15,87	41,21 ± 9,89
DM Fin (%)	51,02 ± 7,55	42,07 ± 7,20
2^{ème} période		
BB Début (%)	76,22 ± 7,52	76,35 ± 6,22
GP Début (%)	81,85 ± 5,59	81,21 ± 6,77
DA Début (%)	86,27 ± 5,58	82,33 ± 8,03
TM Début (%)	89,87 ± 1,91	89,50 ± 2,57

Tableau 5-2: Ensemble des valeurs moyennes et écart-types des différents moments d'activation des muscles de la ceinture scapulaire pour les deux conditions de masse (calculées pour les 7 athlètes et exprimée en valeur relative (%))

[TM], [DM], [BB], [DA], [PM] : muscles de la ceinture scapulaire.

Analyse de la deuxième période pour un lancer avec un disque de 2 kg :

L'examen de l'activité des muscles de la ceinture scapulaire porte sur le début de cette deuxième période, la fin de celle-ci correspondant avec la fin du mouvement.

L'analyse de l'activité myoélectrique de cette deuxième période, révèle une mise en action différenciée significative : on observe que le [BB] est activé en premier et il est suivi dans l'ordre par les trois autres muscles, le [PM], le [DA] et le [TM] (cf. figure 5-3).

De plus, les tests statistiques effectués entre le début de l'activation de l'ensemble des muscles de la ceinture scapulaire mettent en évidence une mise en action différenciée significative comme suit :

- début différencié entre [BB] et [PM], ($p = 0,009$)
- début différencié entre [BB] et [DA], ($p = 0,0003$)
- début différencié entre [PM] et [DA] ($p = 0,0001$)
- début différencié entre [PM] et [TM] ($p = 0,0001$)
- début différencié entre [BB] et [TM] ($p = 0,00001$)
- début différencié entre [DA] et [TM] ($p = 0,03$)

L'activité musculaire de cette deuxième période est située au cours des 2 dernières phases de lancer (t2sa et t2da).

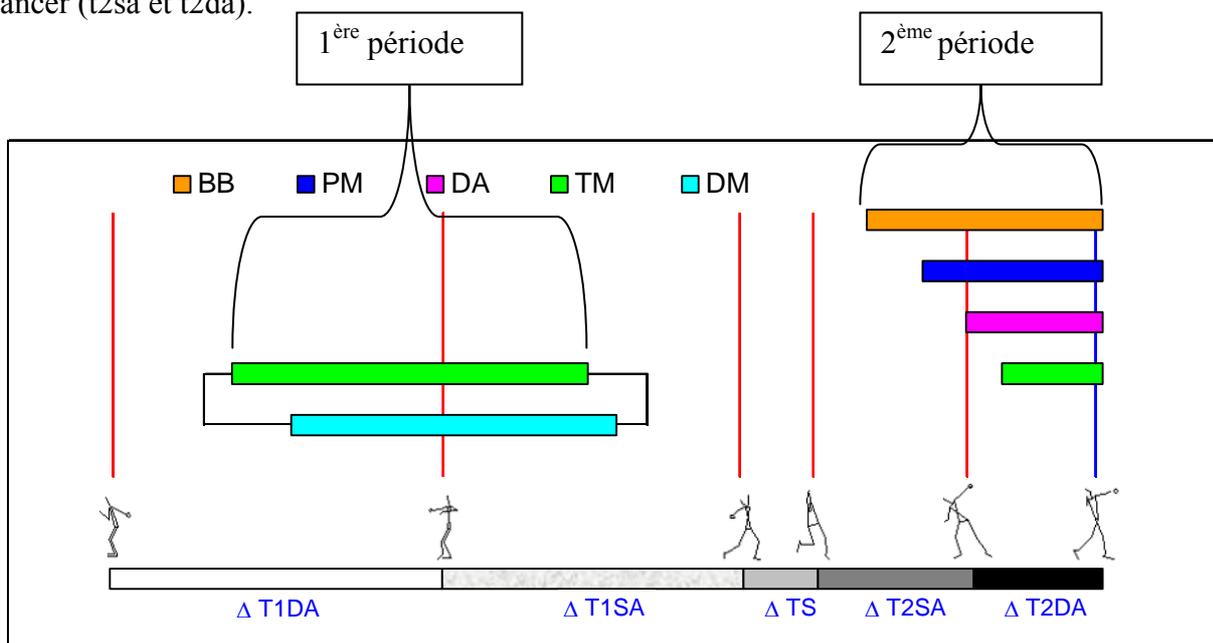


Figure 5-3 : Plan d'excitation musculaire des muscles de la ceinture scapulaire pour un lanceur lors d'un jet avec un disque de 2 kg. Les périodes d'activité myoélectrique sont représentées sous forme de rectangles des différentes couleurs spécifiques à chaque muscle. Ces périodes sont exprimées en valeur relative (%) par rapport à l'ensemble de la durée des 5 phases spécifiques du lancer de disque ; Muscles enregistrés : [TM], Trapezius pars descendens ; [DM], Deltoideus pars medialis [BB], Biceps brachii ; [DA], Deltoideus pars anterior et [PM], Pectoralis major ; Δt_{1da} : phase de départ en double appui, Δt_{1sa} : phase de départ en simple appui, Δt_s : phase aérienne, Δt_{2sa} : phase finale en simple appui, Δt_{2da} : phase finale en double appui.

Analyse de la première période pour un lancer avec un disque de 1,7 kg :

L'étude des temps normalisés en pourcentage du temps total de mouvement, bornant cette première période pour un lancer avec un disque léger, montre qu'au début de bouffée le *[TM]* est activé en premier, à $T_{12,61}$ (soit à 12,61 % du temps total du mouvement). Il est suivi par le *[DM]* activé à $T_{14,18}$. De plus, en fin de bouffée le *[TM]* s'arrête le premier à l'instant $T_{41,21}$ et le *[DM]* à $T_{42,07}$ (cf. tableau 5-2).

Les tests statistiques montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre le début et la fin de l'activation du *[TM]* et du *[DM]* ($p = 0,30$ et $p = 0,43$ respectivement). Le début de cette première bouffée est situé au cours de la première phase « double appui » (t_{1da}) et la fin de cette même bouffée est située au cours de la première phase « simple appui » (t_{1sa}).

Ainsi, pour un lancer avec un disque de 1,7 kg, ces 2 muscles travaillent en coopération au début du lancer pour maintenir le bras en position horizontale et dans l'axe des épaules.

Analyse de la deuxième période pour un lancer avec un disque de 1,7 kg :

L'analyse de l'activité électrique pour un lancer avec un disque léger de cette deuxième période, montre une mise en action différenciée significative dans un ordre établi comme suit : on observe que le *[BB]* est activé en premier à $T_{76,35}$ (cf. tableau 5-2) et il est suivi par les trois autres muscles, le *[PM]* (activé à $T_{81,20}$), le *[DA]* (activé à $T_{82,33}$) et le *[TM]* (activé à $T_{89,50}$).

Cette séquence d'activation, commune aux muscles de la ceinture scapulaire lors des phases finales du lancer semble liée d'une part, à l'organisation posturale spécifique du lâcher du disque et d'autre part, aux fonctions anatomiques de ces muscles d'antépulsion et d'adduction du bras lorsque celui-ci est placé en rotation interne.

5.2.2 Comparaison des actions musculaires dans les deux conditions de lancer

L'examen global des tracés électromyographiques de muscles de la ceinture scapulaire pour un lancer avec un disque léger, montre un comportement similaire (cf. figure 5-4) à celui d'un lancer avec le disque lourd : 2 mêmes périodes d'activation, une première période d'activation située au début du geste et concerne le *[TM]* et le *[DM]*, suivie d'une deuxième période d'activation située à la fin du mouvement et qui concerne le même groupe de muscles, le *[BB]*, le *[DA]*, le *[PM]* et le *[TM]*.

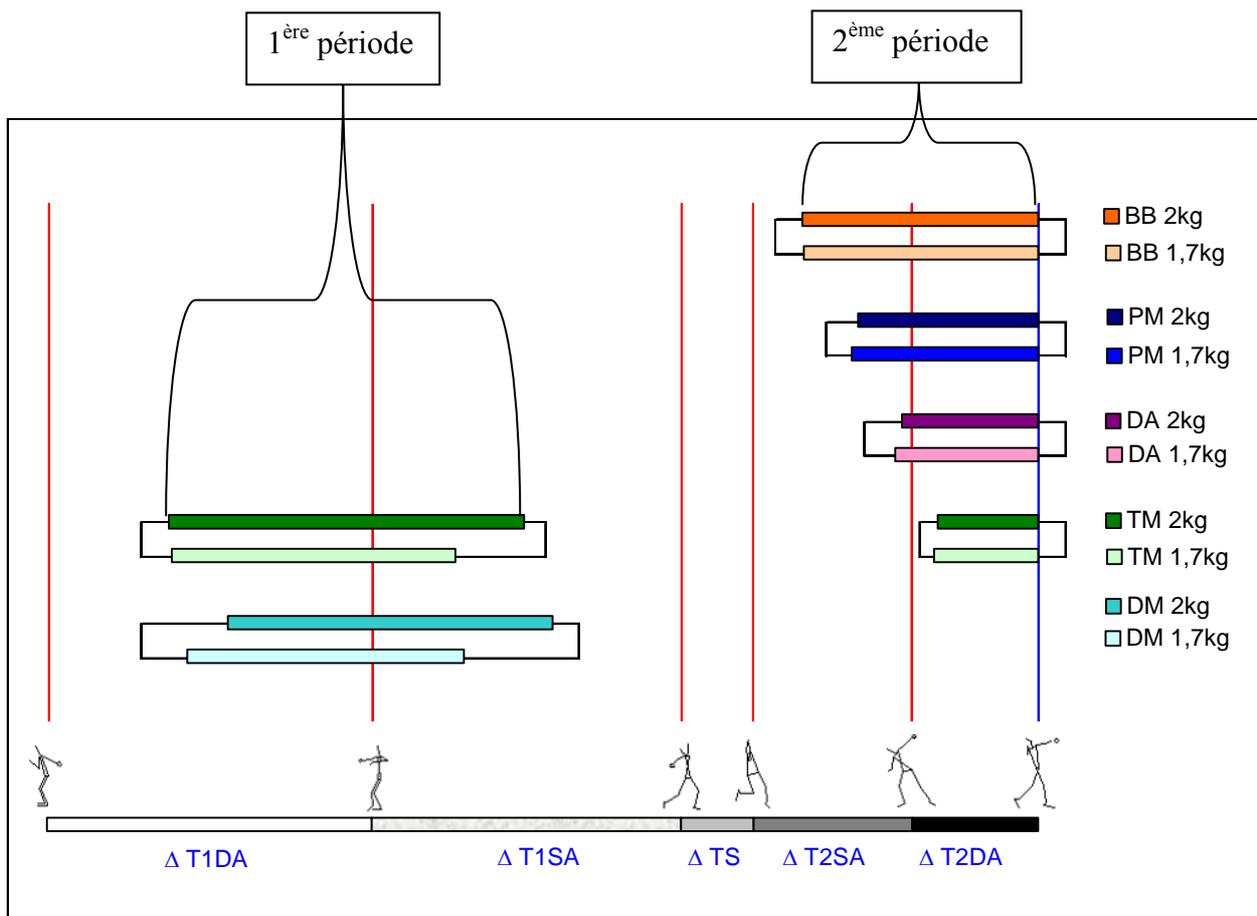


Figure 5-4 : *Patrons d'excitation musculaire des muscles de la ceinture scapulaire pour les deux conditions de masse (2 kg vs 1,7 kg). Les périodes d'activité myoélectrique sont représentées sous forme de rectangles de couleurs spécifiques à chaque muscle. Ces périodes sont exprimées en valeur relative (%) par rapport à l'ensemble de la durée des 5 phases spécifiques du lancer de disque.*

Muscles enregistrés : [TM], Trapezius pars descendens ; [DM], Deltoideus pars medialis [BB], Biceps brachii ; [DA, Deltoideus pars anterior et [PM], Pectoralis major ; Δt_{1da} : phase de départ en double appui, Δt_{1sa} : phase de départ en simple appui, Δt_s : phase aérienne, Δt_{2sa} : phase finale en simple appui, Δt_{2da} : phase finale en double appui.

Les tests statistiques portant sur le moment du début et fin d'activation de la première période, confirment le travail en coopération musculaire du [TM] et du [DM] pour les deux conditions de masse. Il en est de même pour l'analyse de la deuxième période. En effet, on remarque la même succession de mise en activation (1,7 vs 2 kg) : le [BB] le [PM], le [DA] et le [TM] (cf. figure 5-4). Cependant, pour les jets effectués avec le disque léger, l'indice de significativité enregistre des valeurs autour de son seuil maximal fixé à $p < 0,05$. C'est le cas pour le [BB] et [DA] ($p = 0,056$) et pour le [PM] et [DA] ($p = 0,06$). Ces résultats suggèrent une légère dégradation du geste pour les lancers employant un disque de 1,7 kg.

5.2.3 Analyse quantitative de quantités électriques (EMG_{in}/dt) avec les deux conditions de masse (1,7 kg vs 2 kg)

Les valeurs moyennes de quantités électriques (EMG_{in}/dt) pour *chacun des muscles* de la ceinture scapulaire (calculées par phase mécanique et pour la durée totale du mouvement), semblent ne présenter aucune différence significative en fonction de la masse du disque (1,7 kg vs 2 kg) ; (20,77 ± 10,88 u.a. vs 23,71 ± 11,25 u.a. pour le DA ; 22,36 ± 10,28 u.a. vs 26,77 ± 11,12 u.a. pour le PM ; 29,39 ± 18,57 u.a. vs 33,36 ± 29,23 u.a. pour le DM ; 26,24 ± 39,36 u.a. vs 26,19 ± 37,25 u.a. pour le BB ; 27,50 ± 10,34 u.a. vs 27,70 ± 10,35 u.a. pour le TM) (cf. tableau 5-3).

Cependant, pour certains muscles la valeur moyenne de l'EMG_{in}/dt au cours de la phase finale en double appui (Δt_{2da}), semble plus importante pour le disque léger et pour d'autres pour le disque lourd. Ceci est vrai, en particulier, pour le PM (66,21 ± 26,89 u.a. vs 86,26 ± 40,32 u.a.) et pour le BB (64,79 ± 77,97 u.a. vs 50,37 ± 49,57 u.a.).

L'analyse de quantités électriques (calculées par phase mécanique et pour la durée totale du mouvement) effectuée pour les différentes phases de chacun des muscles de la ceinture scapulaire révèle des différences importantes (cf. figure 5-5). En effet, on observe d'une part, que certains muscles présentent un niveau de recrutement faible au début du geste (5,73 ± 4,04 u.a. vs 5,60 ± 4,76 pour le DA ; 4,56 ± 2,10 u.a. vs 4,29 ± 1,48 pour le PM ; 3,30 ± 2,55 u.a. vs 3,23 ± 2,35 pour le BB) et d'autre part que ces mêmes muscles montrent un niveau de recrutement relativement important vers la fin du mouvement (84,57 ± 45,84 u.a. vs 82,41 ± 49,61 pour le DA ; 62,21 ± 26,89 u.a. vs 86,26 ± 40,32 pour le PM ; 92,90 ± 171,58 u.a. vs 83,31 ± 151,83 pour le BB) (cf. tableau 5-3).

A l'inverse, les deux muscles jouant un rôle prépondérant postural dans le maintien du bras lanceur et la stabilisation de la scapula (le DM et le TM), présentent un niveau d'activation relativement constant sur l'ensemble du geste. Cependant, il semble (cf. figure 5-5) que le niveau de recrutement du DM enregistre un léger pic au début du geste et que le TM est plus actif vers la fin du mouvement.

Muscles	Phases	Valeurs moyenne et écart-type EMGin (u.a.)						Tests Statistiques
		Disque de 2 kg			Disque de 1,7 kg			
DA	T1DA	5.73	±	4.04	5.60	±	4.76	NS
	T1SA	7.53	±	4.65	9.86	±	6.87	NS
	TS	11.73	±	13.73	22.07	±	28.47	NS
	T2SA	27.07	±	14.18	31.54	±	23.57	NS
	T2DA	84.57	±	45.84	82.41	±	49.61	NS
	TOTAL	20.77	±	10.88	23.71	±	11.25	NS
PM	T1DA	4.56	±	2.10	4.29	±	1.48	NS
	T1SA	7.94	±	5.92	14.14	±	17.24	NS
	TS	8.63	±	4.68	20.79	±	31.18	NS
	T2SA	61.10	±	51.40	46.96	±	32.79	NS
	T2DA	66.21	±	26.89	86.26	±	40.32	p=0,01
	TOTAL	22.36	±	10.28	26.77	±	11.12	NS
DM	T1DA	25.90	±	15.76	24.86	±	16.08	NS
	T1SA	28.47	±	17.56	45.74	±	55.89	NS
	TS	32.79	±	39.22	38.06	±	57.99	NS
	T2SA	34.17	±	59.41	29.64	±	29.37	NS
	T2DA	35.83	±	21.71	24.34	±	9.42	NS
	TOTAL	29.39	±	18.57	33.36	±	29.23	NS
BB	T1DA	3.30	±	2.55	3.23	±	2.35	NS
	T1SA	4.11	±	4.10	7.46	±	9.69	NS
	TS	7.54	±	5.39	19.44	±	27.72	NS
	T2SA	92.90	±	171.58	83.31	±	151.83	NS
	T2DA	64.79	±	77.97	50.37	±	49.57	p=0,05
	TOTAL	26.24	±	39.36	26.19	±	37.25	NS
TM	T1DA	21.20	±	12.06	21.05	±	11.51	NS
	T1SA	30.05	±	14.96	28.48	±	14.71	NS
	TS	15.80	±	13.92	25.47	±	22.69	NS
	T2SA	23.98	±	12.40	19.93	±	13.82	NS
	T2DA	53.78	±	28.15	45.45	±	25.00	NS
	TOTAL	27.50	±	10.34	27.70	±	10.35	NS

Tableau 5-3 : Ensemble des valeurs moyennes et écart-types de quantités électriques (EMGin/dt) calculées pour les 7 athlètes et pour les deux conditions de masse (1,7 kg vs 2 kg).

Les quantités électriques (EMGin/dt, exprimée en unités adimensionnelles) sont calculées pour chacune des 5 phases caractéristiques du lancer et pour la durée totale du mouvement (cf. méthodologie) ; Muscles enregistrés : [TM], Trapezius pars descendens ; [DM], Deltoideus pars medialis [BB], Biceps brachii ; [DA], Deltoideus pars anterior et [PM], Pectoralis major ; Δt_{1da} : phase de départ en double appui, Δt_{1sa} : phase de départ en simple appui, Δt_s : phase aérienne, Δt_{2sa} : phase finale en simple appui, Δt_{2da} : phase finale en double appui ; p : le seuil significatif a été fixé à $p < 0,05$, NS : non significatif.

Evolution de quantités électriques (EMGin/dt) pour l'ensemble des muscles de la ceinture scapulaire avec les deux conditions de masse (1,7 kg vs 2 kg)

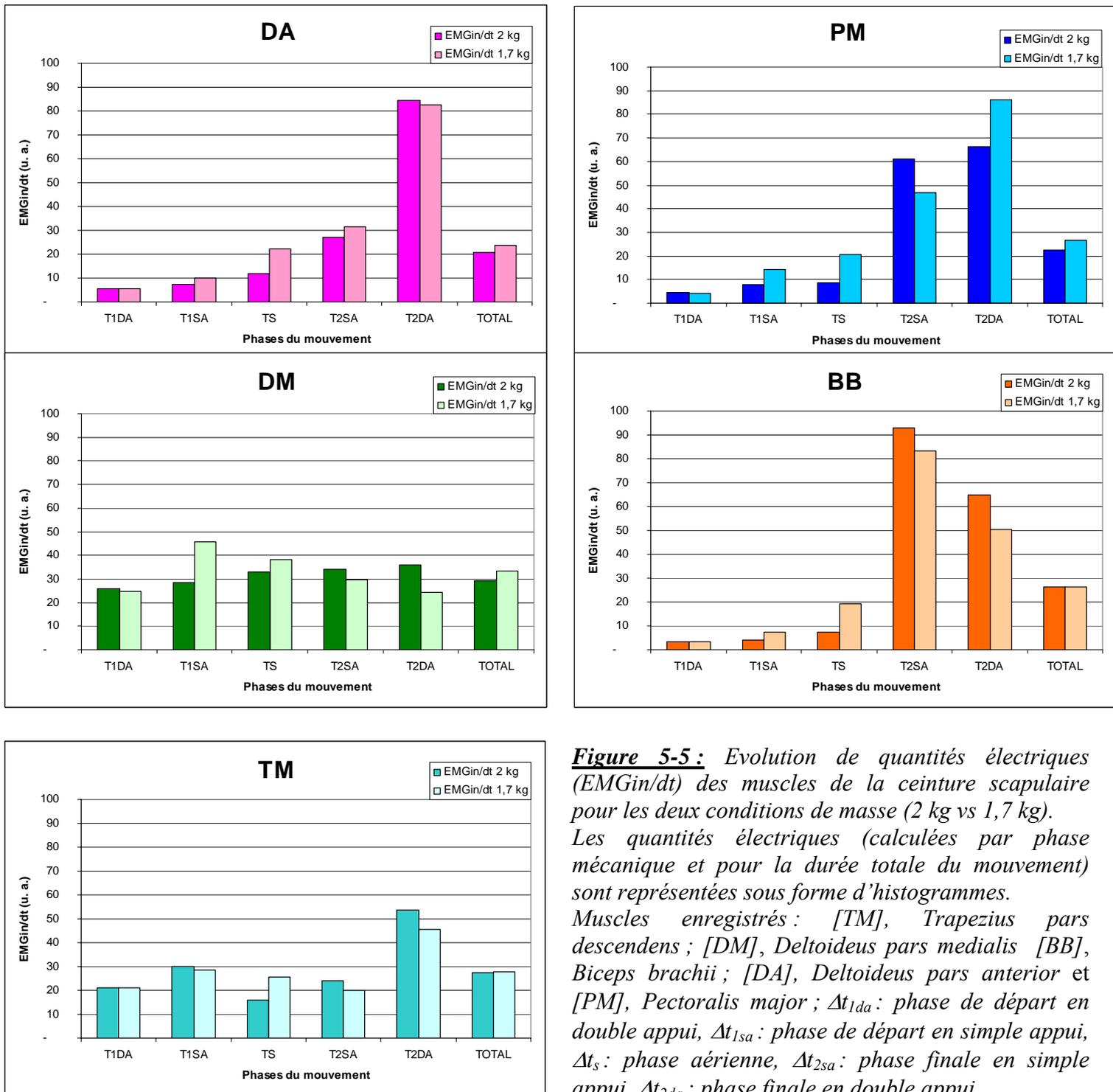


Figure 5-5 : Evolution de quantités électriques (EMGin/dt) des muscles de la ceinture scapulaire pour les deux conditions de masse (2 kg vs 1,7 kg). Les quantités électriques (calculées par phase mécanique et pour la durée totale du mouvement) sont représentées sous forme d'histogrammes. Muscles enregistrés : [TM], Trapezius pars descendens ; [DM], Deltoideus pars medialis [BB], Biceps brachii ; [DA], Deltoideus pars anterior et [PM], Pectoralis major ; Δt_{1da} : phase de départ en double appui, Δt_{1sa} : phase de départ en simple appui, Δt_s : phase aérienne, Δt_{2sa} : phase finale en simple appui, Δt_{2da} : phase finale en double appui.

5.3 Discussion

Ces résultats montrent que, quelle que soit la masse du disque, l'allure générale de l'évolution de la vitesse au cours des 5 phases n'est pas modifiée (Schluter et Nixdorf, 1984) ; Schöllhorn, 1989). Ceci n'est, cependant, pas vrai pour les valeurs de vitesse d'éjection et pour la performance recalculée. Cette différence semble liée à un gain de vitesse dans la phase finale de double appui qui est plus important avec le disque de 1,7 kg.

Par ailleurs, la modification de la masse du disque n'a pas d'effet sur la chronologie de la mise en action des muscles de la ceinture scapulaire (*cf. figure 5-2 A et figure 5-4*). En effet, pour les deux conditions de masse, nous avons montré d'une part, une coopération musculaire au début du geste entre le *[TM]* et le *[DM]* et d'autre part une mise en action différenciée à la fin du geste entre le *[BB]*, le *[PM]* le *[DA]*, et le *[TM]* (Finager In Bartlett, 1992). A partir de ces résultats, il est intéressant de souligner les fonctions pendant le mouvement des muscles de la ceinture scapulaire.

En effet, le travail en coopération du *[TM]* et du *[DM]* au début du lancer suggère un maintien du bras en position horizontale et dans l'axe des épaules.

A la fin du geste, le rôle du *[BB]* (premier muscle activé), est la mise en tension et l'abduction du bras lanceur notamment à partir de la deuxième phase de simple appui. Ceci est suivi par l'activation du *[PM]* qui, de par son rôle d'antépulseur, contribue au retour du bras lanceur de sa position arrière (le bras et le disque en arrière de la ligne d'épaule) à sa position avant (le bras et le disque en avant de la ligne d'épaule).

La localisation au niveau de l'épaule du *[DA]*, fait de lui un muscle charnière entre le tronc et le bras. Dans un lancer de disque, les techniciens préconisent un retard du bras lanceur par rapport au tronc afin d'augmenter la mise en tension musculaire afin de stocker un maximum d'énergie dans la composante élastique du muscle. Le *[DA]* intervient dans le transfert d'énergie potentielle élastique du tronc et des jambes vers le bras lanceur et au disque. Enfin, le *[TM]* est un muscle stabilisateur de la ceinture scapulaire (Bouisset et Maton, 1995). Son rôle est de gagner de l'amplitude dans la rétroimpulsion du bras lorsque celui-ci est à l'horizontal grâce à la bascule de l'omoplate. Le lanceur va se servir de ce muscle pour venir placer son bras le plus loin possible derrière afin d'obtenir une mise en tension maximale du *[PM]* et du *[DA]*. En conclusion, deux muscles présentent un rôle prépondérant postural (le *DM* et le *TM*) et les trois autres jouent rôle prépondérant moteur (le *DA* le *PM* et le *BB*).

Ceci confirme la théorie du maintien actif du bras lanceur à la fin du mouvement, par une abduction partielle de celui-ci (Finager In Bartlett, 1992). Enfin, une analyse quantitative permet d'approcher la part plus spécifique de l'activité musculaire dans le mouvement. Par exemple, il a été remarqué que la quantité de EMGin est toujours plus importante pour les muscles avec un

rôle prépondérant moteur (*DA, PM et BB*) pendant la phase Δt_{2da} , alors qu'au contraire, pour les muscles posturaux (*DM et TM*), EMGin semble plus important pendant la phase Δt_{1sa} . Il nous semble aussi que l'activité électrique de certains muscles lors des phases finales du mouvement est plus sensible à la vitesse, et pour d'autres à la masse du disque. Ceci est particulièrement vrai pour le *PM* et le *BB* (cf. *figure 5-5*). Cependant, les tests statistiques montrent que la masse du disque n'a pas d'effet sur le niveau d'activation musculaire dans cette étude.

5.4 Conclusion

En conséquence, ces résultats suggèrent qu'un disque plus léger pourrait être employé pour l'entraînement des athlètes de haut niveau sans dégradation cinématique du lancer ni altération sensible de l'activation musculaire. L'emploi d'un disque léger lors de l'entraînement pourrait diminuer le risque de blessure lié aux contraintes mécaniques de la charge pendant des périodes d'entraînement et plus particulièrement pour des débutants.

Pour compléter cette étude, il serait nécessaire de calculer les quantités segmentaires de mouvement pendant le lancer. Il s'agirait alors d'apporter un éclairage sur les phénomènes de rotations des différentes parties du corps de l'athlète et leurs contributions respectives dans la production de la vitesse du disque, donc de la performance. Enfin, il sera intéressant de réaliser une mise en équation de la dynamique segmentaire et du niveau de recrutement de la chaîne musculaire.

3.5 Références

Abdel-Aziz, Y.I. & Karara, H.M. (1971). Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. Proceedings of the *Symposium on Close Range Photogrammetry*, 1-18.

Bartlett, R.M. (1990). The biomechanics of the discus throw. In: Proceedings of the First International Conference on Techniques in Athletics, G.-P. Brüggemann and J.K. Rühl (Ed.); Köln ; (pp 126- 145) *Deutsche Sporthochschule*,.

Bartlett, R.M. and Payton C. (1991). Evaluating and reporting errors in biomechanical data and their possible effects. *Journal of Sports Sciences*, 9, 393-4

Bartlett RM. The biomechanics of the discus throw. *J Sports Sci* 1992 ; 10 : 467-510.

Bartonietz, K. (1984). Der aerodynamischen Eigenschaften von Speer und Diskus besser nutzen! *Der Leichtathlet*, 7, 7-10.

Bouisset, S & Maton, B (1995) *Muscles, posture et mouvement*. Hermann (Ed) ; Paris.

Cooper, I., Dalzell, D. and Silverman, E. (1959). Flight of the discus. Division of Engineering Science E.Sc. 472. Lafayette: Purdue University

Dapena J. A method to determine the angular momentum of a human body about three orthogonal axes passing through its center of gravity. *J.Biomech* 1978 ; 11 : 251-6.

Dinu D, Levêque J.M, Natta F, Vandewalle H, Portero P. (2004). Evolution de paramètres cinématiques et électromyographiques pendant les différentes phases du lancer de disque : étude préliminaire, *Science et Sport*, 19(2004)189-192.

Dyson, G.H.G. (1973). *The Mechanics of Athletics*. London : University of London Press.

Finanger, K.E. (1969). An EMG study of the function of selected muscles involved in the throwing of the discus. Unpublished doctoral dissertation, University of Iowa

Frohlich, C. (1981). Aerodynamic effects on discus flight. *Amercian Journal of Physics*, 49, 1125-32

Ganslen, R.V. (1958) Aerodynamic factors which influence discus flight. Unpublished research report, University of Arkansas.

Ganslen, R.V. (1959) Aerodynamic forces in discus flight. *Scholastic Coach*, 28: 46-77.

- Ganslen, R.V. (1964). Aerodynamic and mechanical forces in discus flight. *Athletic Journal*, (12), 44- 50.
- Gregor, R.V., Whiting, W.C., & McCoy, R.W. (1985). Kinematic analysis of Olympic discus throws. *Int. J. Sport Biomech.*, (1), 131-138.
- Hay, J.G. (1985). *The Biomechanics of Sports Techniques*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Herrera, A & Blanco, C. (1999). Biomechanical Analysis: throwing and running events. The IAAF World Championship in Athletics, *Sevilla'99, CD-ROM*.
- Hofmann, S. (1990) Methodologische Abteilungen zum Techniktraining in Diskuswürfen aus biomechanischen Untersuchungen. In: *Proceedings of the First International Conference on Techniques in Athletics*, G.-P. Brüggemann and J.K. Rühl eds, Vol 2 : 695-702. Köln; Deutsche Sporthochschule
- Hubbard, M. (1989). The throwing events in track and field. In: *Biomechanics of Sport*, C.L. Vaughan (Ed.), (pp 213-238). *Boca Raton, Florida* : CRC Press.
- Lockwood, H.M. (1963). Throwing the Discus. In *Athletics* (edited by G.F.D. Pearson), pp. 188-235. Edinburgh: Thomas Nelson.
- Kemp, M. (1988). Some aspects of the discus throw. *Mod. Athlete Coach*, (26), 11-14.
- Knicker, A.J. (1990). Determining factors in discus throwing of top level athletes. In: *Proceedings of the First International conference on Techniques in Athletics*. G.-P. Brüggemann and J.K. Rühl, (Ed.), Vol.2, (pp.670-677). Köln ; *Deutsche Sporthochschule*.
- Lenz, G. & Ward, P. (1985). Discus. In: *Athletes in Action*. H. Payne (Ed), (pp 212-236) *London; Pelham Books*.
- Lindsay, M. (1991). Biomechanical analysis of the discus. In: *Report on the 1990 Championship in Athletics*, vol. 1, (pp.47-53): *The throws* (Ed), Bartlett, R.M; Alsager : *Crewe and Alsager College of Higher Education*.
- Lenz, G. et Ward, P. (1995) Discus. In: *Athletes in Action*. H. Payne ed, London ; Pelham Books. 212-236.

McCoy, R.W., Whiting, M.W.C., Rich, R.G. and Gregor, R.J. (1985). Kinematic analysis of discus throwers. *Track Technique*, 91, 2902-2905.

Mapes, D. (1964). Electromyographic study of functions of selected muscles in check action, ballistic movement and follow-through during the baseball throw. Unpublished doctoral dissertation, State University of Iowa

Nytro, A. (1987). What is correct technique ? *Track Technique*, 100, 3195-6, 3205.

Pharoah, M. (1957). Observations on discus throwing. *AAA Coaching Newsletter*, 4, 9-10

Reneaud, P.M. (1989) The throws : Field observation and evaluation. *Education Physique et Sport*. 219 : 67-71.

Samozwetow, A. (1960). Diskus und Wind. *Der Leichtathletik Trainer*, 2, 407-410

Schlüter, W. & Nixdorf, E. (1984). Kinematische Beschreibung und Analyse der Diskuswurftechnik. *Leistungssport*,(6), 17-22.

Schöllhorn, W. (1989). Diskuswurf. In *Biomechanik der Sportarten* (edited by K. Willimczik), pp 212-19. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag.

Shapiro, R. (1978) Direct linear transformation method for three-dimensional cinematography. *Res. Q. Exerc. Sports* 49 : 197-205.

Silvester, L.J. (1988). Discus throwing. *Track and Field Quarterly Review*, 88, 30-31

Soong, T.C. (1976). The dynamics of the discus throw. *J. Appl. Mech.*, (98), 531-6.

Soong, T.C. (1982) Biomechanics (analyses and applications) of shot put and discus and javelin throws. In: *Human Body Dynamics : Impact, Occupational and Athletic Aspects*. D.N. Ghista ed, pp. 462-497. Oxford ; Clarendon Press.

Stepanek, J. & Susanka, P. (1986). Discus throw : Results of a biomechanic study. *New Studies in Athletics*, (1), 25-36.

Susanka, P., Dumbrowsky, M., Barak, F., Stepanek, J. and Nosek, M. (1988). Biomechanical analysis of the discus throw. In *Scientific Report on the 2nd World Championships in Athletics, Rome 1987, Book 3, Biomechanical Analysis of the Throwing Events* (ed by G.-P. Brüggemann and P. Susanka), pp. I/1-61. England : International Amateur Athletic Journal, 12, 9-10, 44-7

- Taylor, J.A. (1932). Behaviour of the discus in flight. *Athletic Journal*, 12, 9-10, 44-7
- Terauds, J. (1978). Computerised biomechanical cinematography analysis of discus throwing at the 1976 Montreal Olympiad. *Track and Field Quarterly Review*, 78, 25-8
- Tutjowitsch, V.N. (1976). Theorie des Sportlichen Wurfe Teil 1. *Leistungssport*, (7), 1-161.
- Unger, J. (1977). Throwing in the wind. *Modern athlete and coach*, 15, 31-2
- Voigt, H. (1972). Wirkungen der Luftkrafte auf die Flugweite beim Diskuswerf. *Der Leibeserziehung*, 21, 319-26
- Weston, A., Stanley, S., & Marshall, R. (1988). Analysis of a one-legged discus thrower. *N.Z. J. Sports Med.* (16), 82-83.
- Wilkins, M. (1986). Discus Technique: The Mac Wilkins way. *The Thrower*, May, 4-17
- Wilkins, M. (1987). Technique conditioning drills for discus throw. *Track and Field Quarterly Review*, 87, 20-23

RESUME

Introduction.- Le but de cette étude est d'analyser l'influence de la masse du disque (1,7 vs 2 kg) sur les paramètres cinématiques et l'activité des muscles de la ceinture scapulaire au cours du lancer. Les techniques employées sont l'analyse vidéo 3D et l'électromyographie de surface (sEMG).

Méthodes et résultats. -7 lanceurs de haut niveau (âgés de 23 ± 3 ans, poids de 108 ± 19 kg, taille de 190 ± 6 cm, performance personnelle de 57 ± 3 m) ont participé à l'étude. Les enregistrements des données cinématiques ont été réalisés au moyen de trois caméras numériques, (Panasonic AG-455, 50 Hz), permettant de reconstruire le mouvement en trois dimensions. L'activité électromyographique de surface (sEMG) de 5 muscles a été enregistrée à l'aide d'un appareil numérique embarqué (ME3000P8). L'analyse cinématique a montré que la durée absolue et relative des différentes phases de lancer et de l'ensemble du jet est la même pour les deux masses, du disque (1,7 vs 2 kg). Par ailleurs, la modification de la masse du disque n'a pas d'effet sur la chronologie de la mise en action des muscles de la ceinture scapulaire. En effet, pour les deux conditions de masse nous avons montré d'une part, une coopération musculaire au début du geste entre le *Trapezius pars descendens* et le *Deltoideus pars medialis*, et d'autre part une mise en action différenciée à la fin du geste entre le *Biceps brachii*, le *Pectoralis major*, le *Deltoideus pars anterior* et le *Trapezius pars descendens*. Enfin, les valeurs moyennes de quantités électriques (EMGin/dt) pour chacun des muscles de la ceinture scapulaire, semblent ne présenter aucune différence significative en fonction de la masse du disque.

Conclusion.- Ces résultats suggèrent qu'un disque plus léger pourrait être employé pour l'entraînement des athlètes de haut niveau sans altération cinématique du lancer. Ceci pourrait diminuer le risque de blessure lié aux contraintes mécaniques de la charge pendant des périodes d'entraînement et plus particulièrement pour des débutants.

Mots clés : lancer de disque, cinématique, électromyographie.