

Laboratoire Mouvement Action et Performance

COMPARAISON DE SYSTEMES D'ANALYSE DU MOUVEMENT 3D

Stéphane Vieilledent

Projet subventionné par le ministère de la Jeunesse et des Sports

2002

Participants

Les personnes suivantes ont participé à ce projet de recherche :

Stéphane Dalbera – Atopos – Fontenay sous Bois

Gilles Dietrich – Kihoptsys - Marseille

Thomas Ducourant – Laboratoire MAP – Insep Paris

Albert Gaudin – Biometrics France – Orsay

Halim Hicheur – Laboratoire MAP – Insep Paris

Yves Kerlirzin – U. René Descartes – UFR Staps - Paris

Fabrice Mégrot – Biometrics France - Orsay

Sommaire succinct

I - Introduction 7

II - Comparaison des performances 8

III - Performance du Vicon 370 et du Vicon 8 in situ 24

IV - Moyens de traitement des données brutes en fonction des domaines de recherche : le Modeleur-Simulateur du Mouvement (MSM) 36

V - Simulation de calibration d'un système vidéo en grand champ 43

VI - Sites Internet des fabricants ou distributeurs de systèmes 49

VII - Conclusion 50

VIII - Bibliographie 51

Sommaire détaillé

I - Introduction 7
II - Comparaison des performances 8
II -1. Méthode de Richards 8
II -1.1. Revue de questions 8
II -1.2. Données constructeurs 9
II -1.3. Tests sur site 10
II -1.3.1. Appareillage de testing 10
II -1.3.2. Procédure 11
II -1.3.3. Analyse 12
II -1.4. Tests sur site pour le système magnétique 13
II -1.5. Résultats 14
II -1.5.1. Mesures de distance 14
II -1.5.1.1. Distance pour des marqueurs visibles par toutes les caméras 14
II -1.5.1.2. Distance pour des marqueurs visibles par des paires de caméras 14
II -1.5.2. Mesures de distance 15
II -1.5.3. Mesures de confusion de marqueurs 16
II -1.6. Discussion 18
II -2. Méthode de Ehara 20
II -2.1. Protocoles et variables mesurées 20
II -2.1.1. Spécification de base pour la réhabilitation et l'industrie 20
II -2.2. Systèmes comparés 22
II -2.3. Résultats 2002 22
II -2.3.1. Tâche Numéro 1 (mm) 22
II -2.3.2. Tâche Numéro 2 (degrés) 23
II -2.3.3. Tâche Numéro 3 (mm) 23
II -2.3.4. Temps nécessaire et méthode de reconstruction et d'identification des marqueurs 23
II -2.3.5. Spécification de base pour le sport et l'animation 23
III - Performance du Vicon 370 et du Vicon 8 in situ 24
III -1. Exemple de mise en œuvre d'un système Vicon 8 à 24 caméras 24
III -1.1. Matériel 24

III -1.2. Calibration du système 26
III -1.2.1. Première étape : la calibration statique 26
III -1.2.2. Deuxième étape : la calibration dynamique 26
III -1.3. Captures 28
III -1.3.1. Capture statique et « auto-abelling » 28
III -1.3.2. Capture dynamique, reconstruction et « auto-abelling » 28
III -1.4. Fonctionnalités pour les calculs simples 30
III -1.5. Quelques éléments complémentaires concernant les systèmes Vicon 30
III -2. Calculs de distances supposées constantes 31
III -2.1. Nature des mesures 31
III -2.2. Mesure avec le Vicon 370 équipé de 5 caméras 31
III -2.2.1. Mouvement enregistré 31
III -2.2.2. Exemples de résultats 33
III -2.3. Calculs de distances avec le Vicon 8 équipé de 13 caméras 34
III -2.3.1. Mouvement enregistré 34
III -2.3.2. Exemples de résultats 34
III -2.4. Calculs de distances avec le Vicon 8 équipé de 23 caméras 35
III -2.4.1. Mouvement enregistré 35
III -2.4.2. Exemples de résultats 35
IV - Moyens de traitement des données brutes en fonction des domaines de recherche : le Modeleur-Simulateur du Mouvement (MSM) 36
IV -1. MSM : Applications au sport 36
IV -1.1. Analyse 36
IV -1.2. Modélisation 37
IV -1.3. Visualisation 37
IV -1.4. Interface logicielle pour le sport 38
IV -2. M.S.M : Applications au domaine médical 39
IV -2.1. Analyse 39
IV -2.2. Modélisation 39
IV -2.3. Visualisation 40
IV -2.4. Interface logicielle pour le médical 40
IV -3. MSM : Applications au domaine de la recherche 41
IV -3.1. Modélisation 41
IV -3.2. Simulation 41

IV -3.3. Communication 42
V - Simulation de calibration d'un système vidéo en grand champ 43
V -1. Champ de mesure et structure de calibration 43
V -2. Position des caméras 44
V -3. Calibration 3D (méthode DLT) 45
V -4. Erreur de reconstruction 3D 45
V -5. Différence mouvement réel / mouvement calculé 46
VI - Sites Internet des fabricants ou distributeurs de systèmes 49
VII - Conclusion 50
VIII - Bibliographie 51

I - Introduction

L'évolution des performances sportives de haut niveau nécessite la mise en place d'un environnement scientifique et technologique de qualité pour accompagner l'athlète dans sa préparation et lors de la compétition. Pour être efficaces, ces moyens doivent permettre d'une part d'enregistrer l'activité de l'athlète avec une très grande précision et d'autre part de lui fournir le plus rapidement possible une information en retour sur sa performance. Ces deux contraintes justifient pleinement de s'interroger sur les possibilités des systèmes commerciaux d'analyse du mouvement utilisant des images dans le cadre d'un accompagnement scientifique à la performance.

Les critères que nous retenons ici concernent les performances techniques des systèmes (précision et reproductibilité des mesures) mais également l'ergonomie générale, le temps nécessaire à l'obtention des données 3D brutes et les possibilités de post traitement. Ce dernier aspect du problème, trop souvent oublié dans les décisions d'achat, conditionne directement l'efficacité du retour de l'information vers l'athlète ou son entraîneur. En effet, l'efficacité du retour vers les sportifs est inversement proportionnel au délai qui le sépare de la capture du mouvement. Plus le retour d'information est rapide et plus il sera efficace. Plus le délai s'allonge et plus il est illusoire d'espérer tirer un bénéfice direct du travail de capture du mouvement. Par ailleurs, et d'une manière générale, l'allongement de ce délai est généré par l'augmentation des fréquences d'échantillonnage des caméras et par un travail d'identification des marqueurs effectué caméra par caméra. Ce travail fastidieux, effectué le plus souvent manuellement par un opérateur, doit absolument être évité pour deux raisons majeures. D'un point de vue scientifique, un opérateur humain si vaillant soit-il travaillant pendant des heures ne peut égaler la régularité d'une procédure automatique. D'un point de vue budgétaire, ce travail a un coût exorbitant qu'il convient de ne pas sous estimer ou tout simplement de ne pas ignorer.

Sans rejeter a priori telle ou telle technologie, ce rapport se propose dans un premier temps de fournir une comparaison des performances des systèmes commerciaux, puis de montrer les possibilités très étendues in situ de deux d'entre eux, les Vicon 370 et 8, dont le niveau performance est d'ailleurs tout à fait excellent tant en ce qui concerne la précision que les temps de reconstruction. Ensuite nous envisageons les possibilités d'un post traitement étendu des données dans le domaine sportif et médical. Enfin, nous montrons que, sous certaines conditions spécifiques, le travail en grand champ peut être accessible.

II - Comparaison des performances

II -1. Méthode de Richards

II -1.1.Revue de questions

Il existe deux grandes catégories de systèmes commerciaux destinés à la mesure des mouvement du corps. La première utilise des dispositifs fournissant un enregistrement visuel des positions des segments du corps, alors que la seconde utilise des capteurs magnétiques pour déterminer la position et l'orientation des segments dans l'espace. Les dispositifs utilisant la capture d'image peuvent, à leur tour, être subdivisés en deux catégories en fonction du type de marqueurs mis en œuvre. On distingue les marqueurs actifs et les marqueurs passifs. Les systèmes passifs utilisent des marqueurs lumino-réfléchissants, c'est à dire qu'ils réfléchissent la lumière vers le capteur, alors que les systèmes actifs utilisent des marqueurs qui comportent une source de lumière. De nombreuses études ont rapporté les caractéristiques de quelques systèmes destinés à la mesure du mouvement humain (Dabnichki, Aritan, Lauder, & Tsirakos, 1996; Lauder, Dabnichki, Bartlett, & Aritan, 1996; Gruen, 1997; Ferrigno & Pedotti, 1985; Sandstrom, Backstrom, & Olsson, 1996; Laways, Conlan, & Miles, 1996).

L'objet de cette revue critique est d'analyser en profondeur les performances de ces systèmes et en particulier leur capacité à fournir rapidement des coordonnées tri-dimensionnelles brutes exploitables pour des traitements ultérieurs.

II -1.2.Données constructeurs

Les spécifications des constructeurs sur la fiabilité, la précision et les possibilités de développement des systèmes ainsi que des données concernant le matériel et les logiciels sont présentées dans le Tableau 1.

	Système	Ordinateur	Précision	Nb capt max	Nb marq Max	Calibration	Centroïde	Calibration lentilles	Eclairage	Vitesse (fps / Hz)
Ariel	APAS	PC	1.0 mm	9	256	Grille	Moyennage	Aucune	Projecteurs	Identique enregistreur
Charnwood	CODA	PC	0.1 mm	6	28	Usine	Actif	Grille virtuelle	Inf. Rouge Actif	200w / 28 marqueurs
BTS	ElitePlus	PC	1.0 mm	8	----	Baguette	----	Grille	Inf. Rouge	50-120
Motion Analysis	HiRes	PC Sun SGI	0.1 mm	16	400	Cube & baguette	Moyennage	Baguette	Rouge Inf. Rouge	60-240
Peak Performance	Motus	PC	0.2 mm	6	500	Baguette	Cercle ajusté	Grille	Rouge Inf. Rouge	50-200
Qualisys	ProReflex	PC/Mac	0.6 mm	32	150	Grille & baguette	Correspondance	Propriétaire	Inf. Rouge	1-1000
Vicon	370	PC	----	7	Sans limite	Grille ou baguette	Cercle ajusté	Grille	Rouge Inf. Rouge	60-240

Tableau 1 : Spécifications des constructeurs pour certains paramètres de leur système.

II -1.3.Tests sur site

Les tests sur site utilisent un dispositif permettant le déplacement systématique et contrôlé d'une série de marqueurs dans l'espace calibré de façon à estimer la précision de la mesure et son efficacité. Il s'agit là de tests sur site (de terrain) et, à ce titre, ils ne permettent pas de répliquer exactement le placement des capteurs ou la taille et la topologie de l'espace calibré. De ce fait une comparaison exacte entre les systèmes s'avère impossible car il serait idéalement nécessaire de standardiser toutes les conditions de test. Ceci est tout à fait impossible, ne serait-ce que par les différences géométriques de chaque ensemble de capteurs. En conséquence, une approche plus clinique a été adoptée et les mesures présentées sont issues de sites opérationnels où la capture s'effectue de façon routinière avec des matériels récents.

Les systèmes à marqueurs passifs testés sont les systèmes Ariel, Motion analysis HiRes, Peak Performance Motus, Qualisys ProReflex, BTS ElitePlus et Vicon 370. Tous ces systèmes ont été testés avec un ensemble de six caméras sauf le système Ariel qui disposait de 5 caméras. Le système Charnwood Dynamic Coda est le seul système à marqueurs actifs présents dans cette étude. Enfin, le système à base de capteurs magnétiques 6D Research de Skill Techology a également été testé.

II -1.3.1.Appareillage de testing

Pour les marqueurs actifs et passifs, les données ont été obtenues à partir d'un dispositif équipé de sept marqueurs (Figure 1).

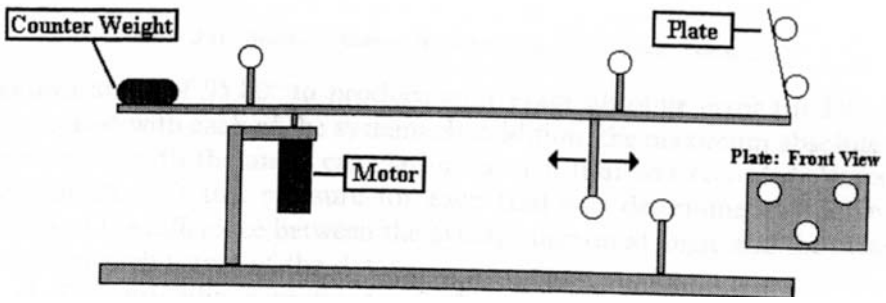


Figure 1 : Dispositif de test utilisé pour la comparaison des systèmes.

Deux marqueurs distants de 50 cm ont été placés sur une barre rigide qui tournait horizontalement à une fréquence approximative de 60 tours par minute. Ces marqueurs étaient visibles par la majorité des caméras pendant toute la durée du test. Trois autres marqueurs,

disposés en triangle, étaient placés sur une plaque située à l'extrémité de la barre. La plaque était perpendiculaire à la barre, et les marqueurs étaient orientés vers l'extérieur de telle sorte qu'ils étaient visibles seulement par quelques caméras lors de la rotation de la barre. Ces trois marqueurs étaient vus par au plus trois caméras à chaque instant. Un sixième marqueur (statique) a été monté à la base du dispositif sur un support rigide de 3 cm. Le septième marqueur a été monté sous la barre tournante. Il se trouvait à la même hauteur que le sixième marqueur. Sa position pouvait être ajustée le long de la barre de façon à contrôler la distance minimale entre le marqueur statique et ce marqueur en rotation. Six essais ont été enregistrés avec, pour chacun d'eux, des distances variables entre les sixième et septième marqueurs (respectivement 5, 4, 3, 2, 1 et 0 cm).

II -1.3.2.Procédure

Toute la procédure d'acquisition de données incluant la calibration du système, l'acquisition proprement dite, le « tracking », l'édition (si nécessaire et possible) et le rendu des coordonnées tri-dimensionnelles a été réalisée par des opérateurs expérimentés dans l'utilisation de leur propre système. Par conséquent, les résultats reflètent également l'habileté de chaque opérateur. Ces opérateurs ont été suggérés par les fabricants de systèmes. Immédiatement avant l'acquisition des données, tous ces systèmes ont été calibrés au moyen des dispositifs fournis par les fabricants. Ces dispositifs spécifiques de calibration sont présentés dans le Tableau 2.

Ariel system	Cube (12 points de contrôle)
CODA	Grille de référence (4 points)
ElitePlus	Baguette (2 points) et grille de référence (4 points)
Motion Analysis	Baguette (3 points) et cube (8 points)
Peak	Baguette (2 points) et grille de référence (4 points)
Qualisys	Baguette (2 points) et grille de référence (4 points)
Vicon	Cube (16 points de contrôle)

Tableau 2 : Méthode calibration de chaque système

La longueur du volume calibré a été déterminée en mesurant la distance entre deux marqueurs situés de part et d'autre du centre du plus grand axe horizontal du volume. Ces marqueurs ont été écartés le plus possible l'un de l'autre tout en restant visibles par

l'ensemble des caméras. Cette mesure a été utilisée en post traitement pour étalonner l'erreur de chacun des systèmes pour un volume standard d'une longueur de 3 mètres.

Dès l'obtention d'une calibration réussie, 6 essais de 4 secondes ont été réalisés à une fréquence d'échantillonnage de 60 Hz. Les mesures initiales ont été obtenues alors que le dispositif était centré dans le volume et que la distance entre le marqueur statique et le marqueur mobile était de 5 cm. Pour chacun des essais suivants, le marqueur mobile a été rapproché de 1 cm du marqueur statique jusqu'à obtenir un contact physique entre les deux marqueurs. Ensuite, chaque opérateur a traité les données des six essais à partir de son système pour donner les positions dans les trois dimensions des sept marqueurs disposés sur l'appareil. Les opérateurs avaient toute liberté pour changer les paramètres des procédures de tracking et pour utiliser tous les utilitaires d'édition fournis avec le logiciel de tracking pour produire des résultats considérés comme complets et prêts à faire l'objet de post traitements. La génération des coordonnées a impliqué l'utilisation d'outils logiciels faisant partie intégrante du logiciel de tracking sans avoir recours à des outils optionnels. Dès qu'un essai était terminé, les données brutes, non filtrées, ont été sauvées et traitées en utilisant un programme spécialement mis au point pour mesurer les variables suivantes.

II -1.3.3.Analyse

Les écarts par rapport à des distances et des angles connus entre des marqueurs statiques ont été estimés pour chaque système. Comme les données proviennent de différents sites expérimentaux, il a été difficile de contrôler la taille des volumes dans lesquels elles ont été capturées. Dans le but de fournir des possibilités de comparaison entre les différents sites, toutes les mesures de variabilité ont été standardisées et rapportées à un volume de trois mètres de longueur comme indiqué ci-dessus.

Les mesures spécifiques issues des positions des sept marqueurs sont les suivantes :

1) La distance entre les deux marqueurs situés au dessus de la barre a été calculée pour chaque trame. Les distances calculées ont été moyennées pour chaque essai et soustraites de la distance connue de 50 cm pour conduire à la détermination de l'erreur absolue moyenne associée à chaque système. De plus, l'erreur maximale absolue pour chaque essai a été calculée. Le bruit associé à cette mesure a été déterminé en calculant la valeur RMS de la différence entre la distance moyenne mesurée pour chaque essai et la distance mesurée pour chaque trame.

2) La distance entre les deux marqueurs supérieurs de la plaque a été calculée pour chaque trame et comparée à la distance idéale de 9 cm pour produire une erreur absolue

moyenne pour chaque système. L'erreur maximale absolue pour chaque essai a été calculée pour chaque essai. Le bruit associé à cette mesure a été déterminé selon la même procédure que celle décrite ci-dessus.

3) Les trois marqueurs de la plaque ont été utilisés pour déterminer un angle connu de 95,80°. Cet angle a été calculé pour chaque essai. La moyenne de chaque essai a été soustraite à la valeur de l'angle idéal pour conduire à la détermination de l'erreur moyenne absolue associée à chaque système. La variabilité associée à cette mesure lors de chaque essai a été déterminée en calculant la valeur RMS entre la moyenne de l'angle mesuré et sa mesure à chaque trame.

4) La variabilité associée à la mesure du marqueur statique a été déterminée en calculant la RMS de la différence entre la position moyenne et la position mesurée à chaque trame. De plus, l'erreur absolue maximale associée à la mesure du marqueur statique a été définie comme la déviation maximale par rapport à la position moyenne.

II -1.4.Tests sur site pour le système magnétique

Le système 6D Research de Skill Technologies utilise des capteurs attachés. De ce fait le dispositif utilisé pour tester les systèmes à marqueurs passifs s'avère inapproprié. En revanche, deux marqueurs magnétiques ont été placés sur une baguette rigide à une distance de 40 cm. Ensuite, la baguette a été déplacée, par des mouvements divers, dans l'esapce d'enregistrement spécifié par la fabricant. Tous les essais ont duré 10 secondes et les données ont été recueillies à une fréquence d'échantillonnage de 60 Hz après un réalignement logiciel systématique des marqueurs avec le système en début d'essai. Une acquisition statique a été réalisée avec la baguette posée horizontalement sur le sol et alignée avec l'axe Y du système. Ensuite, la baguette a été tournée sur son grand axe (Y). Enfin, elle a été tournée le long de l'axe vertical. Les mesures réalisées comprennent l'erreur maximum et la RMS associées à la détermination de la distance entre les deux marqueurs ainsi que l'erreur maximum et la RMS associées à l'orientation des capteurs.

II -1.5.Résultats

II -1.5.1.Mesures de distance

II -1.5.1.1.Distance pour des marqueurs visibles par toutes les caméras

Les résultats des mesures de distance entre les deux marqueurs de la barre sont présentés Tableau 3. La position de ces deux marqueurs au sommet de la barre assurait qu'ils puissent être vus simultanément par chaque caméra lors de la rotation du dispositif. La seule exception à cette exigence provient du système Peak Motus, pour lequel seules cinq des six caméras pouvaient voir les deux marqueurs à tout moment.

	Longueur du volume (m)	Distance mesurée (cm)	RMS (cm)	Erreur maxi (cm)
Ariel system	1.73	49.882	0.427	1.666
CODA	3.10	50.112	0.487	1.515
ElitePlus	2.00	50.133	0.173	0.584
Motion Analysis	4.00	49.796	0.059	0.183
Peak	4.60	49.942	0.091	0.259
Qualisys	2.50	49.906	0.080	0.198
Vicon	2.00	49.953	0.062	0.183

Tableau 3: Distances mesurées entre deux marqueurs visibles en permanence et espacés de 50 cm.

Quatre des systèmes ont été capables de mesurer la distance moyenne entre les deux marqueurs avec une erreur inférieure au millimètre par rapport à la distance réelle. L'erreur la plus importante était de l'ordre de 2 millimètres. Les valeurs RMS de la variabilité de ces mesures étaient inférieures au millimètre pour 4 des systèmes testés. Cela signifie qu'en moyenne la distance mesurée par ces systèmes n'a pas varié de plus d'un millimètre durant l'essai.

II -1.5.1.2.Distance pour des marqueurs visibles par des paires de caméras

La mesure de la distance entre les deux marqueurs supérieurs de la plaque impliquait que chaque système puisse reconstruire leur trajet en 3D à partir d'images fournies par des paires de caméras lors de la rotation du dispositif. Ceci permet également d'éliminer une

certaine redondance rencontrée lors de la mesure de la distance des deux premiers marqueurs, ceux de la barre, qui eux, étaient vus en permanence par l'ensemble des caméras. Pour la marqueurs de la plaque, l'erreur moyenne de distance était inférieure au millimètre pour tous les systèmes à l'exception de l'un d'entre eux. La RMS de la variabilité de cette mesure était inférieure à 3 centimètres pour 6 des 7 testés et l'erreur maximale était légèrement supérieure à 1 centimètre (Tableau 4).

	Distance mesurée (cm)	RMS (cm)	Erreur maxi (cm)
Ariel system	9.015	0.151	0.494
CODA	8.928	0.225	0.926
ElitePlus	9.159	0.446	1.613
Motion Analysis	9.057	0.149	0.599
Peak	9.076	0.177	0.582
Qualisys	9.004	0.221	1.276
Vicon	8.98	0.129	0.557

Tableau 4: Distances mesurées entre deux marqueurs supérieurs de la plaque. La distance réelle entre ces deux marqueurs était 9 cm.

II -1.5.2.Mesures de distance

Les données des marqueurs de la plaque ont également été prises en compte pour calculer l'angle formé entre les trois marqueurs (Tableau 5). Ils étaient disposés en triangle, deux d'entre eux étant placés près du bord supérieur de la plaque et le dernier étant centré près du bord inférieur. Compte tenu du placement au sol du dispositif, une caméra qui voyait la plaque depuis le côté voyait finalement deux marqueurs car le marqueur le plus proche de la caméra et le marqueur le plus bas se confondaient. Par conséquent ce test était particulièrement dépendant de la disposition optimale des caméras. Les caméras des systèmes Peak Motus, Ariel, Qualisys et Elite Plus étaient placées de façon régulière sur un cercle autour du dispositif ce qui constitue une disposition idéale pour ce test. Les six caméras du système Motion Analysis étaient disposées sur les murs latéraux du volume. Les caméras murales étaient orientées environ à 45° les unes des autres et les caméras situées à l'extrémité de chacun des murs formaient approximativement un angle de 90°. Cette configuration de caméras est la moins bonne pour ce test. Enfin, les caméras du système Vicon ont été placées selon une configuration de compromis entre celles des systèmes Peak et Motion Analysis.

	Angle mesurée (deg)	RMS (deg)	Erreur maxi (deg)
Ariel system	95.104	2.109	5.062
CODA	95.524	3.392	9.035
ElitePlus	95.148	4.287	14.309
Motion Analysis	95.798	1.761	6.284
Peak	96.500	3.772	12.666
Qualisys	94.389	4.498	19.256
Vicon	94.543	1.421	4.632

Tableau 5: Angles mesurés entre les marqueurs de la plaque. L'angle réel entre les marqueurs était 95.8° cm.

En moyenne, tous les systèmes ont mesuré l'angle absolu avec une marge inférieure à 1.5° de sa valeur réelle. La RMS rendue par la plupart des systèmes est proche de 3°, ce qui représente un bon niveau de performance moyen. Cependant, l'erreur maximum pour chaque système peut être élevée avec des valeurs pouvant approcher 20°.

II -1.5.3.Mesures de confusion de marqueurs

Des mesures ont été effectuées sur le marqueur stationnaire en fonction de la distance minimale qui le séparait du marqueur du septième marqueur. La distance minimale réelle séparant ces deux marqueurs allait de 5 à 0 cm avec des incréments de 1 cm. En général, la plupart des systèmes a produit de meilleurs résultats lorsque la distance entre ces deux marqueurs était la plus grande. Pour les systèmes Peak Motus et Vicon 370, l'erreur associée à la mesure du marqueur statique a augmenté avec la diminution de la distance entre ce marqueur statique et le marqueur en rotation. Lorsque les marqueurs étaient distants de 1 cm, tous les systèmes à marqueurs passifs sauf un ont confondu les deux marqueurs et permuté leurs trajectoires. Le tracker du système Ariel n'a pas été affecté par ces confusions de marqueurs car il nécessite une intervention de l'utilisateur à chaque fois qu'il rencontre un problème comme, par exemple, une confusion de marqueurs. Par conséquent, lorsque le marqueur en rotation approchait le marqueur statique, l'utilisateur était prié de bien vouloir identifier lui-même chacun des marqueurs. Les systèmes Peak Motus et Vicon 370 se sont révélés incapables de corriger les confusions de marqueurs pour les distances 0 et 1 cm malgré des tentatives de réglage des paramètres de reconstruction. Les autres systèmes

fournissent des utilitaires de tracking et d'édition permettant de rompre et d'échanger des trajectoires.

Distance de séparation (cm)	Ariel	CODA	Elite	Motion	Peak	Qualisys	Vicon
5	----	0.074	0.123	0.085	0.125	0.054	0.047
4	0.390	0.235	0.141	0.090	0.117	0.048	0.072
3	----	0.221	0.174	0.091	0.155	0.052	0.068
2	0.364	0.211	0.183	0.090	0.256	0.054	0.083
1	----	0.191	0.138	0.091	0.320*	0.062	0.122*
0	0.243	0.190	0.300	0.078	0.282*	0.299	0.183*

Tableau 6 : RMS de la variabilité du marqueur stationnaire en fonction de sa distance minimale au marqueur en rotation. (* confusion de marqueurs : les résultats portent sur les portions de trajets correctement identifiées)

Distance de séparation (cm)	Ariel	CODA	Elite	Motion	Peak	Qualisys	Vicon
5	----	0.249	0.324	0.368	0.391	0.296	0.128
4	0.743	0.663	0.423	0.372	0.460	0.186	0.263
3	----	0.673	1.080	0.505	0.638	0.186	0.261
2	0.569	0.646	0.812	0.534	1.623	0.210	0.458
1	----	0.563	0.464	0.551	1.721*	0.230	0.600*
0	0.237	0.559	0.317	0.356	1.183*	3.206	1.725*

Tableau 7 : Erreur maximale pour le marqueur stationnaire en fonction de sa distance minimale au marqueur en rotation. (* confusion de marqueurs : les résultats portent sur les portions de trajets correctement identifiées)

La RMS du marqueur stationnaire a été obtenue en calculant la différence entre la position moyenne du marqueur et sa position à chaque image (Tableau 6). Pour obtenir ces informations avec les systèmes Peak Motus et Vicon370 , les essais ont été découpés pour garder uniquement les trames pour lesquelles les marqueurs étaient identifiés correctement. Les systèmes Vicon, Qualisys et Motion Analysis ont gardé le mouvement du marqueur stationnaire sous 1 mm tant que le marqueur en rotation était à plus de 1 cm. Le système Elite Plus a moyenné le marqueur statique à approximativement à 1.5 mm pour toutes les conditions. Le système Peak a mesuré un mouvement du marqueur statique de l'ordre de 2 mm tant que le marqueur en rotation se trouvait au delà de 2 cm. Le système CODA, lui, a moyenné les erreurs à 2 mm indépendamment de l'écartement entre les deux marqueurs. Le

système Ariel a moyenné à presque 4 mm. L'erreur maximale pour le marqueur statique est présentée pour chacun des systèmes dans le Tableau 7.

Les résultats pour le système Skill Technologies 6D Research sont reportés dans le Tableau 8 et le Tableau 9.

Test	RMS	Erreur maxi	Distance à l'origine
Statique	0.01	0.04	45
Rotation selon Y	0.30	0.66	55-75
Rotation selon Z	0.17	0.49	60-75

Tableau 8 : Erreurs (cm) associées aux mesures de distances effectuées avec le système Skill Technologies 6D Research

La distance moyenne entre les deux marqueurs mesurée pendant le test statique était de 41.28 cm. Cette distance a été utilisée comme étant la distance réelle entre les marqueurs pour les autres calculs. La plus grande valeur RMS pour la mesure de distance a été de 3 mm. L'erreur maximale correspondant à ce test était de l'ordre de deux tiers de centimètre. Les erreurs obtenues lors des tests en mouvement étaient considérablement plus élevées que celles obtenues lors des tests en condition statique. Les mêmes tendances sont confirmées par les résultats obtenus pour les orientations des deux marqueurs puisque les erreurs mesurées lors du mouvement pouvaient être jusqu'à 30 fois plus élevées que les erreurs calculées pour le test statique.

Test	RMS X	RMS Y	RMS Z	Max X	Max Y	Max Z
Statique	0.097	0.015	0.053	0.181	0.051	0.086
Rotation selon Y	1.860	0.282	1.493	4.944	1.673	3.851
Rotation selon Z	1.060	0.819	7.152	2.544	2.751	8.846

Tableau 9 : Erreurs (deg) associées aux mesures de l'orientation entre les marqueurs effectuées avec le système Skill Technologies 6D Research

II -1.6.Discussion

En plus des résultats quantitatifs, plusieurs autres caractéristiques de ces systèmes doivent être prises en compte. En premier lieu, il convient de tenir compte du temps nécessaire à l'obtention des données lors de la phase de tracking. Pour des fichiers de 4

secondes, il a fallu moins de 2 secondes aux systèmes Peak Motus, Vicon et Motion Analysis. Le système Qualisys a eu besoin de presque 5 secondes alors qu'il a fallu 20 minutes par caméra (soit approximativement 1h30 pour 5 caméras) au système Ariel en partie à cause du fait que les procédures de tracking et d'édition se déroulent simultanément. Le tracking des données du système Elite Plus a été réalisé par une société spécialisée sans qu'il soit possible d'obtenir d'information sur la durée du travail. Aucun tracking n'est nécessaire pour le tracking des données des systèmes à marqueurs actifs ou électomagnétiques car elles sont immédiatement disponibles après la capture du mouvement.

En fait, une grande partie des différences dans les étapes postérieures à la capture des données provient des utilitaires d'édition des trajectoires des marqueurs. En effet, la quantité de travail d'édition nécessaire et l'ergonomie des utilitaires est fondamentale lorsqu'un gain de temps est recherché. Les éditeurs des systèmes Vicon et Peak Motus travaillent directement dans l'espace, fournissant à l'utilisateur une trace visuelle dans l'espace de la trajectoire de chaque marqueur. Le temps d'édition d'un essai Vicon est relativement réduit et les données utilisables pour le post traitement étaient obtenues en moyenne en moins de 2 minutes. Pour le système Peak Motus, les données étaient exploitables au bout d'environ 10 à 20 minutes selon la quantité de travail d'édition à fournir.

II -2. Méthode de Ehara

II -2.1.Protocoles et variables mesurées

Ce travail qui est répété périodiquement au Japon consiste à évaluer les systèmes d'analyse 3D. Pour cela un espace de 7 mètres par 7 mètres est alloué à chaque firme participante. Les comparaisons sont établies pour trois types d'applications. Chaque type d'application a un protocole spécifique. Chaque firme est tenue de participer au concours pour le premier type et peut, si elle le désire, participer aux autres concours.

II -2.1.1.Spécification de base pour la réhabilitation et l'industrie

L'analyse de la marche en réhabilitation est réalisée couramment au moyen de systèmes d'analyse 3D. L'objectif de cette catégorie est de comparer la précision des systèmes durant la marche.

Chaque firme doit disposer ses caméras dans l'espace alloué (7m x 7m). Cet espace comprend l'espace destiné au mouvement du sujet. Aucune limitation n'est donnée sur le nombre de caméras et leur disposition.

Le sujet est choisi par le comité d'organisation. Chaque firme dispose ses propres marqueurs sur lui.

Pour la première tâche, le sujet marche dans l'espace calibré (Figure 2 A) selon une séquence de pas particulière (Figure 2 C). Chaque firme doit mesurer les coordonnées 3D des deux marqueurs (Figure 2 B) et les stocker au format ASCII. Le comité évalue ensuite la précision de la distance mesurée entre les deux marqueurs.

Pour la seconde tâche, il s'agit de disposer trois marqueurs sur un support en forme de L et de mesurer leurs coordonnées pour les stocker au format ASCII. L'espace de marche du sujet et la séquence de pas sont les mêmes que pour la première tâche. Le comité évalue ensuite la précision de l'angle mesuré entre les trois marqueurs.

Pour la troisième tâche, il s'agit de disposer deux ensembles de trois marqueurs (Figure 3) et de calculer la position d'un marqueur virtuel A à partir des trois marqueurs réels de l'ensemble B et , de même, de calculer la position d'un marqueur virtuel D à partir des trois marqueurs réels de l'ensemble C. L'espace de marche du sujet et la séquence de pas sont les mêmes que pour la première tâche. Le comité évalue ensuite la précision de la distance mesurée entre les points A et D.

La quatrième tâche consiste à disposer dix marqueurs sur le sujet et à enregistrer sa marche puis à afficher le résultat sur un écran d'ordinateur sous la forme de stick diagrammes. Le comité évalue le temps de traitement.

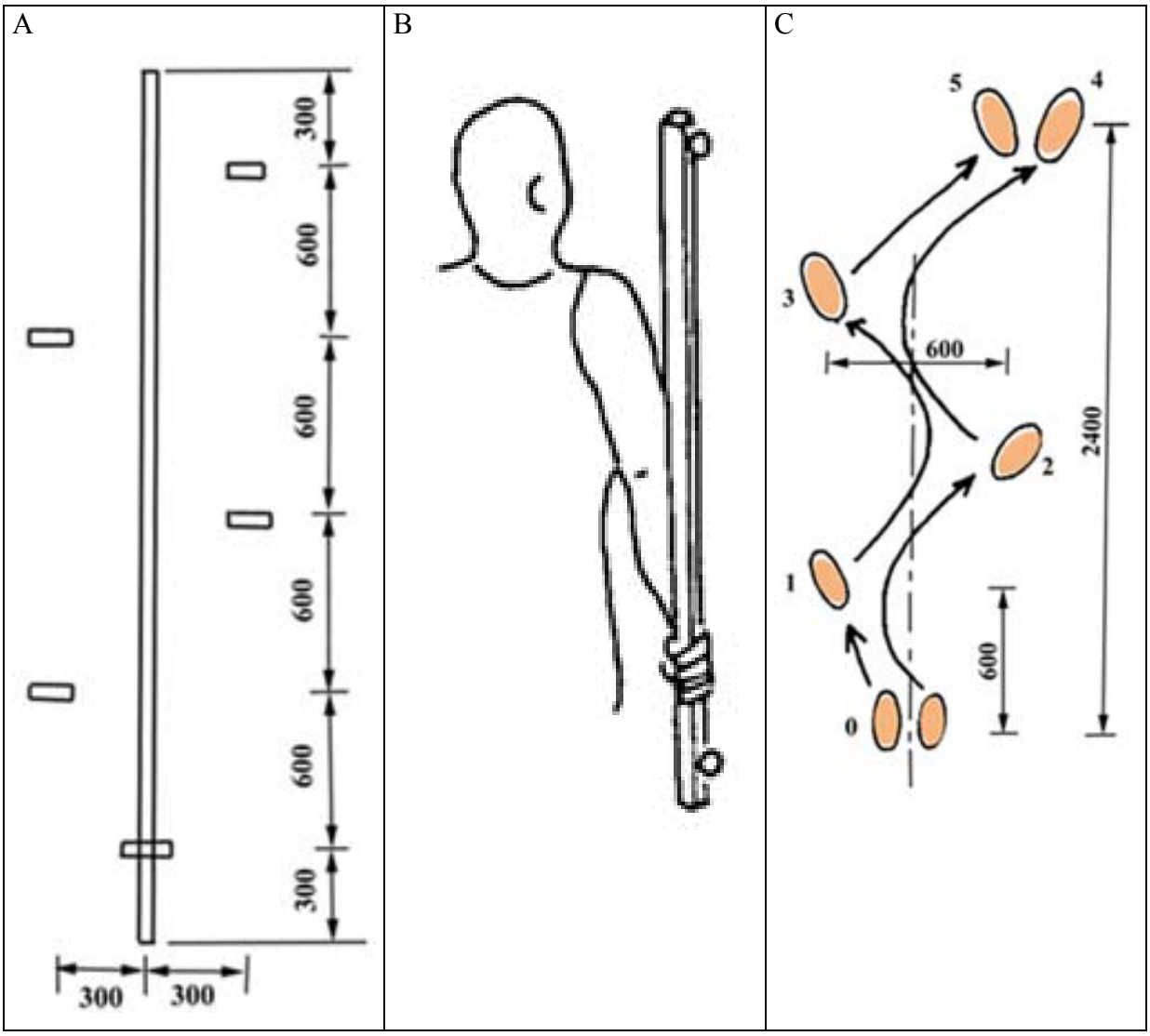


Figure 2 : Espace calibré (A), séquence de pas (C) et marqueurs portés par le sujet (B).

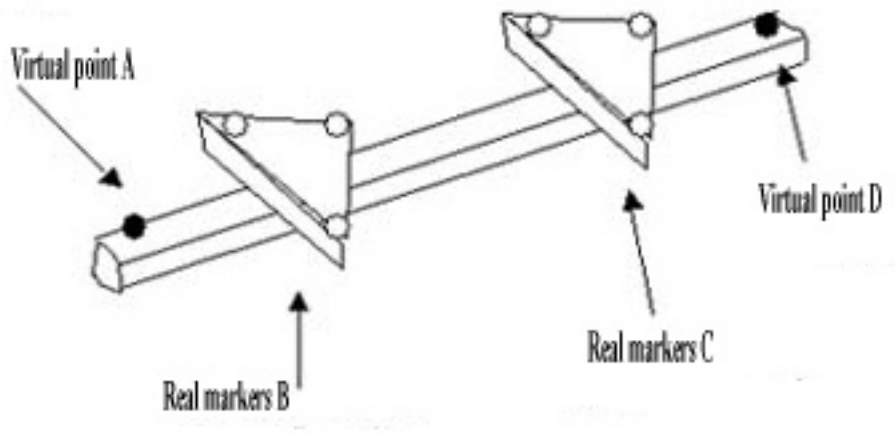


Figure 3 : Dispositif utilisé pour la troisième tâche.

II -2.2.Systèmes comparés

En 2002, les systèmes suivants ont été comparés :

Système	marqueurs	câble	Identification des marqueurs
Frame-DIAS	réflectifs		manuel
VICON	réflectifs		automatique
Visualeyez		sans fil	automatique
PhaseSpace		avec fils	automatique
Peak Motus Real Time	réflectifs		automatique
Peak Motus Video	réflectifs		manuel
EAGLE DIGITAL SYSTEM	réflectifs		automatique
ProReflex	réflectifs		automatique

II -2.3.Résultats 2002

II -2.3.1.Tâche Numéro 1 (mm)

SYSTEM	VRAI	moyenne	SD	Ave.Abs	Max.Err+	Max.Err-
Frame-DIAS	900,0	896,61	3,81	3,59	1,87	-12,54
VICON	899,5	899,92	0,24	0,42	1,04	-0,23
Visualeyez	899,0	890,31	1,54	8,69	-6,34	-16,54
PhaseSpace	899,0	929,79	58,69	42,49	137,47	-24,34
Peak Motus Real Time	900,5	905,18	1,02	4,68	7,90	0,11
Peak Motus Video	900,5	897,40	3,11	3,54	3,62	-9,84
EAGLE DIGITAL SYSTEM	902,0	899,23	0,36	2,77	-1,74	-3,65
ProReflex	899,0	901,32	0,75	2,32	4,21	0,71

II -2.3.2.Tâche Numéro 2 (degrés)

SYSTEM	VRAI	moyenne	SD	Ave.Abs	Max.Err+	Max.Err-
Frame-DIAS	90	90,649	0,4812	0,6802	1,9032	-0,443
VICON	90	89,857	0,1513	0,1587	0,182	-0,575
Visualeyez	90	90,237	0,4805	0,4112	2,0526	-1,565
PhaseSpace	90	87,867	9,2641	6,435	11,622	-23,05
Peak Motus Real Time	90	89,479	0,3956	0,5592	0,9174	-1,966
Peak Motus Video	90	89,728	0,6656	0,5753	2,1288	-2,364
EAGLE DIGITAL SYSTEM	90	90,525	0,1277	0,5247	0,8458	0,1753
ProReflex	90	89,676	0,2355	0,3308	0,2248	-1,183

II -2.3.3.Tâche Numéro 3 (mm)

SYSTEM	VRAI	moyenne	SD	Ave.Abs	Max.Err+	Max.Err-
VICON	899,5	900,00	0,15	0,50	1,09	0,12
Visualeyez	899,0	888,89	3,28	10,11	-0,84	-26,10
Peak Motus Real Time	900,0	901,83	1,00	1,83	4,90	-0,33
Peak Motus Video	900,0	899,30	2,06	1,68	5,02	-8,57
EAGLE DIGITAL SYSTEM	900,0	899,23	0,35	0,77	0,28	-1,68

II -2.3.4.Temps nécessaire et méthode de reconstruction et d'identification des marqueurs

SYSTEM	**process time**	**marker ID**
Frame-DIAS	33min02sec	manuel
VICON	1.94sec	automatique
Visualeyez	0sec	automatique
PhaseSpace	0sec	automatique
Peak Motus Real Time	5.78sec	automatique
Peak Motus Video	15min55sec	manuel
EAGLE DIGITAL SYSTEM	0sec	automatique
ProReflex	42sec	automatique

II -2.3.5.Spécification de base pour le sport et l'animation

D'autres protocoles destinés au sport et à l'animation sont développés mais ils reposent essentiellement sur des critères plus qualitatifs que quantitatifs. Nous aurons l'occasion de revenir sur le temps de traitement ou l'ergonomie dans la suite de ce rapport.

III - Performance du Vicon 370 et du Vicon 8 in situ

III -1. Exemple de mise en œuvre d'un système Vicon 8 à 24 caméras

III -1.1.Matériel

Le Vicon 8 est un appareil haut de gamme destiné à tous types d'applications (Figure 4) en capture du mouvement humain (animation, jeux vidéo, recherche, sport …).

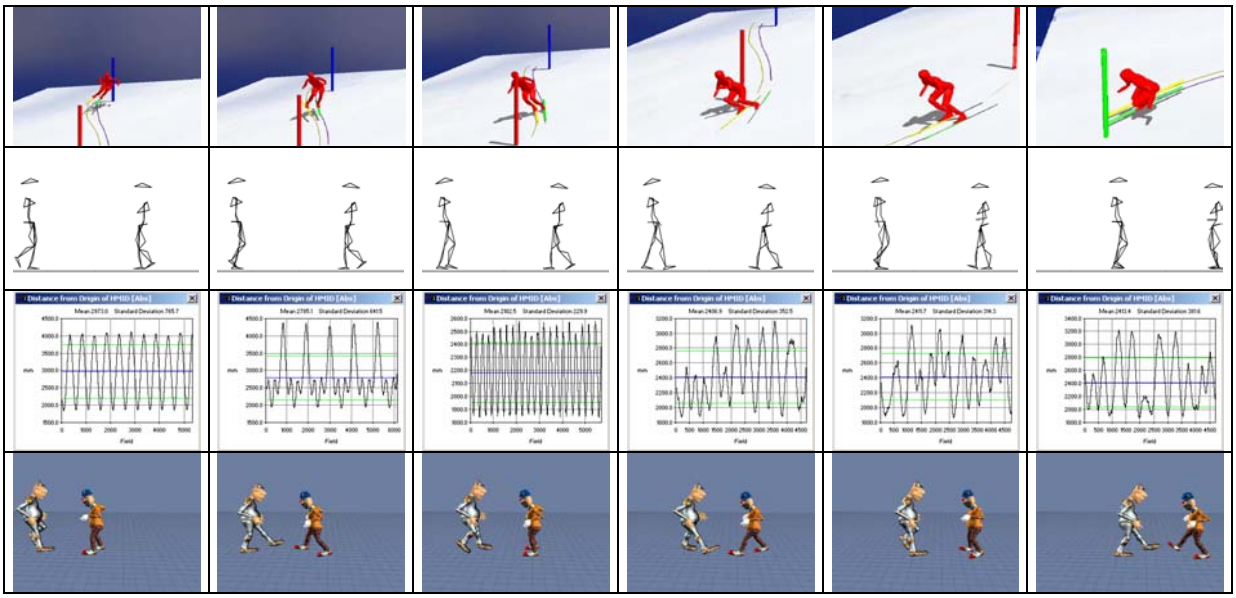


Figure 4 : Exemples d'applications dans le domaine du sport, de la recherche et de l'animation.

Le système est composé d'un ensemble de caméras (M-Cams), équipées d'un flash annulaire infrarouge (Figure 5 A et B) et disposées de façon irrégulière autour de la zone que l'on souhaite calibrer (Figure 5 C). Par groupes de trois, elles sont reliées à des concentrateurs qui permettent de les alimenter et de recueillir le signal vidéo qui est fourni à une station centrale (Figure 5 D) à laquelle est connecté chaque concentrateur. Cette station est ensuite mise en réseau avec un ordinateur de type PC, qui sert au pilotage logiciel de l'ensemble du système. Selon les nécessités de capture, l'échantillonnage du signal vidéo est fait à haute fréquence (60, 120, 240 Hz, etc.).

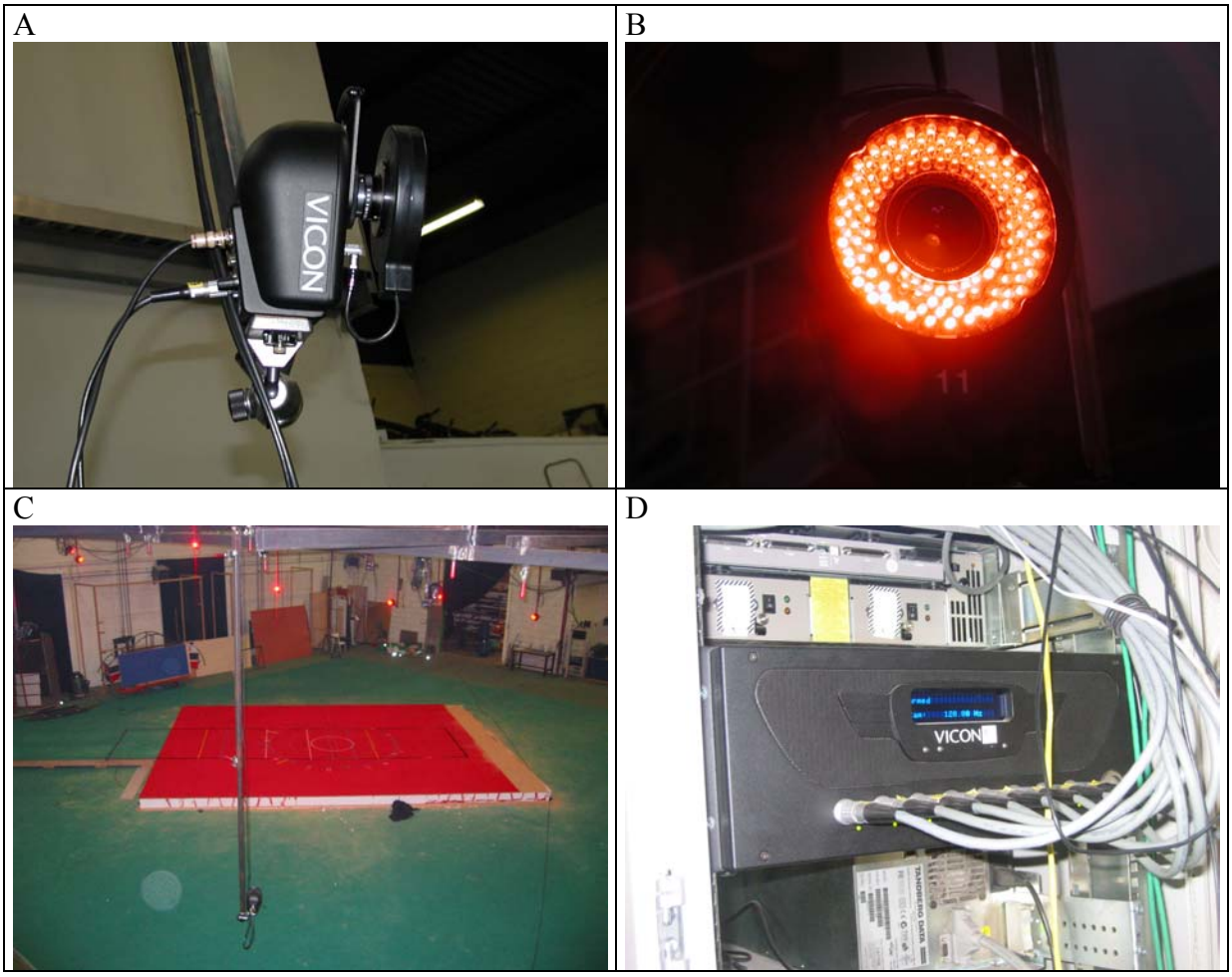


Figure 5 : Exemple de caméra M-Cam (A) munie de son flash annulaire (B). L'ensemble des 24 caméras est disposé autour de la zone active (C). Les caméras sont reliées à une station centrale, le Vicon 8 (D)

III -1.2.Calibration du système

Une fois les caméras disposées autour du lie de capture, il reste à calibrer le système. Si la disposition des caméras est convenable, cette procédure entièrement automatisée prend environ 5 minutes. Elle se déroule en deux étapes successives sans jamais que l'opérateur n'ait recours à des grilles munies de marqueurs qui représentent toujours un frein à la réalisation de captures rapides et de bonne qualité.

III -1.2.1.Première étape : la calibration statique

La calibration statique dure 3 secondes. Elle consiste à placer une équerre dans le volume à calibrer et à enregistrer la position de marqueurs situés sur cette équerre (Figure 6 A). La géométrie propre de l'équerre est connue du système et il calcule ainsi la direction des axes du repère de travail (X, Y et Z).

III -1.2.2.Deuxième étape : la calibration dynamique

La calibration dynamique dure environ 5 minutes. Elle consiste à déplacer (Figure 6 C-E) une baguette munie de deux marqueurs dans l'espace 3D à calibrer (Figure 6 B). Sur la base de la connaissance de la distance entre les deux marqueurs de la baguette, le système calcule la métrique de l'ensemble du volume souhaité et fournit les résultats de la calibration (Figure 6 F).



Figure 6 : Equerre utilisée pour la calibration statique (A). Baguette utilisée pour la calibration dynamique (B). Mouvements de la baguette permettant au système de reconstruire la métrique du volume de travail (C-E). Résultats de la calibration (F).

III -1.3.Captures

III -1.3.1.Capture statique et « auto-abelling »

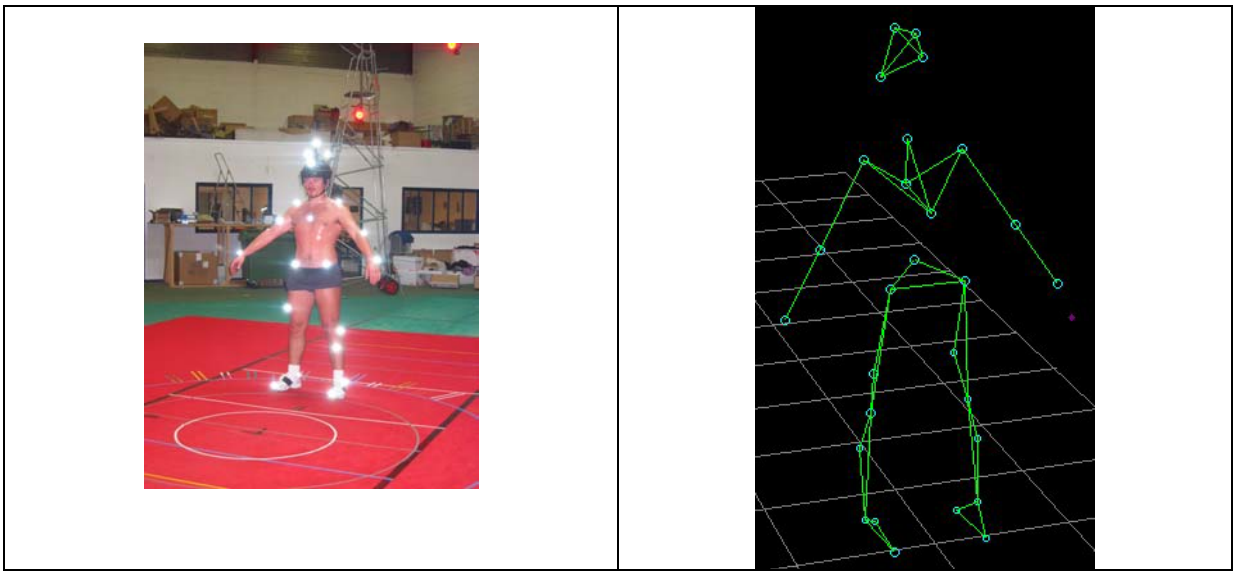


Figure 7 : Illustration de la procédure de capture statique conduisant à l'auto labeling. Le sujet, immobile, est capturé (A). Il est ensuite reconstruit en 3D et ces marqueurs sont identifiés (B).

Les fonctions d'auto-labelling des systèmes Vicon, c'est à dire la possibilité d'identifier nommément les marqueurs portés par le sujet (épaule gauche, genou droit, etc.) suppose d'avoir « calibré le sujet » par un enregistrement du dit sujet en position statique (Figure 7 A). La mise en correspondance de chaque point avec le site anatomique qu'il représente est faite manuellement mais une bonne fois pour toute par l'opérateur (Figure 7 B). Par la suite, le système se capable d'identifier automatiquement et rapidement (quelques secondes) chaque marqueur de chaque sujet (si le mouvement est fait à plusieurs) sur la base des rapports de distance entre tous les couples de marqueurs.

III -1.3.2.Capture dynamique, reconstruction et « auto-abelling »

Par la suite, il devient aisé de capturer une multitude de marqueurs portés éventuellement par plusieurs sujets (Figure 8 A). La reconstruction s'effectue automatiquement et directement en 3D. Elle est suivie de l'auto-labelling (Figure 8 B-D). L'ensemble de la procédure (reconstruction et auto-labelling) ne dure guère plus que le mouvement lui-même c'est à dire qu'il faut par exemple compter environ 30 secondes avant de pouvoir montrer le résultat à l'écran à des sujets (athlètes, patients, acteurs etc.) qui se seraient déplacés environ 30 secondes.

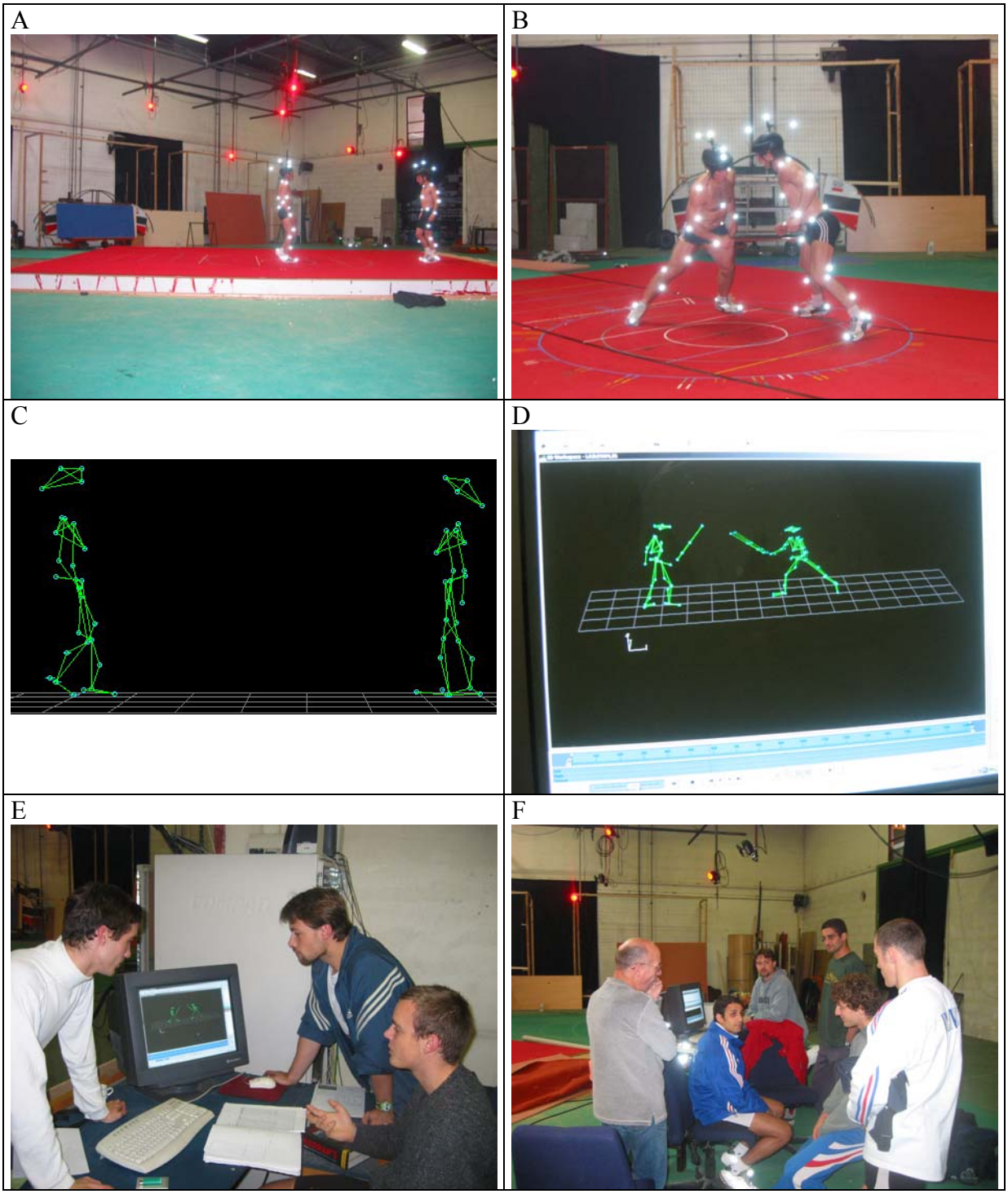


Figure 8 : Plusieurs sujets peuvent être capturés simultanément (A-B), reconstruits et identifiés en un temps (dépendant de la puissance de l'ordinateur sur lequel le logiciel est installé) extrêmement bref (C-D). Les premiers résultats peuvent être immédiatement discutés avec les athlètes ou leurs entraîneurs (E-F).

III -1.4.Fonctionnalités pour les calculs simples

Outre les fonctionnalités de reconstruction, auto-labelling et visualisation rapide, le logiciel fourni en standard permet de réaliser des calculs simples (Figure 9) immédiatement après la capture (positions, vitesses et accélérations linéaires et angulaires, distance entre deux marqueurs, distance parcourue, etc.).

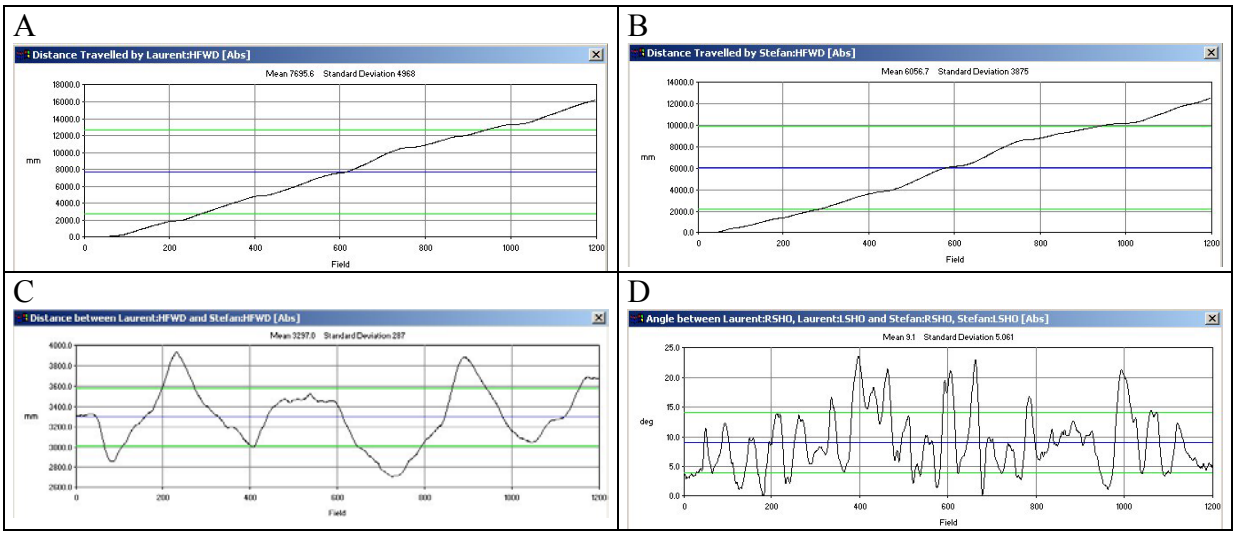


Figure 9 : Exemples de décours temporels obtenus immédiatement après la reconstruction des données.

III -1.5.Quelques éléments complémentaires concernant les systèmes Vicon

En plus des fonctionnalités décrites ci-dessus, il est évident que la Vicon 8 peut être interfacé avec tout autre type de dispositif analogique de capture de mouvement (enregistreurs emg, plate formes de force, etc.).

En particulier, il est possible de coupler une caméra classique (de type DV par exemple) au système de façon à compléter l'information par une vue de la scène et du mouvement que le Vicon est en train d'enregistrer.

Enfin, il est maintenant possible de travailler en temps réel, ce qui ouvre des nouvelles possibilités dans le domaine des neurosciences intégratives et comportementales appliquées au sport ou à d'autres domaines d'activité. En effet, de nombreuses formes de bio-feedback ou de réalité augmentée peuvent être envisagées lors de la production de mouvements hyper complexes.

III -2. Calculs de distances supposées constantes

III -2.1.Nature des mesures

Les sujets ont été équipés d'un casque comportant des marqueurs lumino réfléchissants. Les marqueurs du casque sont placés dans le plan sagittal. Le premier, central, est destiné à enregistrer la position de la tête du sujet dans l'espace. Les 2 autres, antérieur et postérieur, permettent d'enregistrer la direction de la tête. Ils sont situés aux deux extrémités d'un segment en tube d'aluminium de longueur constante (Figure 10).



Figure 10 : Casque porté par le sujet.

Nous mesurons la RMSE définie comme :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(m - x_i)^2}$$

où x représente le signal d'entrée, m sa moyenne et n le nombre d'échantillons.

III -2.2.Mesure avec le Vicon 370 équipé de 5 caméras

III -2.2.1.Mouvement enregistré

Ici, les sujets ont eu pour consigne de marcher à vitesse constante et de suivre le trajet elliptique tracé au sol en enchaînant 5 tours et demi (Figure 11). Le premier quart de tour a servi de phase de "lancement" et le dernier de phase de "ralentissement". Les portions de trajets dites de "lancement" et de "ralentissement" n'ont pas été utilisées pour les calculs. Les bornes de calcul utilisées sont toutes comprises entre le premier et le dernier croisement du grand axe par le sujet.

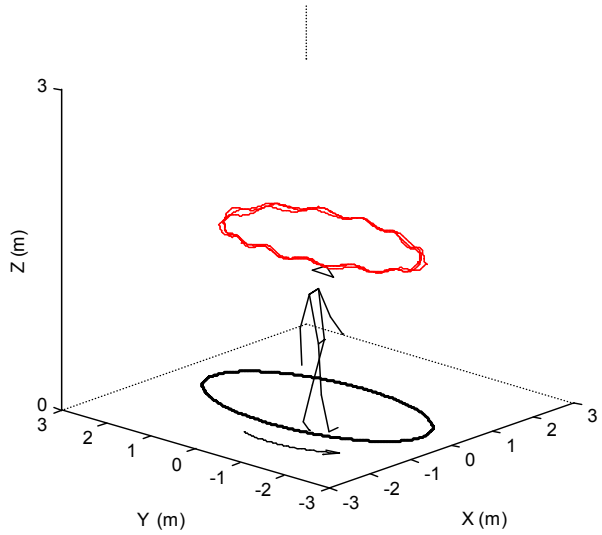


Figure 11 : Vue 3D du mouvement réalisé par un sujet typique lors d'un essai à vitesse rapide en sens anti-horaire sur une ellipse 0.5. Nous avons représenté la trajectoire de la tête lors de 3 tours successifs.

Nous avons tracé au sol 5 trajets distincts. Les coordonnées des points de ces trajets sont données par les équations paramétriques d'une ellipse centrée en (0,0). Ils ont tous un périmètre *P* identique (11.71 m). Ils se différencient par leur coefficient d'aplatissement. Les valeurs du coefficient d'aplatissement choisies sont 1, 0.66, 0.5, 0.33 et 0.25. Il apparaît qu'un coefficient d'aplatissement de 1 correspond à un cas particulier d'ellipse puisque le petit et le grand rayon sont identiques. Il s'agit alors d'un cercle.

III -2.2.2.Exemples de résultats

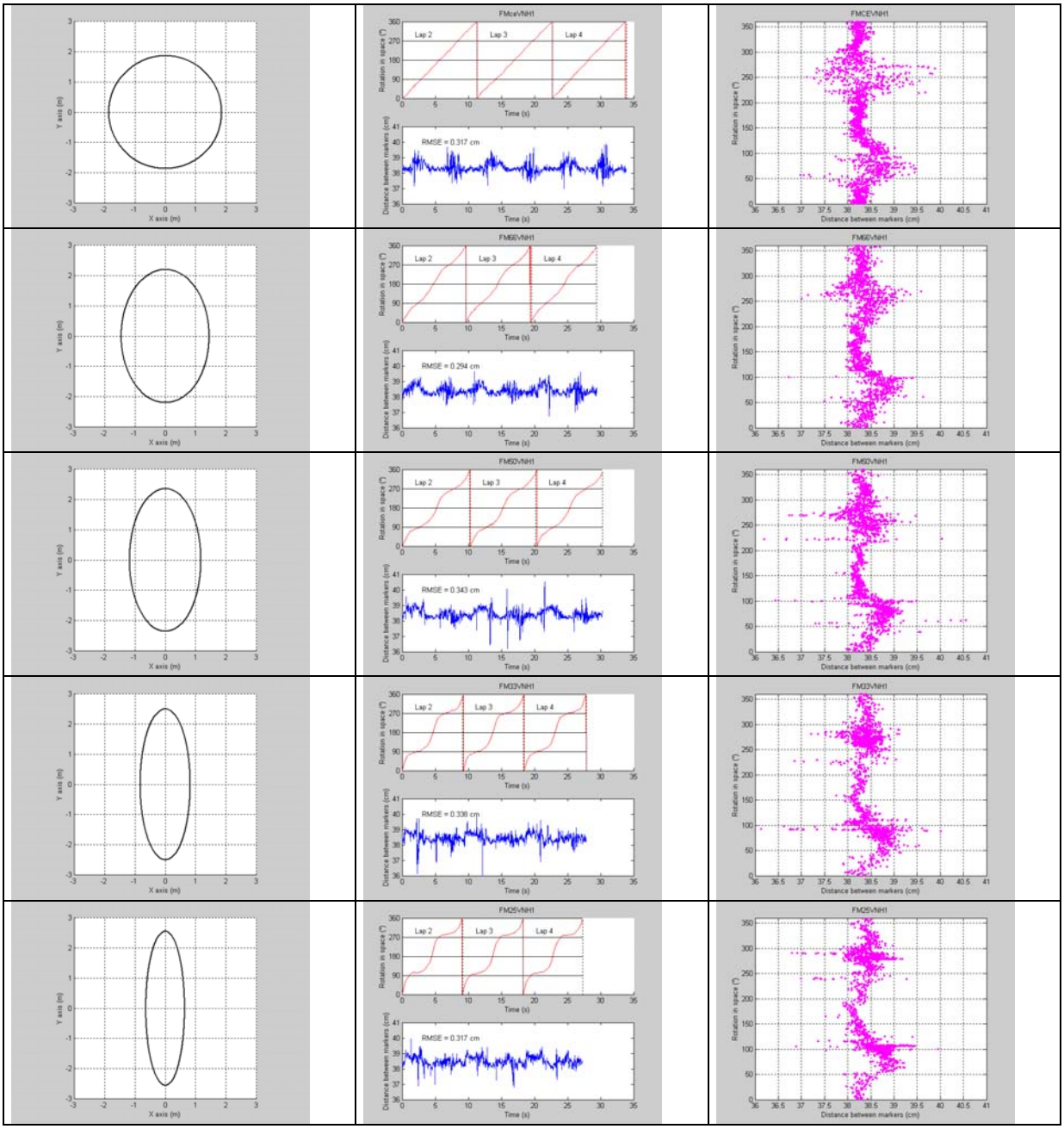


Figure 12 : Pour chaque type de forme (gauche), la rotation des marqueurs du casque dans le plan horizontal et la distance entre les deux marqueurs sont présentées (centre). On ne constate pas de corrélation entre l'orientation du casque et la précision de la mesure de distance.

III -2.3.Calculs de distances avec le Vicon 8 équipé de 13 caméras

III -2.3.1.Mouvement enregistré

Les déplacements du sujet se font sur des formes variées (Figure 13).

III -2.3.2.Exemples de résultats

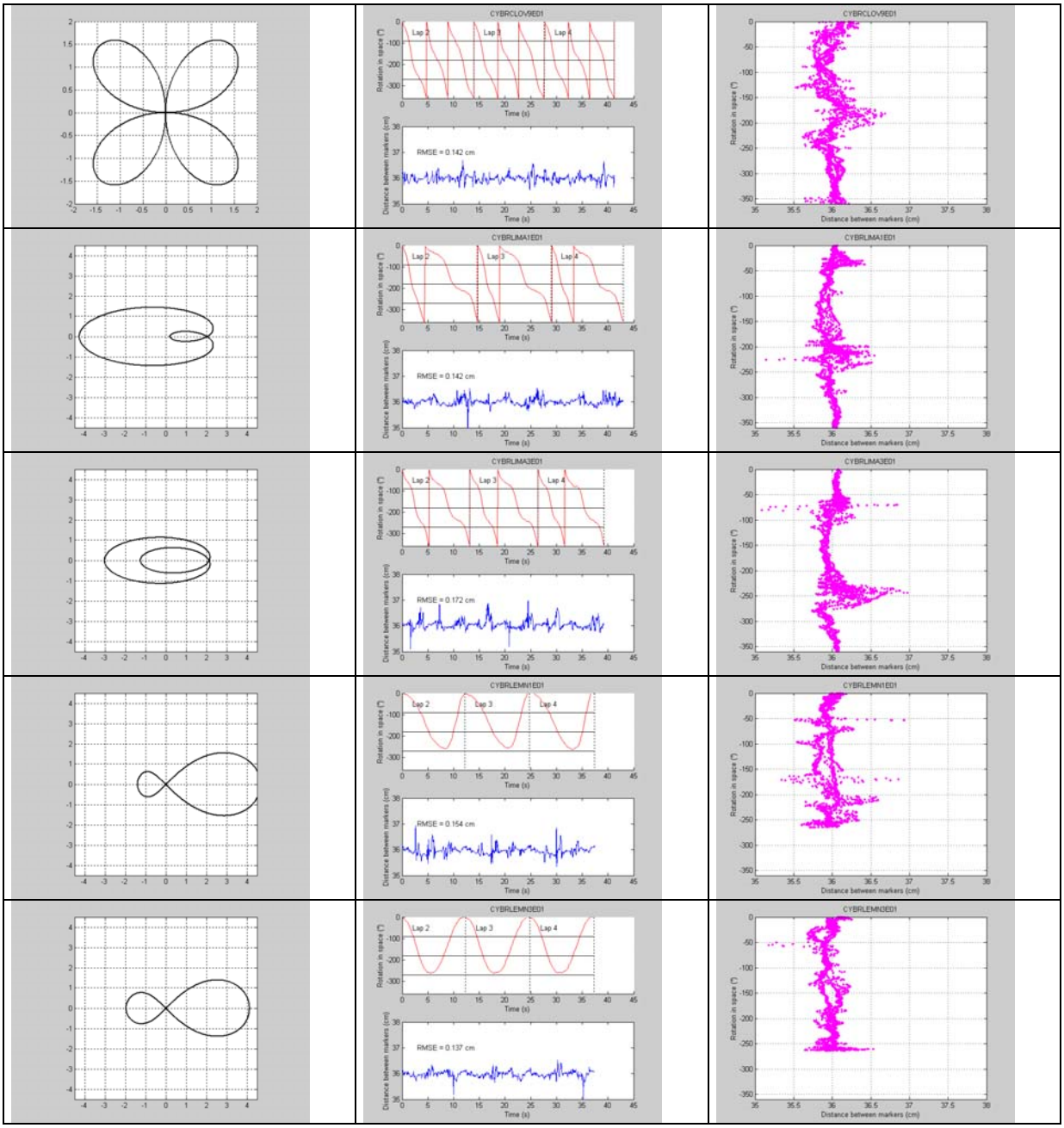


Figure 13 : Pour chaque type de forme (gauche), la rotation des marqueurs du casque dans le plan horizontal et la distance entre les deux marqueurs sont présentées (centre). On ne constate pas de corrélation entre l'orientation du casque et la précision de la mesure de distance.

III -2.4.Calculs de distances avec le Vicon 8 équipé de 23 caméras

III -2.4.1.Mouvement enregistré

Les déplacements du sujet se font sur des formes variées (Figure 14).

III -2.4.2.Exemples de résultats

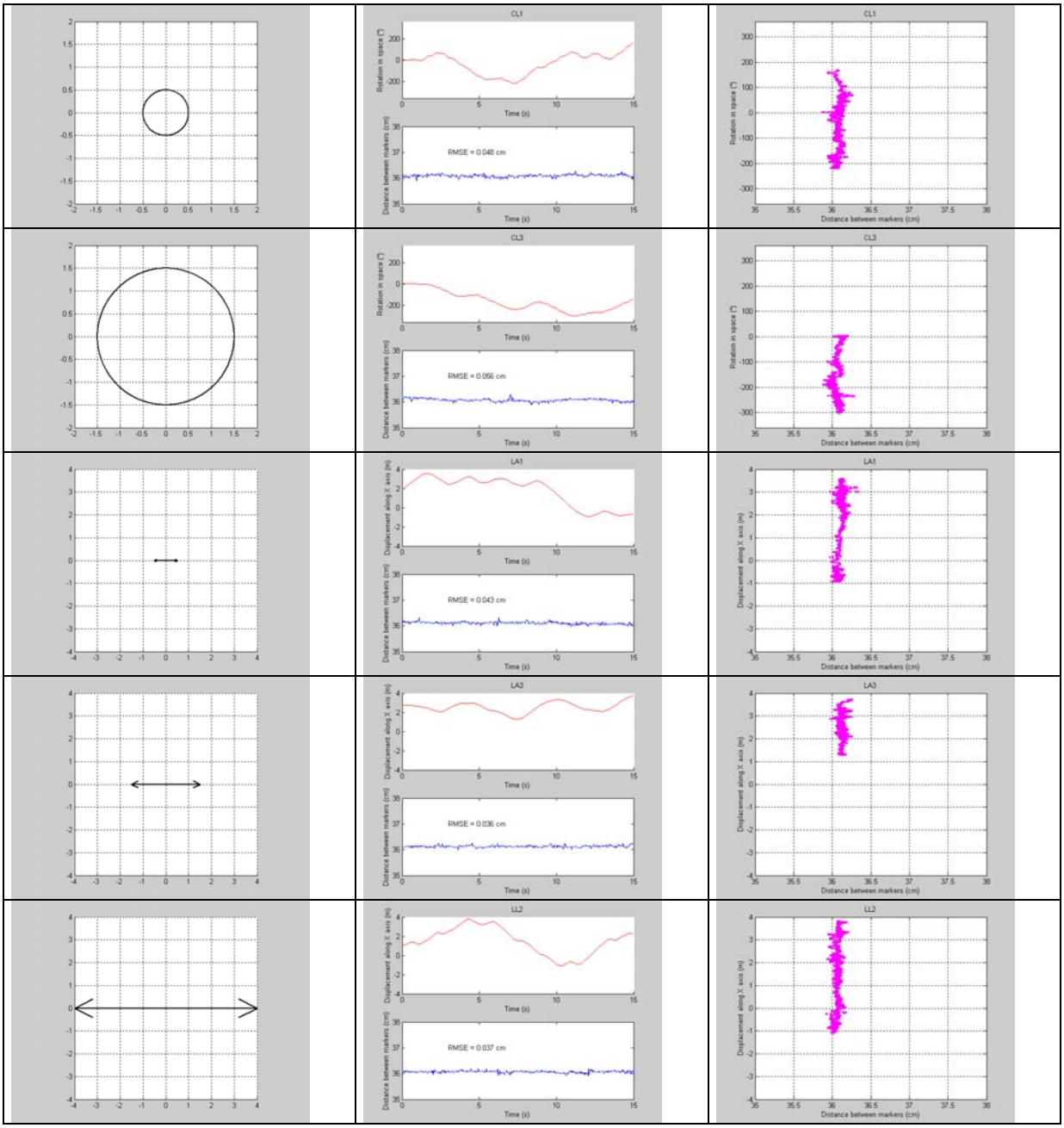


Figure 14 : Pour chaque type de forme (gauche), la rotation des marqueurs du casque dans le plan horizontal et la distance entre les deux marqueurs sont présentées (centre). On ne constate pas de corrélation entre l'orientation du casque et la précision de la mesure de distance.

IV - Moyens de traitement des données brutes en fonction des domaines de recherche : le Modeleur-Simulateur du Mouvement (MSM)

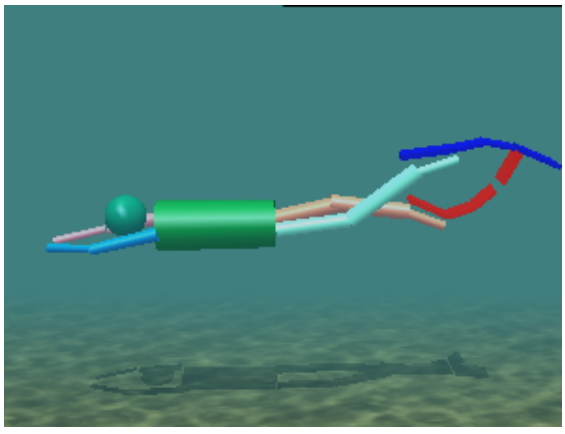
Bien que tous les fabricants fournissent en standard des logiciels de calcul simple, ils ne fournissent pas spontanément de véritables suites de traitement des données qui puissent s'affranchir des particularités de tel ou tel système. Pourtant les logiciels développés par la société Kihoptsys à Marseille, permettent une analyse extrêmement fine et détaillée des données provenant de n'importe quel système de capture d'image (y compris de caméscopes analogiques ou numériques).

Le Modeleur-Simulateur du Mouvement (MSM) est un ensemble complet d'outils d'aide à la modélisation, la simulation et la visualisation du mouvement humain. MSM est un outil complet de modélisation et de simulation automatique du mouvement humain utilisable rapidement par des non-spécialistes de la biomécanique, c'est-à-dire par les intervenants directs sur l'activité motrice (cliniciens, entraîneurs, chirurgiens orthopédistes, chercheurs).

Ce qui est proposé ici est donc un couplage entre expérimentation, modélisation et simulation. La simulation est définie comme la possibilité de développer des "expérimentations virtuelles" sur un modèle numérique.

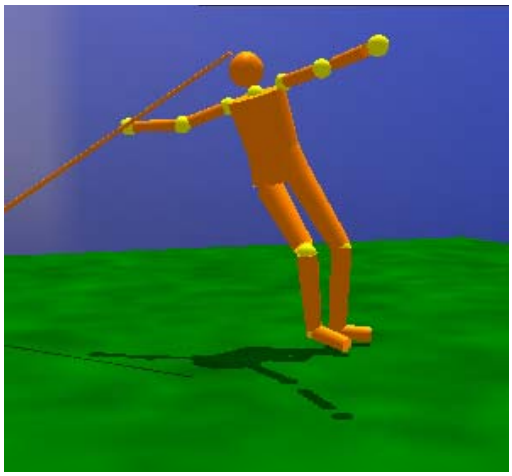
IV -1. MSM : Applications au sport

IV -1.1.Analyse



M.S.M. est un outil puissant d'analyse du mouvement. Couplé avec des logiciels d'enregistrement du mouvement vidéo (tel que ***3D Vision***) ou opto électronique (tel Vicon, Elite, Qualisys et motion Analysis) il permet d'analyser le mouvement en situation (lors de l'entraînement ou en compétition).

IV -1.2.Modélisation

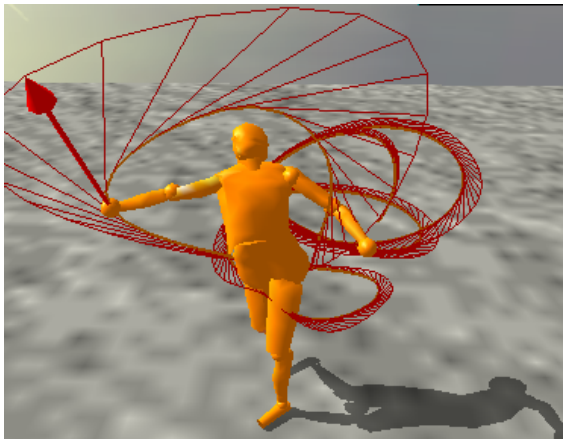


M.S.M. permet de générer automatiquement des modèles 2D ou 3D de l'activité observée. Une fois le modèle constitué, il est alors possible de calculer/visualiser toutes les grandeurs cinématiques et/ou dynamiques (vitesse, accélérations, forces et moments etc.). Il devient alors possible de comparer quantitativement différents modèles correspondant à un même athlète (suivi d'entraînement) ou pour différents athlètes (comparaison de technique).

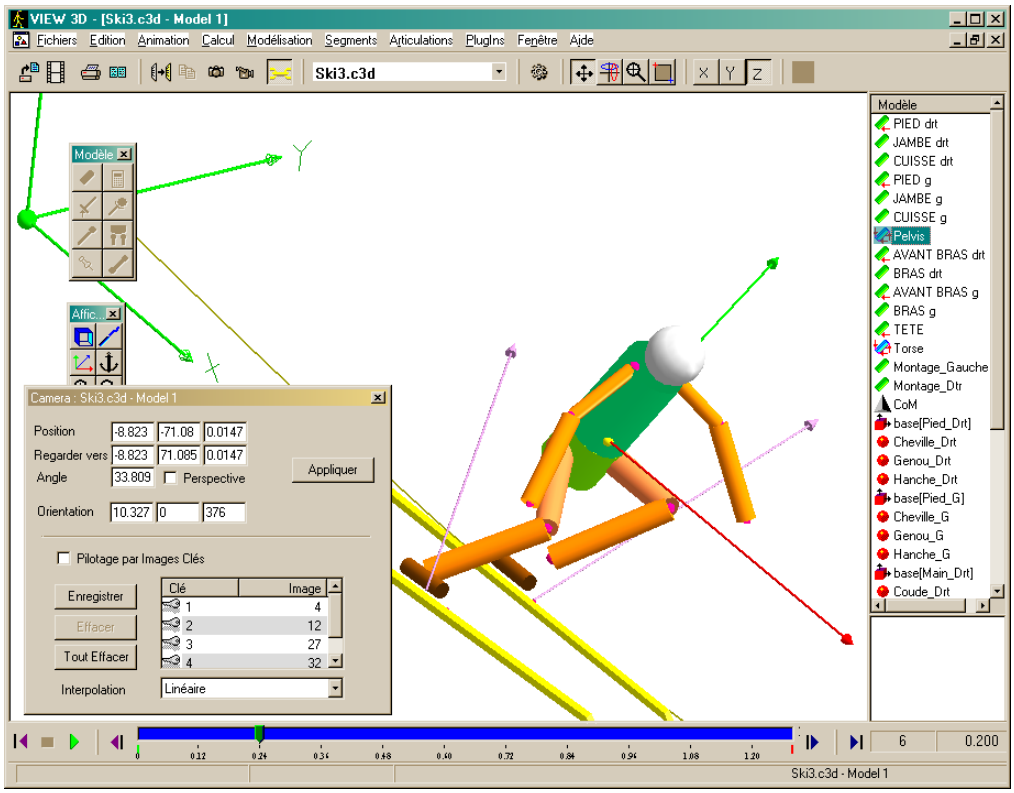
IV -1.3.Visualisation

La visualisation de l'analyse et du modèle s'effectue en 3D. Il est alors aisé de changer de point de vue (zoom, caméra mobile etc.). L'affichage des paramètres calculés s'effectue sous forme de graphiques et/ou de vecteurs associés aux modèles.

Il est possible de synchroniser les images vidéos (sources du modèle) et les animations 3D des différents modèles calculés et ainsi de tout visualiser en même temps.



IV -1.4.Interface logicielle pour le sport

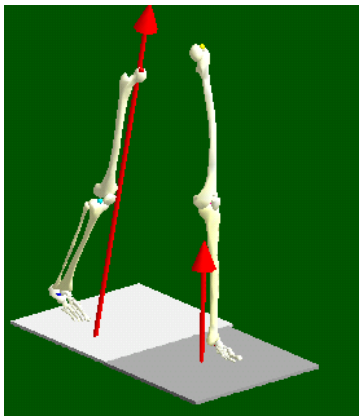


IV -2. M.S.M : Applications au domaine médical

IV -2.1.Analyse

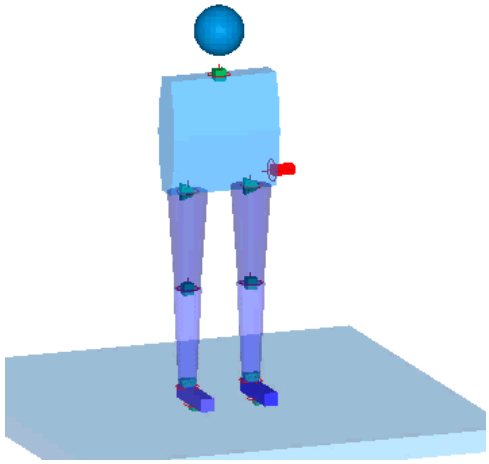
M.S.M. est un outil puissant d'analyse du mouvement humain normal et pathologique.

Couplé avec des logiciels d'enregistrement du mouvement vidéo (tel que ***3D Vision***) il permet d'analyser le mouvement afin de proposer une aide au diagnostic. ***M.S.M.*** s'intègre directement aux données issues d'autres systèmes d'analyse cinématique (*Vicon, Elite, Qualisys et Motion Analysis*).



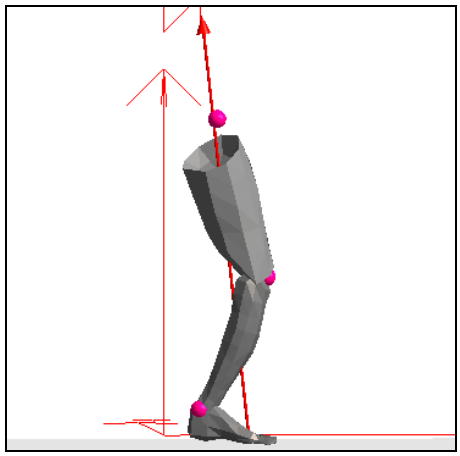
IV -2.2.Modélisation

M.S.M. permet de générer automatiquement des modèles 2D ou 3D du mouvement observé. Une fois ce modèle constitué, il est alors possible de calculer/visualiser toutes les grandeurs cinématiques et/ou dynamiques (vitesses, accélérations, forces, moments etc.). Il devient alors possible de comparer quantitativement différents modèles correspondant à des sujets sains ou à différentes causes de pathologie.

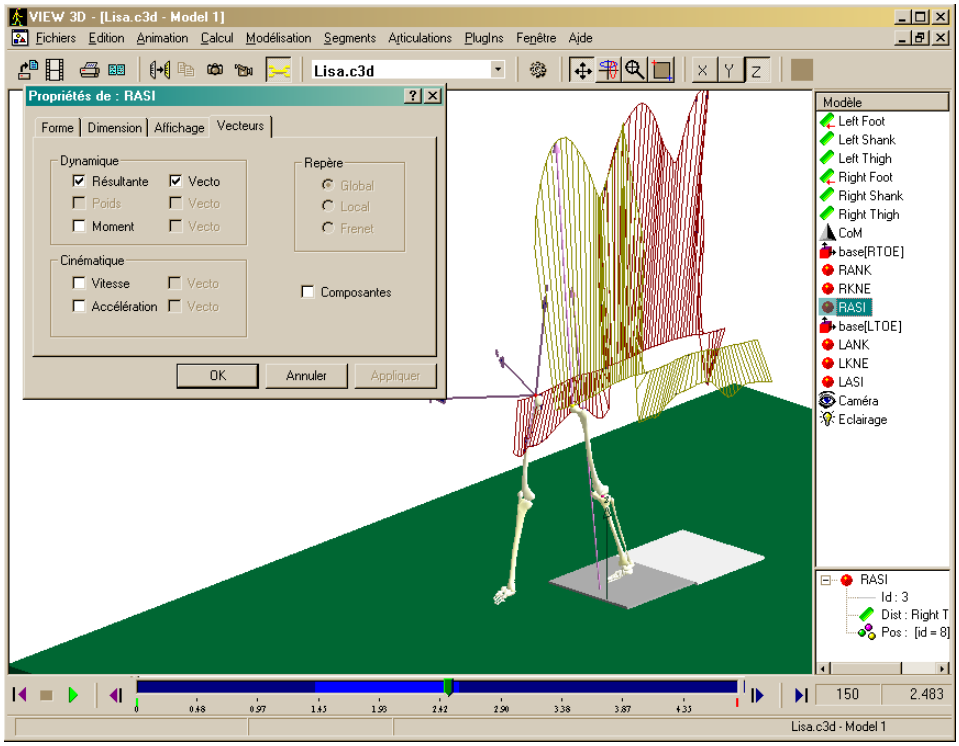


IV -2.3.Visualisation

La visualisation de l'analyse et du modèle s'effectue en 3D. Il est alors aisé de changer de point de vue (zoom, caméra mobile etc.). L'affichage des paramètres calculés s'effectue sous forme de graphiques et/ou de vecteurs associés aux modèles. Il est possible de synchroniser les images vidéos (sources du modèle) et les animations 3D des différents modèles calculés et ainsi de tout visualiser en même temps.



IV -2.4.Interface logicielle pour le médical

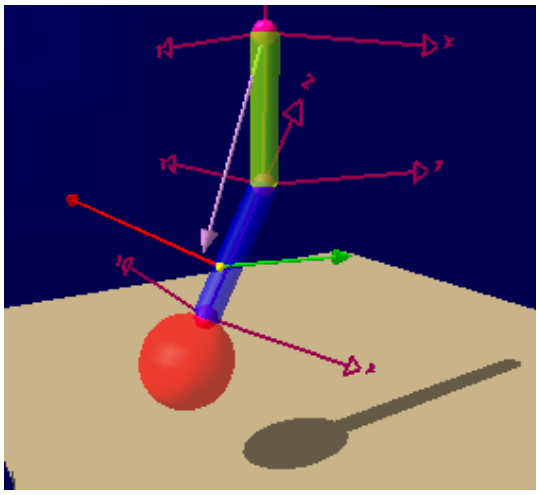


IV -3. MSM : Applications au domaine de la recherche

IV -3.1.Modélisation

M.SM. est un outil complet de modélisation et d'analyse du mouvement humain utilisable rapidement. Il permet de réaliser des modèles simples ou complexes en 2D et/ou 3D. Tous les paramètres cinématiques et cinétiques sont visualisables sous forme de graphes et de vecteurs. De nombreux modules additionnels peuvent être utilisés (support technique).

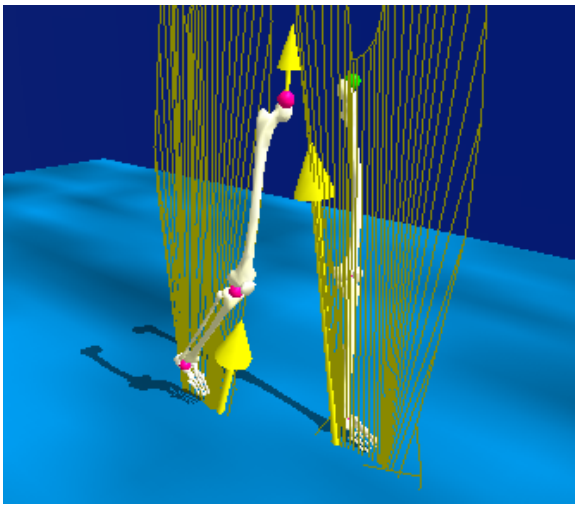
IV -3.2.Simulation



M.S.M. propose un couplage entre expérimentation, modélisation et simulation. La simulation est définie comme la possibilité de développer des "*expérimentations virtuelles*" sur un modèle numérique. A partir de la modélisation ***M.S.M.*** incorpore une simulateur générique. Cette simulation peut être pilotée et modifiée par le propre code de calcul du chercheur (***M.S.M***. est doté d'un langage de programmation intégré).

Deux moteurs de simulation sont proposés : un moteur de dynamique directe (**DD**), et un moteur de cinématique inverse (**IK**).

IV -3.3.Communication



M.S.M permet d'exporter tous les résultats des modélisations et simulations sous forme de fichiers texte, fichiers binaires (C3D) ou dans un format défini par le chercheur.

Grâce à son interface de programmation, toutes ces données peuvent être directement envoyées et utilisées dans des logiciels de calcul tel que *MatLab*, *SciLab*, *LabView* et tous les autres logiciels utilisant la technologie *DCOM*.

Les modèles et les simulations peuvent être diffusés au format *VRML* (réalité virtuelle).

V - Simulation de calibration d'un système vidéo en grand champ

Les systèmes vidéo présentent, par rapport aux systèmes de capture opto électronique, de pouvoir être utilisés en extérieur dans des environnements de grande taille. Néanmoins, cet avantage doit toujours être évalué en considérant que l'intervention de l'opérateur est beaucoup plus lourde et coûteuse puisqu'elle sera essentiellement manuelle et nécessitera un nombre d'heures de travail faramineux pour quelques secondes de capture.

Cependant, nous présentons ici les résultats obtenus, en termes de précision lors de la calibration simulée d'une portion de piste de ski.

V -1. Champ de mesure et structure de calibration

L'espace calibré est un champ de mesure de 20 mètres par 20 mètres (Figure 15) pouvant être assimilé à une piste de ski.

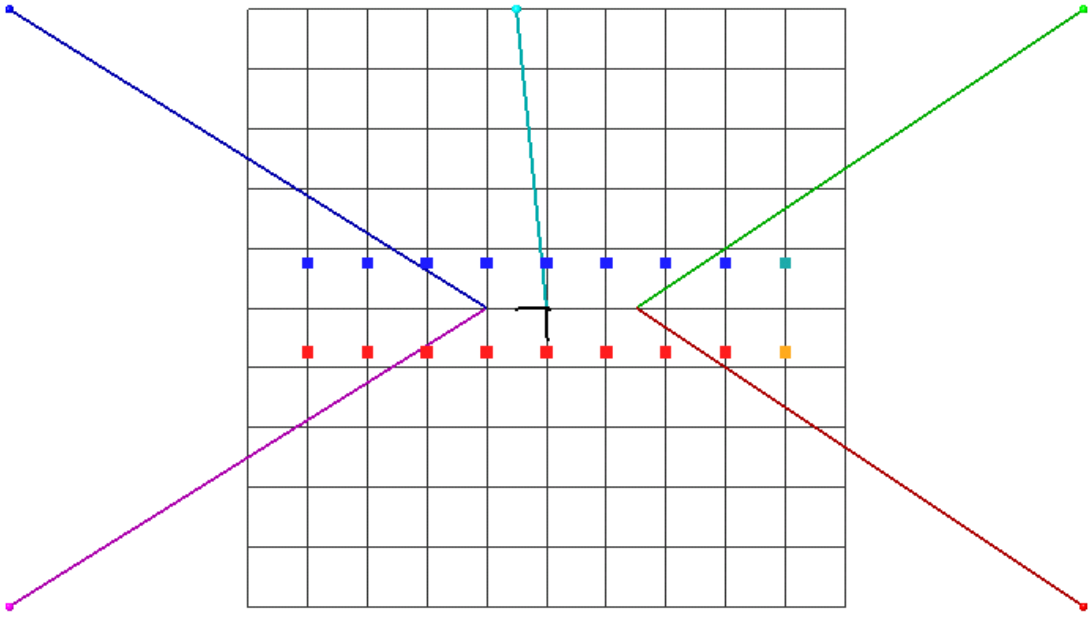


Figure 15 : Vue aérienne de l'espace de mesure pour la calibration simulée.

La structure de calibration utilisée est composée de 18 piquets de deux mètres disposés sur la piste. Pour une meilleure calibration, ces piquets doivent être espacés de façon équidistante. Deux points sont repérés sur chaque piquet. Un point en haut (sommet du

piquet) et un point en bas (pied du piquet). Le total du nombre de points de calibration est donc de 36.

La calibration a été effectuée sur des fichiers vidéo équivalent à la définition standard (768x512 pixels). Quatre caméras virtuelles ont été utilisées. Elle fournissent chacune une vue différente de la structure de calibration (Figure 16).

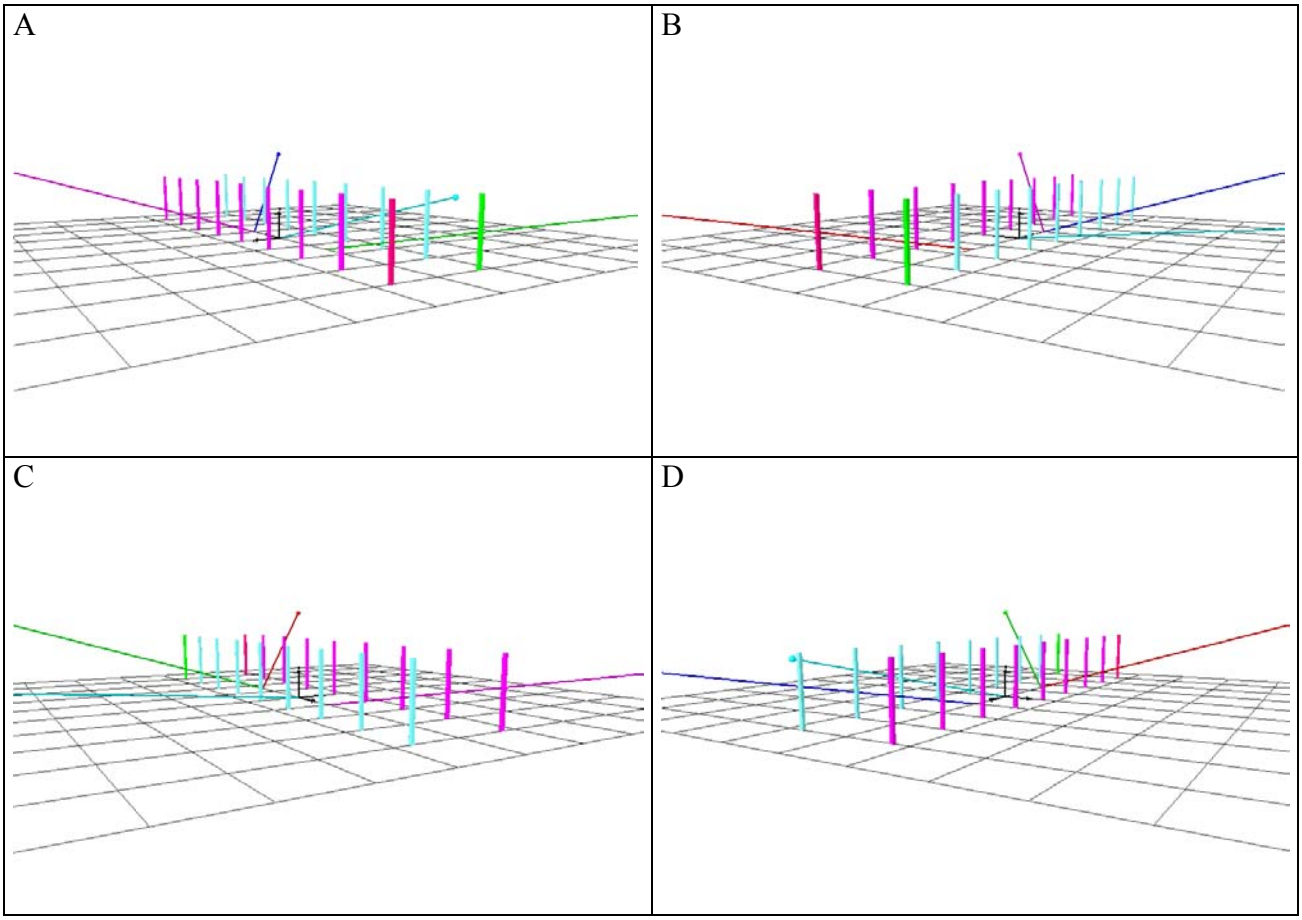


Figure 16 : Vue de la structure de calibration virtuelle fournie par chaque caméra (A-D).

V -2. Position des caméras

	Position			Centre de visée		
Caméra	PX(m)	PY(m)	PZ(m)	VX (m)	VY (m)	VZ (m)
1	-18.0	10.0	3.0	-3.0	0.0	0.0
2	-18.0	-10.0	3.0	-3.0	0.0	0.0
3	18.0	-10.0	3.0	2.0	0.0	0.0
4	18.0	10.0	3.0	2.0	0.0	0.0

Tableau 10 : Position et centre de visée des caméras.

L'origine du repère de calibration se situe au centre du champ de mesure avec l'axe Ox dans la direction de plus grande pente. Toutes les caméras possèdent une focale de 50 mm (en équivalent 35 mm) et leur position et centre de visée sont indiqués (Tableau 10).

V -3. Calibration 3D (méthode DLT)

La calibration est effectuée par la méthode DLT (Direct Linear Transform) avec 36 points de contrôle (18 piquets x 2 points). L'espace inter piquet est de 2 mètres (sur l'axe Ox) et 3 mètres (sur l'axe Oy). La hauteur des piquets est de 2 mètres.

V -4. Erreur de reconstruction 3D

La Figure 17 présente l'erreur de reconstruction pour chaque point de contrôle de la structure de calibration. Cette erreur moyenne est 5.1 (± 0.2) millimètres.

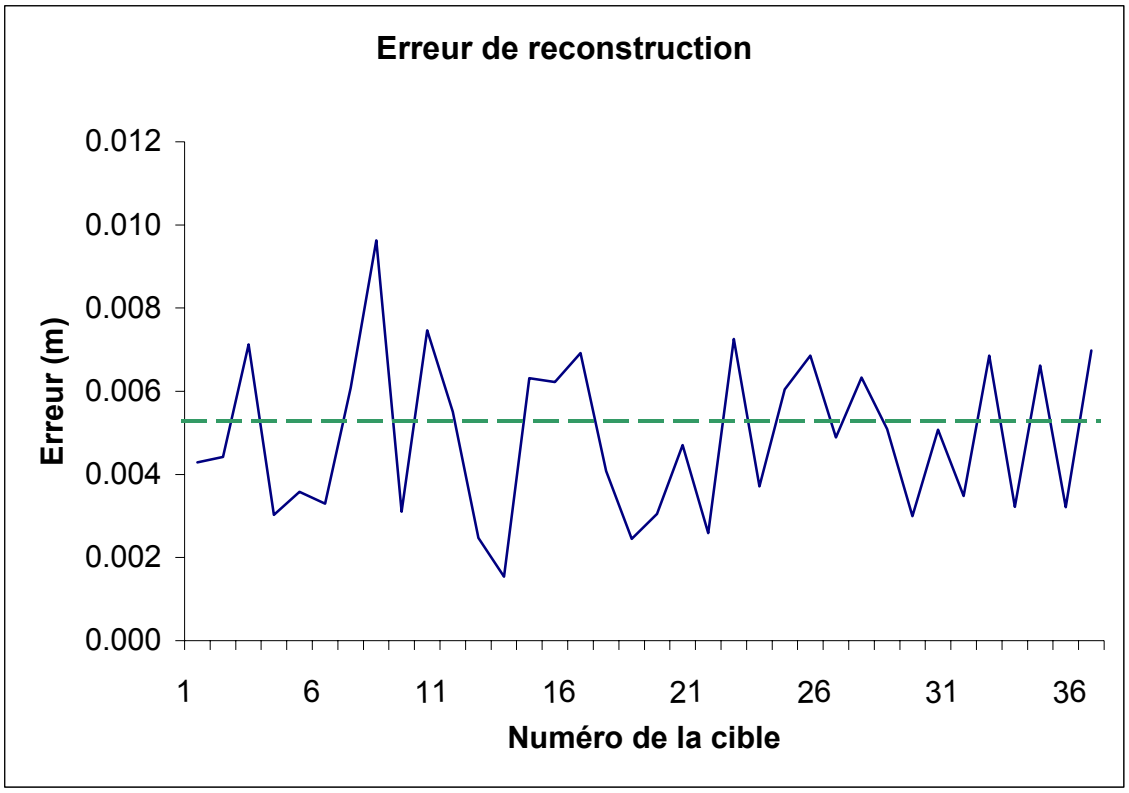


Figure 17 : Erreur de reconstruction pour chacun des points de contrôle utilisés.

V -5. Différence mouvement réel / mouvement calculé

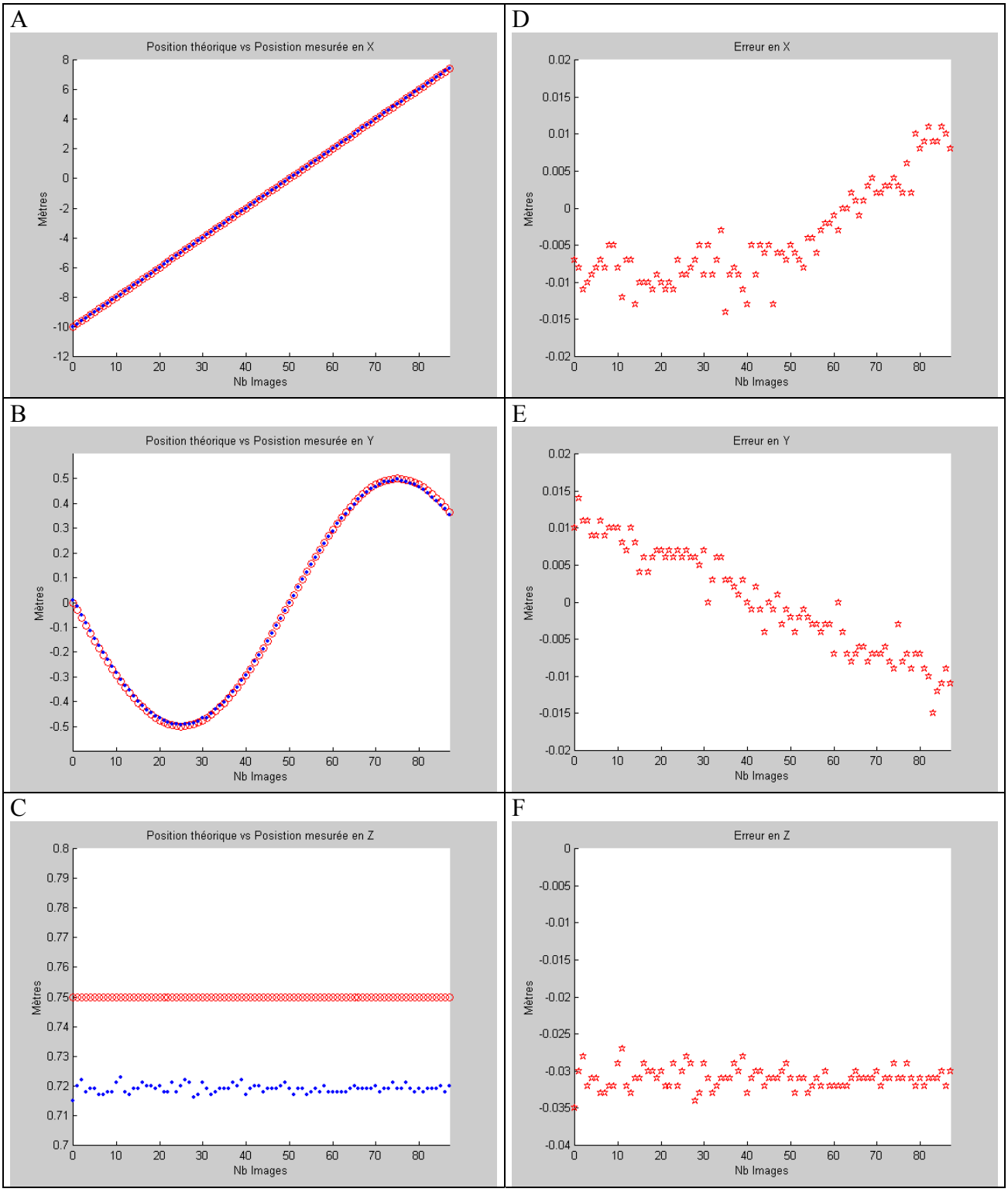


Tableau 11 : A-C : Décours temporels des positions X, Y et Z théoriques (o) et mesurées (.). D-F : Décours temporel de l'erreur de calcul des positions en X, Y et Z.

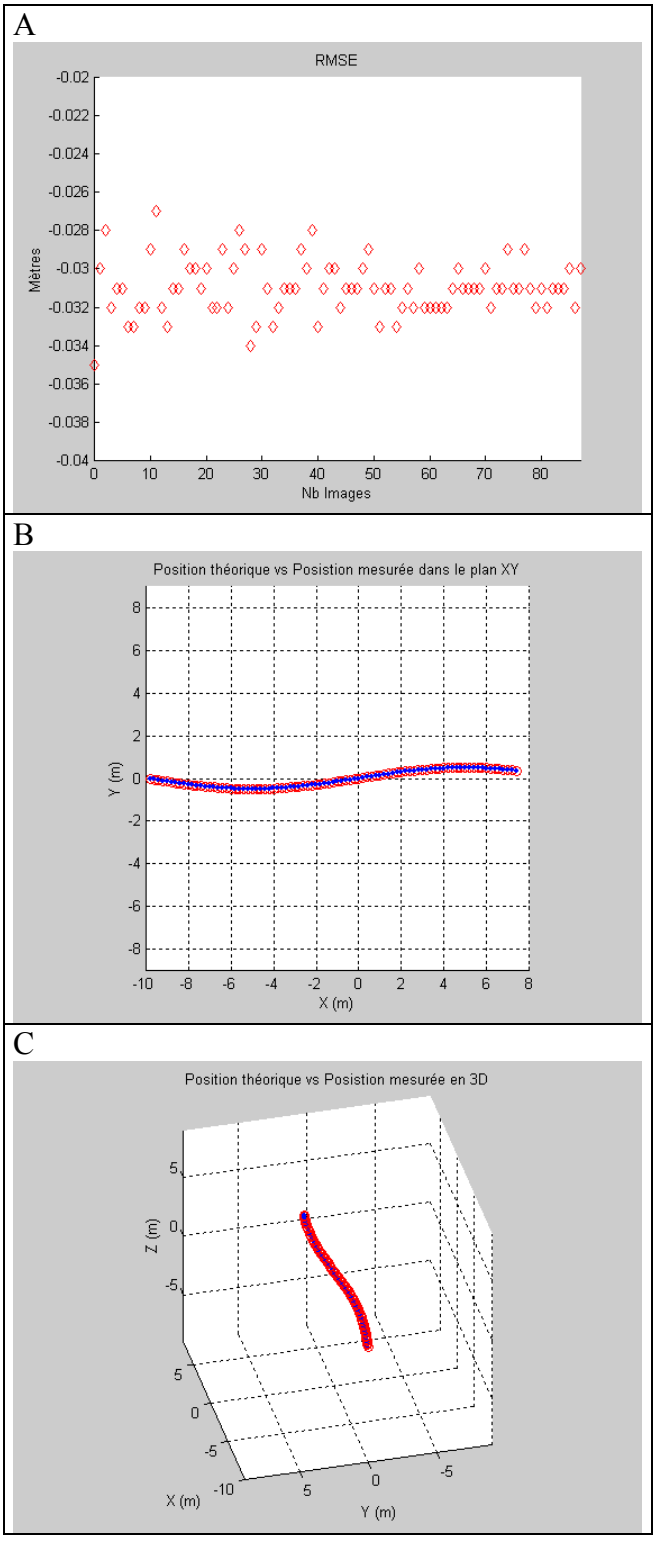


Tableau 12 : Décours temporel de l'erreur quadratique moyenne (A) et trajectoires théoriques (o) et calculées (.) dans le plan XY (B) et dans l'espace 3D (C).

Le Tableau 11 et le Tableau 12 présentent les résultats obtenus pour le calcul de la position d'un mobile (par exemple un skieur) se déplaçant dans l'espace calibré. On obtient une bonne précision des calculs avec une erreur quadratique moyenne de l'ordre de 3 centimètres c'est à dire que l'erreur représente environ 0.15 % de la longueur de l'espace calibré.

VI - Sites Internet des fabricants ou distributeurs de systèmes

http://www.atopos.net/

http://www.biometrics.fr/

http://www.bts.it/

http://www.kihopsys.com/

http://www.motionanalysis.com/

http://www.peakperform.com/

http://www.qualisys.se/

http://www.sportscience.org/

http://www.vicon.com/

VII - Conclusion

Ce travail a eu pour objectif d'examiner les performances des principaux systèmes commerciaux d'analyse du mouvement utilisant les images. Il a pris en compte deux types de critères : ceux relatifs à la précision et la reproductibilité de la mesure et ceux relatifs à l'ergonomie c'est à dire à la facilité et la durée de mise en œuvre, de recueil, de reconstruction 3D et de post traitement des données.

Les parties I et II ont permis de montrer que seuls quelques systèmes obtiennent d'excellentes performances pour tous les types de tests. Parmi eux, les systèmes Vicon se distinguent par l'obtention d'excellentes performances conjointement à une ergonomie de tout premier plan (partie III). Il sont très certainement parmi les systèmes les plus complets actuellement sur le marché et les plus économiques si l'on tient compte des coûts à l'achat et des coûts d'exploitation (incluant la masse salariale des opérateurs). Alliés à des outils de traitement performants (de type M.S.M.), ils sont les plus rentables dans une perspective de d'accompagnement scientifique à la performance avec retour (rapport d'analyse) quasi immédiat vers les athlètes et leurs entraîneurs (partie IV). Ce type d'approche, de type testing, peut naturellement être partie prenante d'un travail d'entraînement régulier en vue de corrections "on line" de son mouvement par l'athlète. Bien que certaines tentatives aient été faites en extérieur, ce type de systèmes est particulièrement recommandé pour tous les sports de salle.

Si toutefois, on s'intéresse à des sports d'extérieur, particulièrement en situation de compétition, il faut recourir à des solutions à base de vidéo classique (partie V). Ces solutions, si elles sont tout à fait intéressantes du point de vue de la précision de la mesure, s'accompagnent d'interventions extrêmement lourdes pour les opérateurs et rendent illusoire la possibilité d'un retour rapide et peu onéreux vers les athlètes à moins d'un énorme travail en amont. A l'heure actuelle, ce travail reste à faire pour passer ces outils vidéo d'un usage exceptionnel dans le cadre de la recherche à un usage de routine dans le cadre de l'entraînement avec retour direct vers l'athlète ou son entraîneur.

VIII -Bibliographie

Dabnichki, P., Aritan, S., Lauder, M., & Tsirakos, D. (1996). Accuracy of kinematic data collection, filtering and numerical differentiation. The engineering of sport, haake 119-123.

Ehara Y, H. Fujimoto, S Miyazaki, S Tanaka, S Yamamoto (1995). "Comparison of the performance of 3D camera systems." Gait and Posture 3(September):166-169.

Ehara Y, H. Fujimoto, S Miyazaki, M Mochimaru, S Tanaka, S Yamamoto (1997)."Comparison of the performance of 3D camera systems II." Gait and Posture 5: 251-255.

Ferrigno, G. & Pedotti, A. (1985). ELITE: A digital dedicated hardware system for movement analysis via real-time TV signal processing. Ieee Transactions on Biomedical Engineering, Bme 32,11, 943-949.

Gruen, A. (1997). Fundamentals of videogrammetry - A review. Human Movement Science, 16, 155-187.

Lauder, M. A., Dabnichki, P., Bartlett, R. M., & Aritan, S. (1996). The accuracy of kinematic data collected from underwater three-dimensional analysis. The engineering of sport, haake 303-312.

Laways, L. W., Conlan, T. M., & Miles, J. A. (1996). Static and dynamic accuracy determination of a three-dimensional motion analysis system. The engineering of sport, haake 289-296.

Richards, J.G. (1999). The mesasurement of human motion: A comparison of commercially available systems. Hum.Mov.Sci, 18, 589-602.

Sandstrom, G., Backstrom, A., & Olsson, K. A. (1996). REMAC: A video-based motion analyser interfacing to an existing flexible sampling system. J.Neurosci.Methods, 69, 205-211.

Résumé

Ce travail a eu pour objectif d'examiner les performances des principaux systèmes commerciaux d'analyse du mouvement utilisant les images. Il a pris en compte deux types de critères : ceux relatifs à la précision et la reproductibilité de la mesure et ceux relatifs à l'ergonomie c'est à dire à la facilité et la durée de mise en œuvre, de recueil, de reconstruction 3D et de post traitement des données.

Les parties I et II ont permis de montrer que seuls quelques systèmes obtiennent d'excellentes performances pour tous les types de tests. Parmi eux, les systèmes Vicon se distinguent par l'obtention d'excellentes performances conjointement à une ergonomie de tout premier plan (partie III). Ils sont très certainement parmi les systèmes les plus complets actuellement sur le marché et les plus économiques si l'on tient compte des coûts à l'achat et des coûts d'exploitation (incluant la masse salariale des opérateurs). Alliés à des outils de traitement performants (de type M.S.M.), ils sont les plus rentables dans une perspective de d'accompagnement scientifique à la performance avec retour (rapport d'analyse) quasi immédiat vers les athlètes et leurs entraîneurs (partie IV). Ce type d'approche, de type testing, peut naturellement être partie prenante d'un travail d'entraînement régulier en vue de corrections "on line" de son mouvement par l'athlète. Bien que certaines tentatives aient été faites en extérieur, ce type de systèmes est particulièrement recommandé pour tous les sports de salle.

Si toutefois, on s'intéresse à des sports d'extérieur, particulièrement en situation de compétition, il faut recourir à des solutions à base de vidéo classique (partie V). Ces solutions, si elles sont tout à fait intéressantes du point de vue de la précision de la mesure, s'accompagnent d'interventions extrêmement lourdes pour les opérateurs et rendent illusoire la possibilité d'un retour rapide et peu onéreux vers les athlètes à moins d'un énorme travail en amont. A l'heure actuelle, ce travail reste à faire pour passer ces outils vidéo d'un usage exceptionnel dans le cadre de la recherche à un usage de routine dans le cadre de l'entraînement avec retour direct vers l'athlète ou son entraîneur.