



HAL
open science

Analyse cinématique tridimensionnelle du lancer de disque : étude préliminaire

Daniel Dinu, Henry Vandewalle, M. Tranchant

► **To cite this version:**

Daniel Dinu, Henry Vandewalle, M. Tranchant. Analyse cinématique tridimensionnelle du lancer de disque : étude préliminaire. [Rapport de recherche] Institut National du Sport et de l'Education Physique. 2002. hal-01865007

HAL Id: hal-01865007

<https://insep.hal.science/hal-01865007>

Submitted on 30 Aug 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.



DEPARTEMENT DES SCIENCES DU SPORT

Laboratoire de Biomécanique et Physiologie

ANALYSE CINEMATIQUE TRIDIMENSIONNELLE DU LANCER DE DISQUE ETUDE PRELIMINAIRE

Rapport de recherche

D. DINU ^a, H. VANDEWALLE ^b, M. TRANCHANT ^c

^a INSEP - Laboratoire de Biomécanique et Physiologie

^b INSEP - Département de la formation

^c Fédération Française d'Athlétisme



Recherche subventionnée par le Ministère de la Jeunesse et des Sports
(Convention INSEP-FFA ; Avenant N° 13)
Année 2002

SOMMAIRE

CHAPITRE 1 - ETAT DE L'ART

- 1.1 Revue bibliographique
 - 1.1.1 Etude du lancer de disque
 - 1.1.2 Etude du mouvement en trois dimensions
- 1.2 Objectifs de la recherche

CHAPITRE 2 - TECHNIQUES EXPERIMENTALES

- 2.1 Matériel et méthodes
 - 2.1.1 Population
 - 2.1.2 Matériel
- 2.2 Protocoles
 - 2.2.1 Protocole de calibration de l'espace
 - 2.2.2 Recueil des données expérimentales
 - 2.2.3 Protocole de traitement des données

CHAPITRE 3 – MODELISATION ET METHODE DE CALCUL

- 3.1 Modélisation du lanceur de disque
 - 3.1.1 Modèle filiaire
 - 3.1.2 Tables anthropométriques

CHAPITRE 4 – ANALYSE DES RESULTATS

- 4.1 Cinématique du lancer de disque
 - 4.1.1 Cinématique du système lanceur-disque
 - 4.1.2 Cinématique du disque
- 4.2 Conclusions-perspectives
- 4.3 Références Bibliographiques

Introduction

CHAPITRE 1-ETAT DE L'ART

1.1 Revue bibliographique

1.1.1 Etude du geste lanceur de disque

La plupart des études antérieures sur la mécanique du lancer de disque sont principalement consacrées à l'optimisation de la trajectoire du disque au moment du lâcher. En effet, ce sont principalement la vitesse ainsi que l'angle d'éjection de l'engin qui sont fortement corrélés avec la performance.

Ces descriptions réalisées par des entraîneurs constituent une base de données intéressante parce qu'elle présente des séquences des enchaînements gestuels réalisés par les meilleurs compétiteurs et suggère quelques orientations dans l'analyse globale du lancer de disque (Lenz et Ward, 1985 ; Kemp, 1988 ; Reneaud, 1989). Un nombre plus restreint d'études utilisant des techniques d'investigations modernes 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 soit par l'analyse de la phase de vol du disque (Hubbard, 1989) soit par l'étude du mouvement du système lanceur-engin à l'intérieur de l'aire de lancer.

L'analyse de la phase de vol a été réalisée au moyen de tests de soufflerie qui ont établi l'action des forces gravitationnelles et aérodynamiques sur le disque (Ganslen, 1964 et Tutjowitsch, 1976, Soong, 1982). Ces résultats apportent des indications sur les valeurs optimales des différents paramètres du disque au moment du lâcher (vitesse, hauteur, angle d'éjection)

Quant au mouvement préalable du système athlète-engin à l'intérieur de l'aire de lancer, il est classique de décrire différents phases (figure 1.1) qui se succèdent dans l'ordre suivant (Hay, 1980) :

- phase de mise en rotation (*1^{ière} phase de double appui*),
- pivot (*1^{ière} phase de simple appui*),
- volte (*phase d'envol*),
- phase de transition (*2^{nde} phase de simple appui*),
- phase d'éjection (*2^{nde} phase de double appui*),

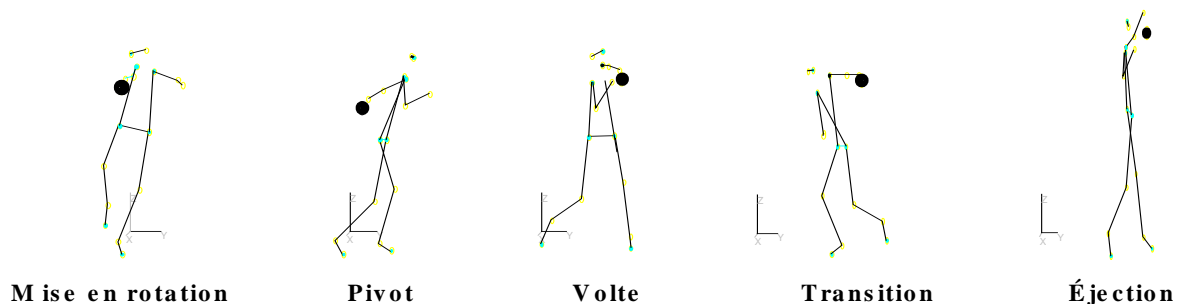


Figure 1.1 : Kinogramme des différentes phases du lancer de disque

Le lanceur effectue donc, un premier demi-tour par pivotement du corps sur un appui, suivi d'un temps de suspension, enchaîné 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.

Il existe quelques études qui fournissent des résultats quantitatifs concernant essentiellement le trajet du disque pendant la volée (Schluter et Nixdorf, 1984 ; Gregor et coll., 1985 ; Stepànek et Susanka, 1986 ; Susanka et coll. 1988 ; Bartlett, 1990a ; Knicker, 1990 ; Lindsay, 1991). Ces résultats sont obtenus par des enregistrements au moyen de deux caméras. Cette technique a permis d'analyser des paramètres tels que la vitesse, l'angle et la hauteur du disque au cours de la volée et au moment de l'éjection. En ce qui concerne l'organisation gestuelle, l'inclinaison du tronc dans la phase d'éjection a principalement été étudiée. 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 analyse tridimensionnelle des différents paramètres caractérisant la cinématique du disque au moment du lâcher a été faite en 1999 lors du championnat du monde d'athlétisme à Séville. Cette étude a été le fruit d'une collaboration entre différents groupes de recherche espagnols spécialisés en biomécanique du sport et dont la coordination a été assurée par le Laboratoire de Biomécanique de Grenade (Pr.D Alberto Garçia-Fojeda Herrera et Pr. D Juan Carlos Vàlios Blanco). La méthode employée dans cette analyse technique, utilise des enregistrements vidéo à haute vitesse (deux caméras vidéo digitales à 125 Hz) et 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 fait les possibilités d'interprétation.

1.1.2 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, appelées 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), fut 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 fut inférieur à 5 %.

L'interprétation des données en termes de localisation du centre de gravité et d'évolution temporelle des différentes grandeurs (énergie cinétique, énergie potentielle, quantité de mouvement, moment cinétique,...) nécessite la connaissance des masses des différents objets et segments corporels en mouvement, la localisation de leur centre de masse et leur moments d'inertie par rapport à leurs axes principaux. Il est donc nécessaire d'utiliser des modèles anthropométriques permettant de définir des paramètres tels que les moments d'inertie, les masses des segments corporels et leur localisation par rapport à des repères anatomiques. L'utilisation de ces modèles nécessite un minimum de mesures anthropométriques réalisées sur les sujets (poids et stature du sujet, dimensions des segments...).

La première étude scientifique, cherchant à déterminer les propriétés d'inertie des segments corporels, fut réalisée par Dempster en 1955 sur huit cadavres. Elle permit de créer les premières tables anthropométriques et servit de référence pendant plusieurs années.

Plusieurs études se sont alors succédées jusqu'au travaux de Zatsiorsky et coll. en 1983. A partir de radiographies, ils déterminèrent les caractéristiques d'inertie des différents segments corporels en réalisant des mesures sur un échantillon de 100 hommes non sportifs et proposèrent les équations de régression donnant la valeur de ces caractéristiques en fonction de la masse et de la taille des individus.

Plus récemment, De Leva et coll. (1993) proposèrent des modifications des tables de Zatsiorsky et validèrent les résultats obtenus sur des jeunes athlètes. Ces tables font la différence entre des athlètes masculins et féminins et représentent *a priori* une amélioration des tables de Dempster.

Ces différents modèles donnent une estimation des paramètres suivants :

- la position p du centre de masse (cdm) de chaque segment par rapport à l'articulation distale ou proximale ;
- la proportion m de la masse de chaque segment par rapport à la masse du sportif M ;
- les moments d'inertie IT par rapport aux axes principaux transverses des segments corporels considérés comme cylindriques, c'est à dire des segments ayant des axes principaux transverses égaux.

Segment	p (cdm)	m (%M)	IT (kg.m ²)
Pied	0.4290	0.0146	0.0038
Jambe	0,4330	0.0465	0.0505
Cuisse	0.4330	0.0988	0.1052
Tronc	0.4383	0.5080	1.308
Avant-bras	0.4300	0.0160	0.0076
Bras	0.4360	0.0270	0.0213
Main	0.5060	0.0066	0.0005
Tête	0.5358	0.0730	0.0248

Tableau 1.1 : Tables anthropométriques de **Dempster**. *IT** représentent le moment d'inertie par rapport à l'axe transverse des segments considérés, pour un athlète mesurant 1,74 mètres et pesant 73 kilogrammes ; *cdm* : centre de masse ; *m* : masse de chaque segment ; *M* : masse totale du sportif .

La modélisation multi-segment de l'athlète permet le calcul de la position du centre gravité du corps entier en fonction de la position des segments corporels. L'analyse vidéo 3D permet de reconstruire les trajectoires de chacun des marqueurs et d'en déduire, en particulier, la vitesse de translation et de rotation des différents segments et la translation du centre de gravité du corps de l'athlète au cours du mouvement.

Le calcul des vitesses et des accélérations est réalisé par l'opération de dérivation qui accentue de manière très importante le bruit contenu dans le signal initial. Ceci nécessite un filtrage numérique des données dont le choix de la méthode reste délicat et doit être adapté aux données recueillies. Les filtres numériques utilisés en analyse du mouvement sont souvent des filtres tels ceux de Butterworth dont la fréquence de coupure (fréquence correspondant à une diminution de 50% de l'amplitude du signal) est choisie en fonction de la composition spectrale du mouvement et de la fréquence de recueil des images.

1.2 Objectifs de la recherche

Cette étude s'inscrit dans le cadre général de la modélisation du geste du lancer de disque et a pour objectif d'apporter des éléments de compréhension des phénomènes contribuant à optimiser la vitesse d'envol de l'engin au cours de la volte. Pour ce faire, le geste de lancer a été étudié, à travers une analyse cinématique des cinq phases clés (respectivement les phases de mise en rotation, pivot, volte, transition et d'éjection) chez des lanceurs de différents niveaux d'expertise.

Cette étude a pour but d'adapter la méthode d'analyse du mouvement vidéo 3D à un mouvement complexe sur le terrain.

Le choix de la méthode vidéo au lieu de celle utilisant des caméras infra-rouges (exemple système Vicon) se justifiait par la possibilité d'utiliser les enregistrements vidéo dans des conditions très proches de celles rencontrées en situation de compétition et d'entraînement. Par ailleurs, notre expérience antérieure avec l'équipe de France du lancer de marteau en coopération avec Guy Guérin, alors entraîneur national, nous a montré l'intérêt pédagogique des enregistrements vidéo qui peuvent être accessibles et donnés aux lanceurs sous la forme d'un CD-ROM. En contre-partie la méthode vidéo reste, encore à ce jour, beaucoup plus « lourde » que la méthode des caméras infra-rouges en ce qui concerne le traitement des données.

Dans cette étude, nous avons analysé plus particulièrement les deux points suivants :

1. l'évolution des paramètres cinématiques globaux calculés au niveau de centre de gravité du système lanceur-disque.
2. la cinématique de l'engin lui-même au cours de l'ensemble du lancer et non pas de la phase aérienne.

Expérimentation

2.1 Matériel et méthodes

2.1.1 Population

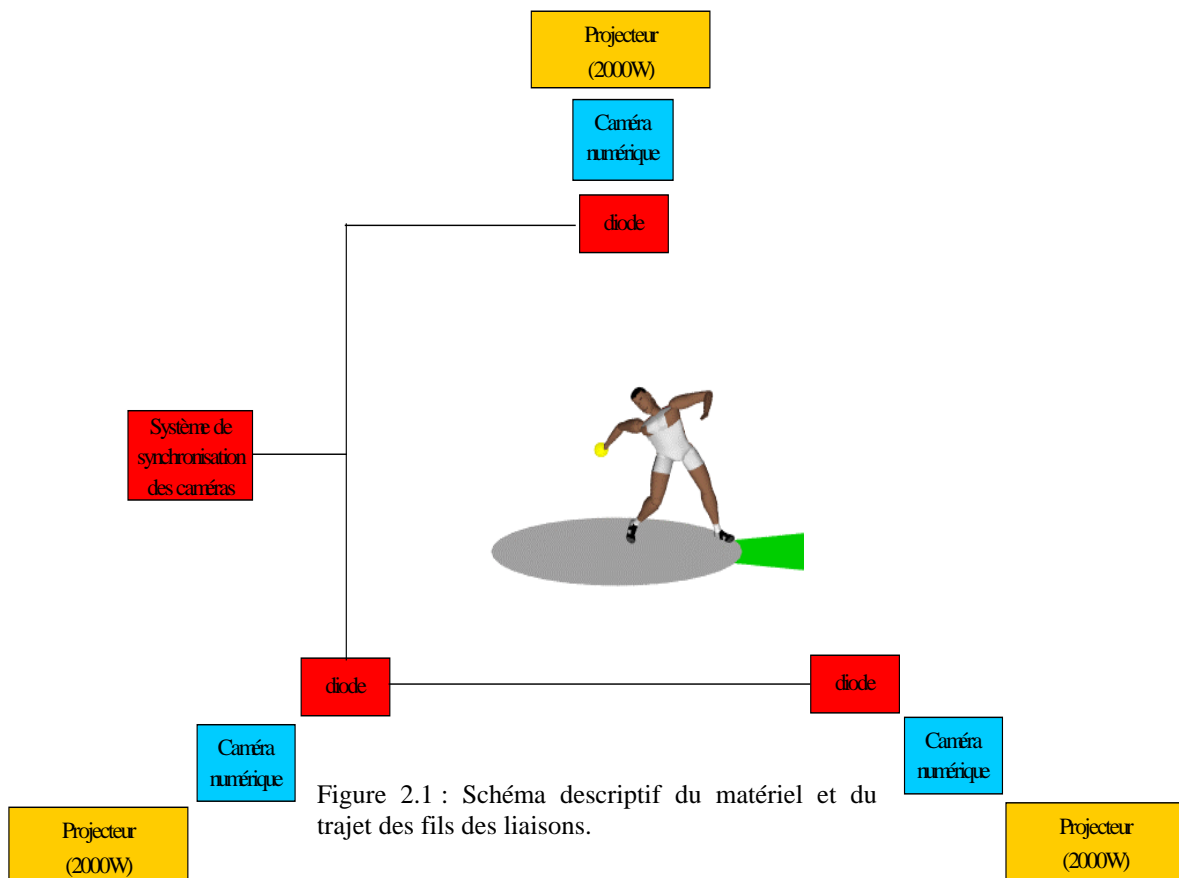
Cette étude préliminaire a été réalisée sur un échantillon de trois athlètes dont un lanceur expert âgé de 27 ans, ayant participé aux Jeux Olympiques de Sydney et deux jeunes lanceurs de haut-niveau, âgés de 18 et 20 ans. Les critères pris en compte dans la sélection des athlètes sont les techniques de lancer et le niveau d'expertise des lanceurs. Chaque athlète a effectué trois essais. (Tableau2.1).

Sujets	Age (ans)	Poids (kg)	Taille (m)	Record Personnel (m)
Lanceur expert	27	99	1.92	63.41
Jeune lanceur N1	20	110	1.90	52.75
Jeune lanceur N2	18	97	1.94	52.43

Tableau 2.1 : Caractéristiques physiques des sujets et leur meilleure performance.

2.1.2 Matériel

Trois caméras vidéo numériques sont utilisées. Le réglage de vitesse d'obturation de caméras a été fixé à $1/1000^{\text{ième}}$ de seconde pour avoir une bonne définition des marqueurs. Derrière chaque objectif, des projecteurs de 2000 watts ont été installés pour obtenir une concentration maximale de lumière sur l'ensemble des marqueurs (figure 2.1).



Un système de synchronisation de trois caméras a été mis en place. Il se compose d'un boîtier émetteur, d'un récepteur et de trois diodes positionnées devant chaque caméra. Les diodes sont reliées entre elles par un câble de liaison, et sont commandées par l'émetteur qui envoie un signal électrique. Ce signal permet d'allumer les trois diodes au même moment pendant une durée de 2s. Ainsi, la même image pourra être identifiée pour chaque caméra soit au début, soit à la fin de l'allumage des diodes.

2.2 Protocoles

L'expérimentation a eu lieu au stade couvert de l'INSEP (stade Joseph Maigrot) ; l'environnement du plateau de lancer a été aménagé pour recevoir le dispositif vidéographique d'analyse du mouvement en trois dimensions.

Les trois caméras ont été placées à 120°, 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.

Toutes les séances d'enregistrement comportaient deux phases : phase de calibration de l'espace (une fois par séance), puis recueil des données expérimentales.

2.2.1 Protocole de calibration de l'espace

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 ce 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 (cf. tableau 2.2), revêtus d'un matériau réfléchissant (Scotch-lite^R). L'axe des Y correspond à celui de la direction du jet. Ce parallélépipède, situé sur l'aire de lancer, (figure 2.2) 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 avec l'éloignement du volume calibré.

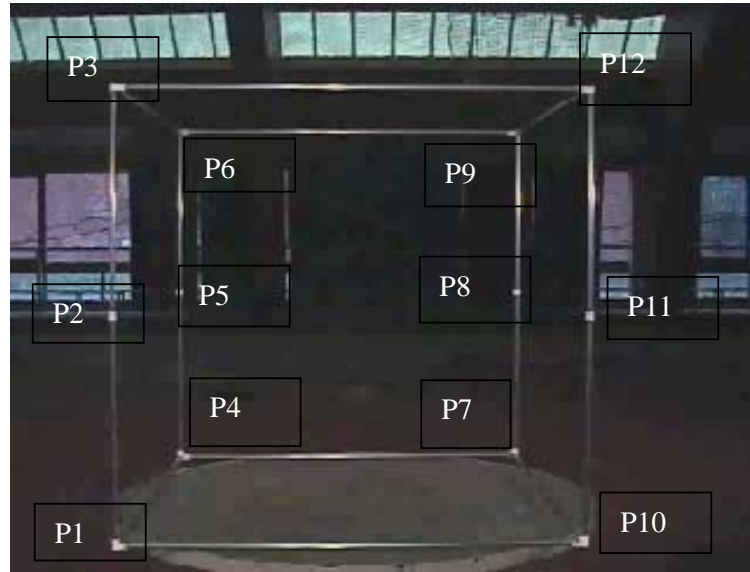


Figure 2.2 : Parallélépipède d'étalonnage de l'espace d'évolution du lanceur de disque

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 2.2: Coordonnées physiques des repères du parallélépipède de calibration.

Le mouvement a été décrit par rapport à un repère Galiléen R_0 , d'origine P1, avec des axes x , y et z parallèles respectivement aux segments de droite P1-P10, P1-P4 et P1-P3.

2.2.2 Recueil des données expérimentales

Afin d'augmenter les contrastes, les athlètes étaient vêtus d'une combinaison intégrale collante noire, du modèle utilisé en hiver par les patineurs et portaient des couvre-chaussure de couleur noire.

Sur cette combinaison intégrale, 18 marqueurs, constitués de petites sphères de 2 cm de diamètre, recouvertes de Scotch-lite, étaient fixés au moyen d'une bande adhésive double face.



Figure2.2 : Sujet appareillé.

L'expérimentation commençait par un échauffement spécifique du lanceur, sous le contrôle de l'entraîneur national. Une fois l'échauffement terminé, l'enregistrement de trois jets successifs a été réalisé.

2.2.3 Protocole de traitement des données

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 MiroDC30).

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 sur 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 constitue 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 des paramètres comme la vitesse, l'accélération et l'angle d'éjection. 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).

CHAPITRE 3 – MODELISATION ET METHODE DE CALCUL

3.1 Modélisation du lanceur de disque

3.1.1 Modèle filaire

La disposition des 18 marqueurs a été réalisée de la manière suivante :

- Pieds : extrémité du pied – cheville ;
- Jambes : cheville – genou ;
- Cuisses : genou – hanche ;
- Tronc : milieu des hanches – milieu des épaules ;
- Bras : épaule – coude ;
- Avant – bras : coude – poignet ;
- Mains: poignet – bout des doigts ;
- Tête : cou – sommet du crâne.
- Disque

En ce qui concerne les articulations des épaules, un marqueur a été disposé à la face antérieure de l'épaule et un autre à sa face postérieure afin que le centre articulaire reste en permanence visible par les caméras malgré le mouvement de rotation. La localisation du centre de rotation d'une épaule a donc été calculée comme se trouvant au milieu du segment reliant ces deux marqueurs.

Cette disposition des marqueurs permettait d'utiliser le modèle anthropométrique à 14 segments rigides de Zatsiorki et De Leva (Figure 3.1) :

Nicom000.txt - [3D] - frame : 83

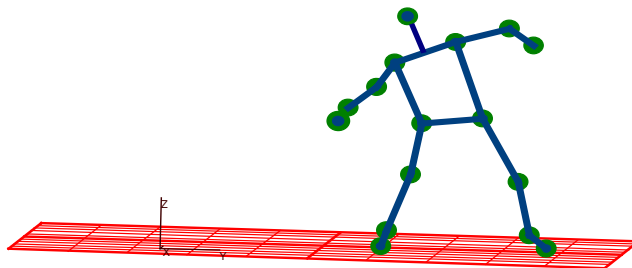


Figure 3.1 : Modèle filaire du lanceur de disque : les points correspondent aux centres des différentes articulations

3.1.2 Tables anthropométriques

Nous avons utilisé les tables de De Leva qui sont en fait une modification des tables antérieures proposées par Zatsiorki et ont été obtenues sur des jeunes athlètes masculins et féminins. Ce modèle donne une estimation des paramètres suivants :

- la position p du centre de masse de chaque segment par rapport à l'articulation distale ou proximale ;
- la proportion m de la masse de chaque segment par rapport à la masse du sportif M ;
- les moments d'inertie IT par rapport aux axes principaux transverses des segments corporels considérés comme cylindriques (axes principaux transverses égaux).

Segment	p (cdm)	m (%M)	IT (kg.m ²)
Pied	0.4415	0.0137	0.0044
Jambe	0,4524	0.0433	0.0385
Cuisse	0.4095	0.1416	0.1998
Tronc	0.4544	0.4346	1.2400
Avant-bras	0.4574	0.0162	0.0065
Bras	0.4228	0.0271	0.0127
Main	0.7900	0.0061	0.0013
Tête	0.4024	0.0694	0.0272

Tableau 3.1 : Tables anthropométriques de *De Leva* concernant la population masculine. IT^* représente le moment d'inertie par rapport à l'axe transverse des segments considérés, pour un athlète mesurant 1,74 mètres et pesant 73 kilogrammes.

CHAPITRE 4 – ANALYSE DES RESULTATS

4.1 Cinématique du lancer de disque

La figure 4-1 représente une reconstruction 3D du lanceur expert en position « fin de mise en rotation ».

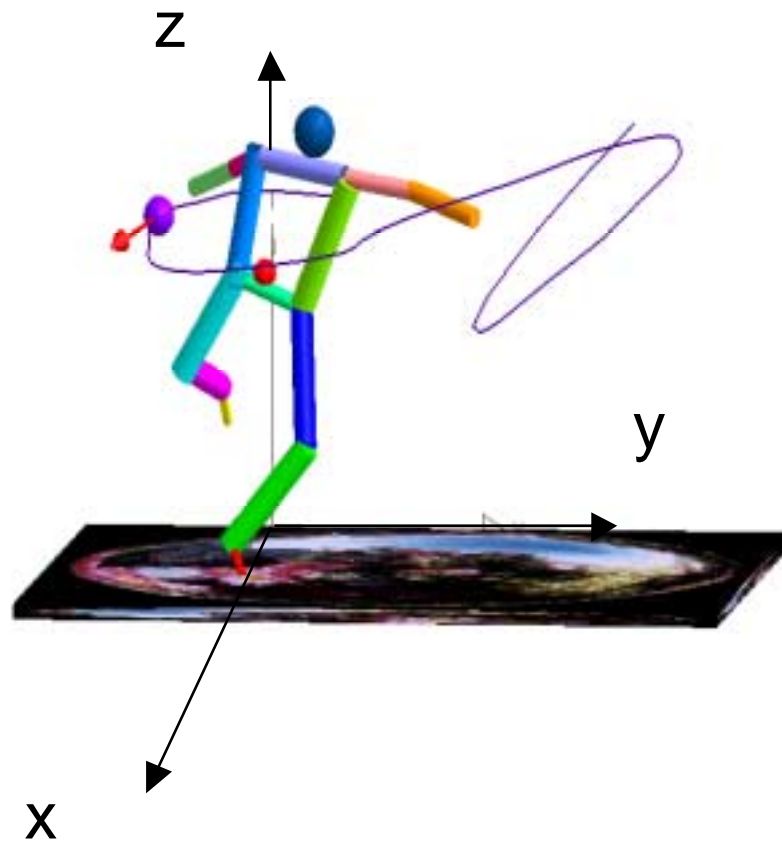


Figure 4.1 : Modélisation volumique tridimensionnelle du lanceur de disque. Le référentiel galiléen R_0 est représenté avec ses axes x , y et z . La courbe en violet correspond à la trajectoire du disque (sphère violette) avec le vecteur vitesse associé (flèche rouge). La sphère rouge correspond au centre de gravité global (ensemble lanceur-disque).

4.1.1 Cinématique du système lanceur-disque

L'étude cinématique du modèle volumique permet d'effectuer le calcul des positions et des vitesses des centres de masse des différents segments corporels et d'en déduire la position et la vitesse du centre de gravité du système lanceur-disque par rapport à R_0 .

Les figures suivantes présentent l'évolution de la position (figure 4.2) et de la vitesse (figure 4.3) du centre de gravité global au cours du lancer.

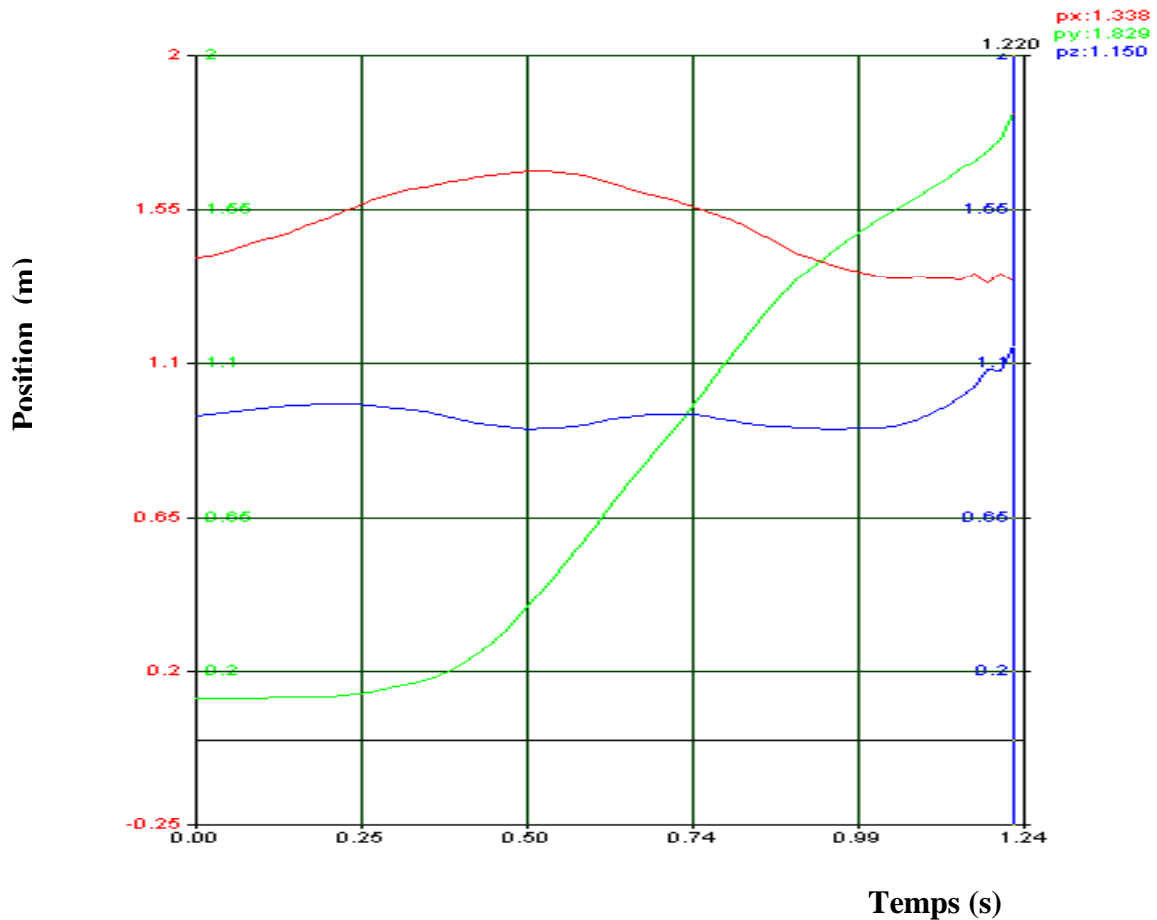


Figure 4.2 : Position du centre de gravité global (lanceur + disque) par rapport aux trois axes du repère R_0

On constate sur la figure 4-2 les faibles déviations latérales (selon l'axe Ox) du centre de gravité ainsi qu'une hauteur maximale de 1,15 m atteinte par le centre de masse global au moment du lâcher (axe Oz). L'analyse de la trajectoire selon l'axe Oy permet aussi de quantifier la translation effectuée dans le plan sagittal à l'intérieur du plateau de lancer. Le déplacement selon l'axe y est de 1,62 m.

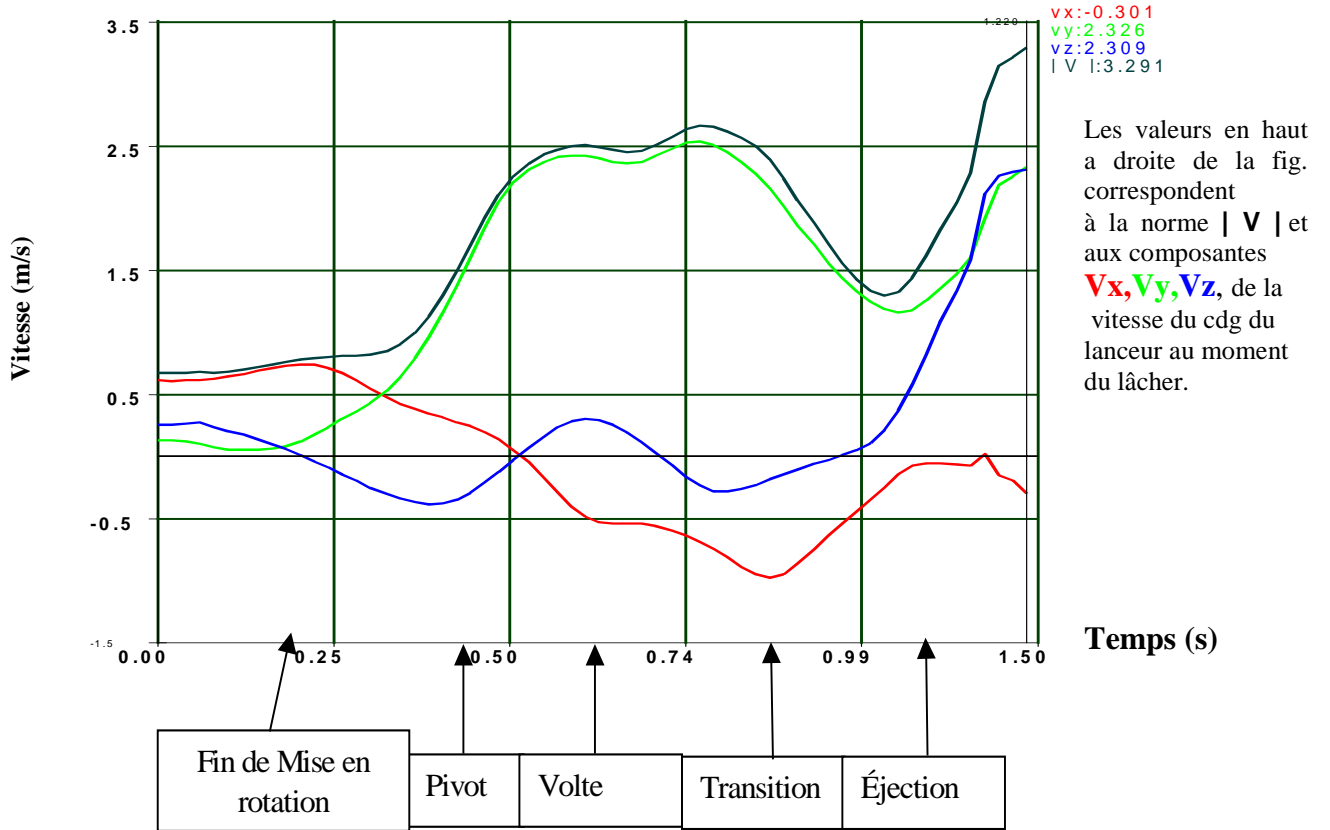


Figure 4.3 : Vitesse du centre de gravité (cdg), du système athlète -disque par rapport à R_0 , lanceur expert

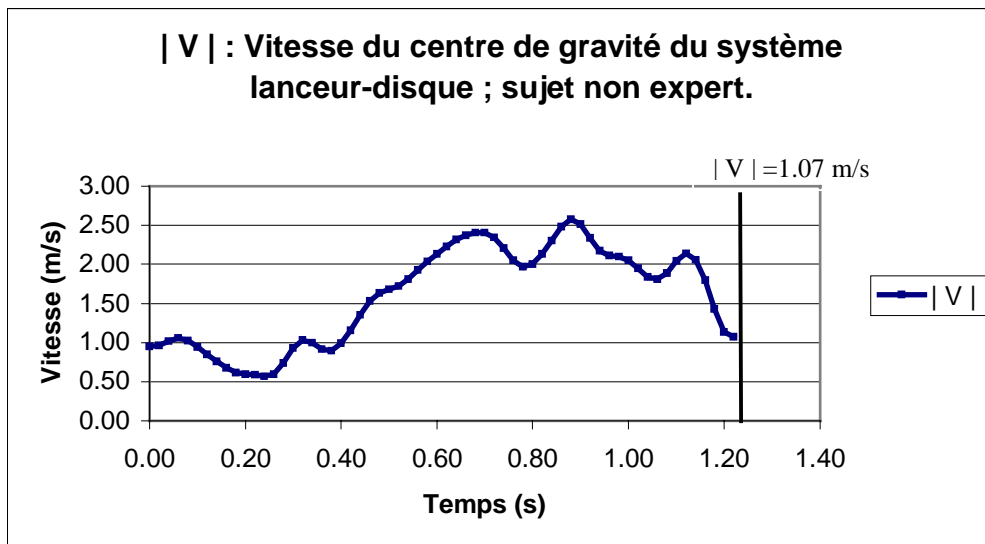


Fig. 4.4 Vitesse du centre de gravité (cdg), du système athlète -disque par rapport à R_0 , lanceur non expert

L'analyse de la vitesse du centre de gravité du lanceur par rapport à R_0 (figure 4.3) fait apparaître les points suivants :

- la vitesse suivant l'axe Ox (déplacement latéral) est faible ;
- la composante y (déplacement AV-AR) de cette vitesse a été produite principalement pendant la phase d'entrée (*1^{ère} phase de simple appui*), et la phase de volte (*phase d'envol*) ;
- dans la phase finale d'éjection (*2^{ème} phase de double appui*), on observe une augmentation marquée de cette composante V_y ;
- la composante z (déplacement vertical) de la vitesse du CG est maximale lors du lâcher du disque ;

On constate que la courbe du module de vitesse du centre de gravité de l'ensemble lanceur-disque (courbe vert foncé de la figure 4.3) ne diminue pas avant le lâcher du disque chez l'expert, ce qui témoigne probablement d'un bon transfert de la quantité de mouvement du lanceur dans cette phase du lancer. Par contre, ceci n'était pas observé chez les deux jeunes lanceurs espoirs (figure 4.4). La qualité du transfert des quantités de mouvement dans la phase précédant le lâcher serait l'expression de l'expertise de l'athlète,

Enfin, un bilan du module des vitesses du centre de gravité des trois lanceurs au moment du lâcher a été réalisé.

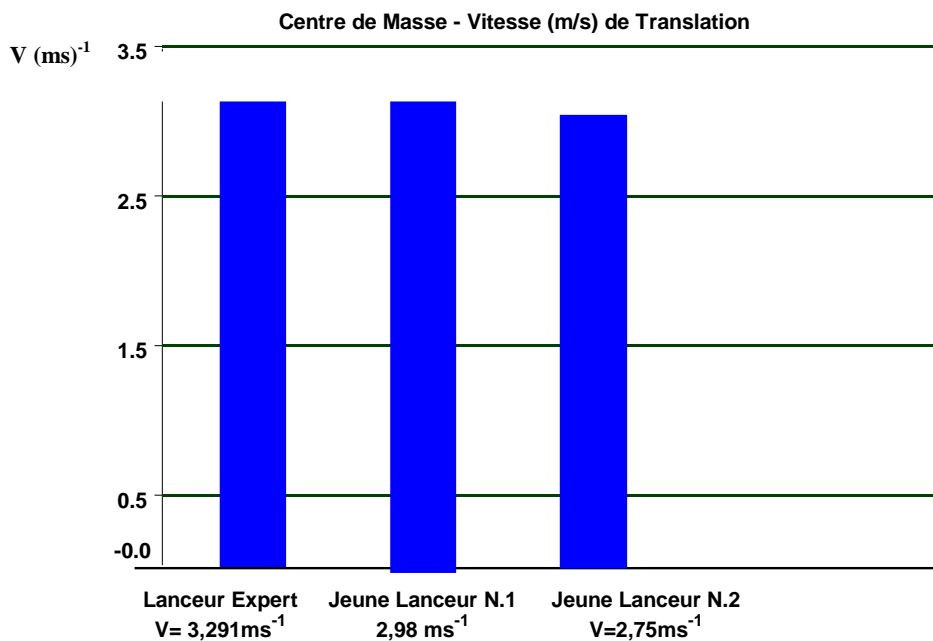


Figure 4.5 : Modules des vitesses du centre de gravité des systèmes lanceurs-disques au moment du lâcher.

La figure 4.5 montre pour les lanceurs étudiés une différence des valeurs des vitesses des centres de gravité des systèmes lanceurs-disques entre $3,29$ (m/s) et $2,75$ (m/s) pour une valeur moyenne de $3,01$ (m/s) selon les lanceurs.

4.1.2 Cinématique du disque

L'étude cinématique du lanceur de disque par rapport à R_0 permet de déterminer les différents paramètres cinématiques de l'engin (position et vitesse du disque) dans les cinq phases clés (respectivement les phases de mise en rotation, de pivot, de volte, de transition, d'éjection) du mouvement.

Les déplacements du disque par rapport aux axes x, y et z de R_0 sont présentés sur la figure 4-6 pour le lanceur expert au cours du même lancer que celui présenté sur les figures 4.2 et 4.3.

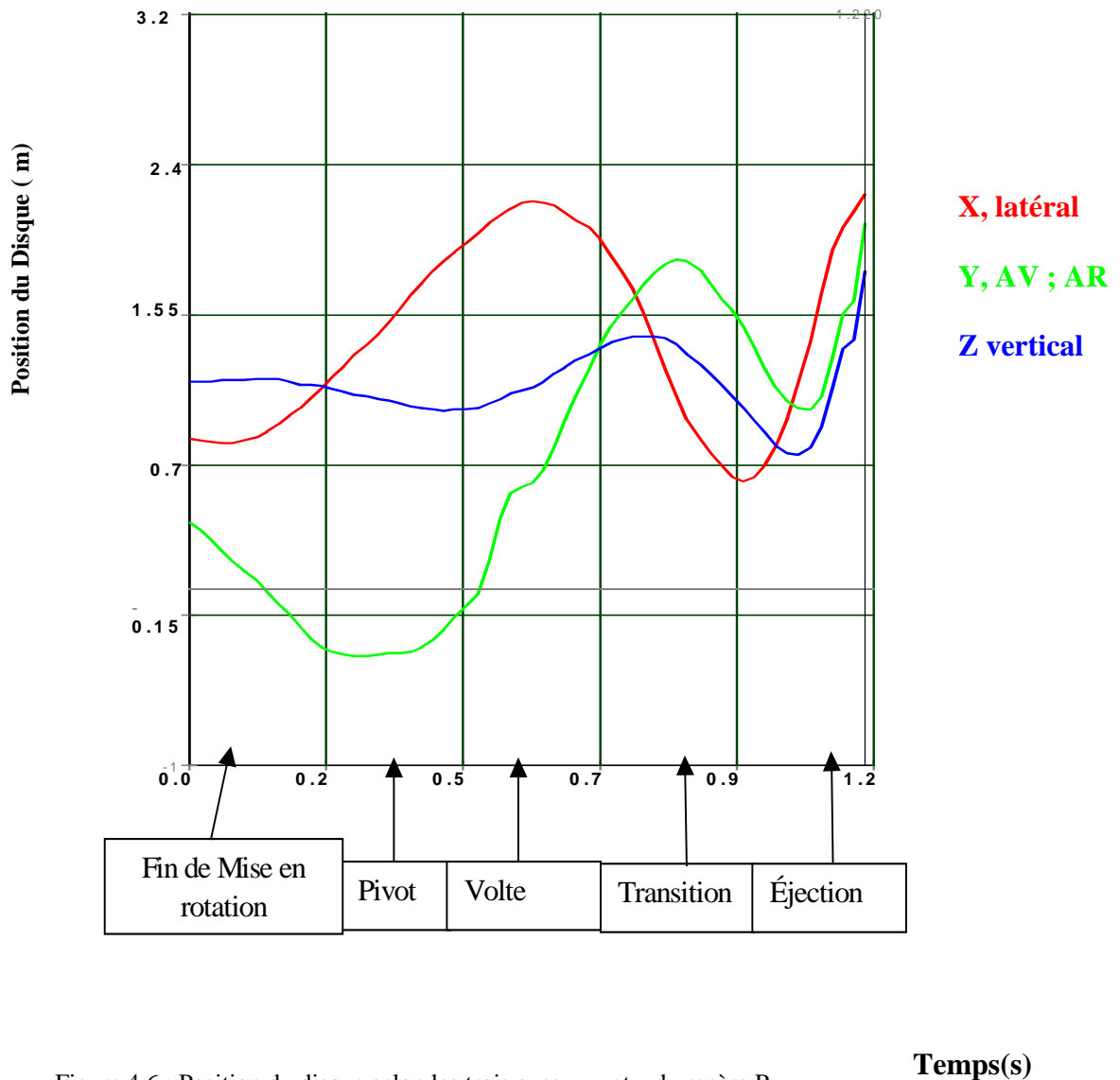


Figure 4.6 : Position du disque selon les trois axes x, y et z du repère R_0 .

Temps(s)

Les modules de vitesse du disque des trois lanceurs sont comparés sur la figure 4.7.

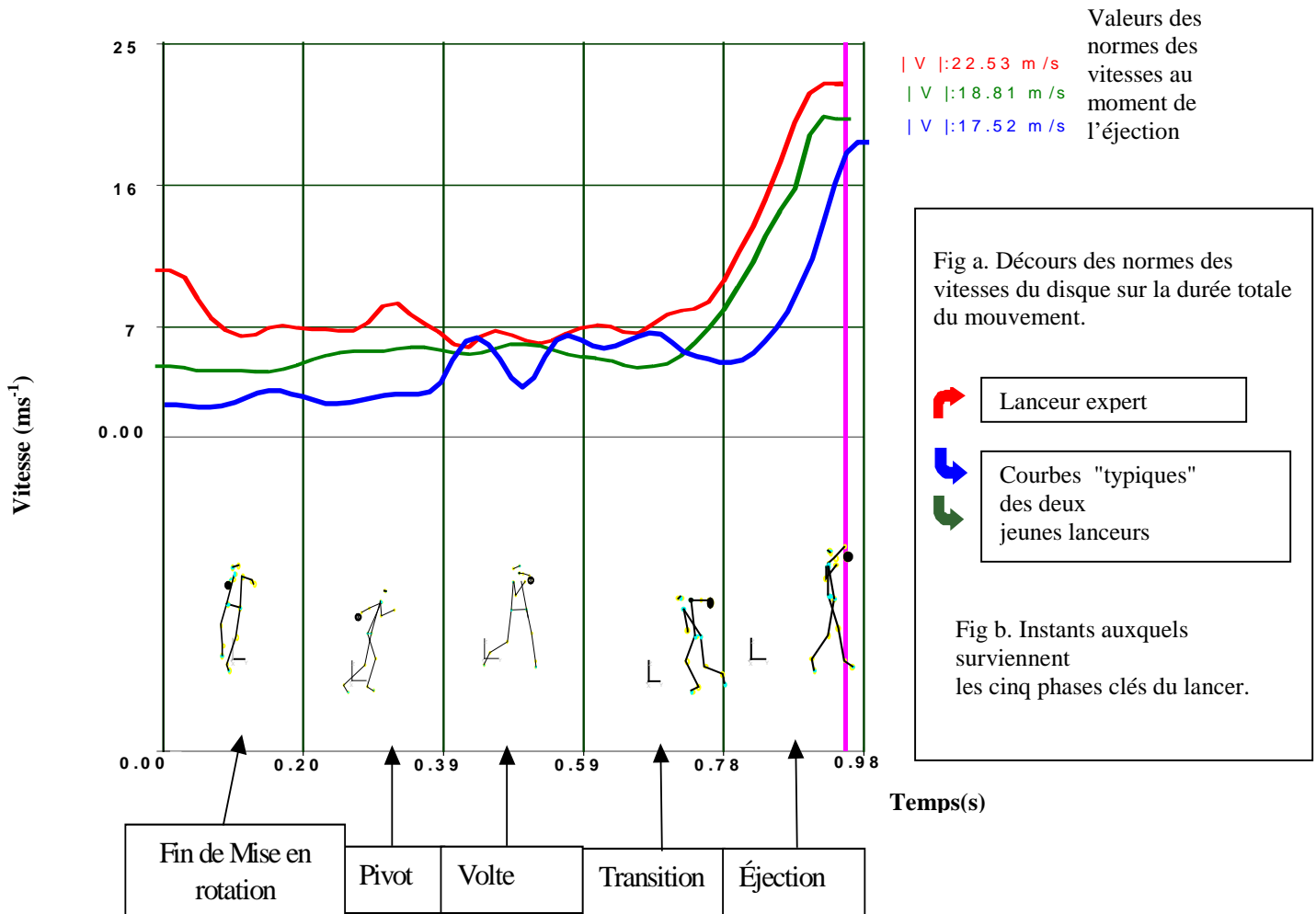


Figure 4-7 : Déroulement des normes des vitesses de trois lanceurs de disque droitiers sur la durée totale du mouvement.

La vitesse finale du disque au moment du lâcher n'est pas le résultat d'une accélération progressive et régulière. Le disque acquiert une certaine vitesse pendant la phase initiale du pivot, qui précède le début du geste proprement dit, c'est-à-dire le moment où le pied droit de l'athlète quitte le sol (temps zéro sur la figure). Ceci est suivi par un pseudo "plateau" de vitesse jusqu'au milieu de la phase de transition vers le double appui (environ 0.7 s). On observe ensuite (fin de la phase de transition et phase d'éjection) une accélération progressive du disque jusqu'au lâcher de l'engin.

Les valeurs de vitesse et de l'angle de la trajectoire du disque au moment du lâcher sont proches des données de la littérature concernant des lanceurs de niveau équivalent. Ceci suggère que nos méthodes et protocoles de recueil et de traitement des données permettent une étude du lancer de disque d'une qualité suffisante pour les objectifs de notre étude.

En ce qui concerne l'angle d'éjection du disque au moment du lâcher, il n'y a pas de différence nette entre le meilleur des trois lancers du sujet expert et le meilleur lancer de ses jeunes partenaires d'entraînement. Pour tous les essais des 2 jeunes lanceurs, on observe une décélération du disque au début de la phase de transition alors que la vitesse reste stable pour tous les essais du lanceur expert (figure 4.7). De plus, le lanceur expert se distingue par une faible variabilité de cet angle d'éjection entre les trois lancers (36, 38 et 36°) par comparaison avec les deux autres lanceurs (23-42-39° pour l'un ; 39-48-33° pour l'autre lanceur) (Tableau 4.1).

L'analyse de ces résultats montre que le lanceur expert parvient à maintenir la vitesse du disque au début de la phase critique de transition à l'encontre des deux lanceurs non experts dont le disque décélère systématiquement pendant la pose du pied droit.

Comme cela a été observé dans d'autres disciplines sportives, l'athlète de haut niveau fait preuve aussi d'une reproductibilité importante d'un essai à l'autre en ce qui concerne l'angle d'éjection qui correspond aux valeurs optimales (36-40°) selon Ganslen (1958). A l'inverse, les angles d'éjection des sujets non-experts fluctuent de part et d'autre de ces valeurs optimales.

	Ve (ms⁻¹)	Angle d'éjection (degrés)	Hauteur du disque à l'éjection (m)
Lanceur expert			
Jet.1	22,53	36.08	1,56
Jet.2	21,17	38.44	1.52
Jet. 3	22.01	36.11	1.52
Jeune lanceur N1			
Jet.1	18,81	42.40	1.63
Jet.2	17.12	23.22	1.60
Jet. 3	17.45	39.80	1.64
Jeune lanceur N2			
Jet.1	17.55	39.16	1.40
Jet.2	17.05	48	1.47
Jet. 3	16.43	33.60	1.71

Tableau 4.1 : Valeurs de la vitesse d'éjection (V_e), l'angle d'envol et la hauteur (h) au moment du lâcher du disque.

4.2 Conclusion et Perspectives

La performance en lancer du disque est déterminée principalement par la vitesse d'éjection. L'analyse tridimensionnelle, de trois lanceurs de disque droitiers, a montré que la vitesse absolue du disque est liée principalement avec le *pattern* de la vitesse du centre de masse du système " lanceur-disque". La vitesse du centre de masse du système " lanceur-disque" a été produite principalement pendant la phase d'entrée (*1^{ière} phase de simple appui*), et la phase de volte (*phase d'envol*). Dans la phase finale d'éjection (*2^{ème} phase de double appui*), on observe une augmentation marquée de cette vitesse qui s'effectue simultanément avec une "accélération" progressive du disque.

La courbe du module de vitesse du centre de gravité de l'ensemble lanceur-disque ne diminuait pas avant le lâcher du disque chez l'expert, ce qui témoignait probablement d'un bon transfert de la quantité de mouvement du lanceur dans cette phase du lancer. Ceci n'était pas observé chez nos deux jeunes lanceurs espoirs.

Cette étude a mis en évidence l'intérêt de la quantification du centre de gravité du système lanceur-disque en plus de la cinématique du disque.

Des résultats de la présente étude, il semblerait que :

- 1 - la qualité du transfert des quantités de mouvement dans la phase précédant le lâcher est l'expression de l'expertise de l'athlète expert / non-expert.
- 2 - la maîtrise des phases qui précèdent la phase finale d'éjection est plus discriminative du niveau de performance que le mouvement de lâcher proprement dit.
- 3 - l'athlète de haut niveau fait preuve aussi d'une meilleure reproductibilité d'un essai à l'autre comme cela a été observé dans d'autres disciplines sportives.

Ces premiers résultats, constituent des hypothèses pour une future étude, incluant un nombre plus large des lanceurs et une approche complémentaire comme l'électromyographique des principaux groupes musculaires de la ceinture scapulo-humérale, du tronc et des membres inférieurs, couplée avec des enregistrements vidéo 3D simultanés.

4.3 Bibliographie :

Abdel-Aziz, Y.I. et 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. (1990b) The biomechanics of the discus throw. In: *Proceedings of the First International Conference on Techniques in Athletics*, G.-P. Brüggemann and J.K. Rühl eds; Köln ; Deutsche Sporthochschule pp126- 145.

Bartlett, R.M., Müller, E., Raschner, C. et Brunner, F. (1991) Pressure distributions on the plantar surface of the foot during the discus throw. *J. Sports Sci.* 9: 393-451.

De Leva, P. (1993) Validity and accuracy of four methods for locating the center of mass of young male and female athletes, *Proceeding of the Congress of ISB 93* : 318-319.

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.

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., et 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.

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 eds, 213-238. Boca Raton, Florida : CRC Press.

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, eds, Vol.2, pp.670-677. Köln ; Deutsche Sporthochschule.

Lenz, G. et Ward, P. (1995) Discus. In: *Athletes in Action*. H. Payne ed, London ; Pelham Books. 212-236.

- Reneaud, P.M.** (1989) The throws : Field observation and evaluation. *Education Physique et Sport*. 219 : 67-71.
- Shapiro, R.** (1978) Direct linear transformation method for three-dimensional cinematography. *Res. Q. Exerc. Sports* 49 : 197-205.
- Schlüter, W. et Nixdorf, E.** (1984) Kinematische Beschreibung und Analyse der Diskuswurftechnik. *Leistungssport* 6 : 17-22, 1984.
- 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.** (1986) Discus throw. In: *ISSF 1st World Junior Championships, Athens Scientific Report*, . Susanka, G.-P. Brüggemann and E. Tsarouchas, eds. pp1-11, Athens.
- Stepanek, J. et Susanka, P.** (1986) Discus throw : Results of a biomechanic study. *New Studies in Athletics*, 1: 25-36.
- Tutjowitsch, V.N.** (1976) Theorie des Sportlichen Wurfe Teil 1. *Leistungssport*, 7 : 1-161.
- Weston, A., Stanley, S., et Marshall, R.** (1988) Analysis of a one-legged discus thrower. *N.Z. J. Sports Med.* 16 : 82-83.
- Herrera, A et Blanco, C.** (1999) Biomechanical Analysis: throwing and running events. *The IAAF World Championship in Athletics, Sevilla'99, CD-ROM*.
- Zatsiorsky, V. et Sekuyanov, V.** (1983) Estimation of the mass and inertia characteristics of the human body by means of the best predictive regression equations. In: *Biomechanics IX-B, Human Kinetics*. 233-239.

RESUME

Cette étude préliminaire s'inscrit dans le cadre général de la modélisation du geste du lancer de disque et a pour objectif d'apporter des éléments de compréhension sur les phénomènes de sommation des quantités de mouvement en translation, contribuant à optimiser la vitesse d'envol de l'engin au cours de la volte.

Au cours du [chapitre 1](#) une revue bibliographique des principales études mécaniques sur le lancer du disque a été réalisée et nous a permis ainsi d'introduire les objectifs de la présente recherche.

Le [chapitre 2](#) du rapport a été consacré à détailler l'ensemble des techniques de mesure utilisées et a montré les limites de ces outils. La cinématique 3D du sportif est reproduite grâce à des mesures vidéographiques : le mouvement de l'athlète est alors filmé par trois caméras dont les images successives permettent de reconstruire les trajectoires 3D selon la technique DLT (Direct Linear Transformation) permettant de transformer les coordonnées 2D d'un point repéré dans le plan des caméras en coordonnées 3D.

Les modèles et les techniques de calculs employés pour caractériser la cinématique du lanceur ont été présentés dans le [chapitre 3](#). Le corps humain est modélisé par un ensemble de quatorze (14) segments rigides liés entre eux par des liaisons mécaniques : on parle alors de systèmes polyarticulés ou de modèles multicorps.

Les résultats issus des mesures expérimentales réalisées sur des lanceurs réels sont présentés puis analysés au [chapitre 4](#). Les valeurs de vitesse et de l'angle de la trajectoire du disque au moment du lâcher sont proches des données de la littérature concernant des lanceurs de niveau équivalent.

Des résultats expérimentaux nous avons tiré les hypothèses de travail suivantes :

- la qualité du transfert des quantités de mouvement dans la phase précédant le lâcher est l'expression de l'expertise de l'athlète,
- la maîtrise des phases qui précèdent la phase finale d'éjection serait plus discriminative du niveau de performance que le mouvement de lâcher proprement dit,
- l'athlète de haut niveau se caractériserait aussi par une meilleure reproductibilité d'un essai à l'autre en particulier en ce qui concerne les paramètres qui caractérisent le mouvement de translation.