

*Human movement analysis by the use of automated  
close-range videogrammetry*

A. COBLENTZ ; R. MOLLARD

Laboratoire d'Anthropologie Appliquée

45, rue des Saints-Pères - 75270 PARIS CEDEX 06 - France

Commission V

---

Summary

The purpose of this research is to clarify the motion characteristics of upper extremity reach movements for seated operators. A three dimensional television system (VICON, Oxford Metrics) was adapted to collect in real-time trajectories of anatomical landmarks stucked on the torso, arm and forearm. Data acquisition was performed on a sample of 25 right-hand young males for different reach activities. Three synchronised video cameras with infrared stroboscopes were used for data capture at 50 Hertz. New landmarks were designed for this study, the best choice was high reflective and light weight cones with a height and a base of 10mm. Calibration procedures were set up according to VICON recommendations. For a field-of-view of 1.5 m., accuracy was  $\pm 1.5$  mm for measurement on a mechanical substitute of the arm, and  $\pm 3$  mm for acquisition on the living human body, this lack of accuracy is the result of skin deformability. For a movement, data capture, data reduction, trajectory identification and 3-D trajectory computation were achieved in 10 to 15 minutes. Stick figures and trajectories were used to verify experimental data. Then the 3-D trajectories were transformed in angular variations after a choice of a multijoint kinematical model for the upper arm and forearm. Gestures were expressed in terms of angular variations relative to motion time and percentage of distance to reach.

After an analysis of intra and interindividual variabilities of joints displacements, typical curves were identified for a set of four reach movements in a vertical plane. These results are now used for the representation of realistic gestures of 3-D human body models in Computer Aided Design studies.

1 - INTRODUCTION -

L'analyse biostéréométrique (3-D) du mouvement a été abordée dans ce travail pour des explorations portant sur des actions simples d'atteintes du membre supérieur pour des sujets assis. Ce choix a été effectué pour plusieurs raisons. En premier lieu, il s'agissait de vérifier la validité de l'analyseur 3-D de mouvement VICON. Pour cette validation, il nous a semblé préférable de retenir des actions bien standardisées, répétitives, et ne nécessitant pas d'apprentissage pour les sujets. Par ailleurs, les recherches bibliographiques sur le thème de la coordination motrice font apparaître qu'il n'existe que très peu d'informations concernant la description et la quantification 3-D des mouvements au niveau du membre supérieur. La plupart des recherches menées en physiologie sur ce thème portent sur des analyses de mouvements mettant en jeu une seule articulation et à un seul degré de liberté (H. FREUND et coll., 1978 ; J. COOKE, 1979) et il s'agit le plus souvent de la flexion-extension de l'avant-bras par rapport au bras. Les analyses portant sur des mouvements à plusieurs degrés de liberté n'ont en général été abordées que dans des condi-

tions très restrictives pour des actions bi-dimensionnelles dans un plan transversal horizontal (P. MORASSO, 1981 ; W. ABEND et coll., 1982 ; J. HOLLERBACK et coll., 1982 ; T. KAMINSKI et coll., 1986) ou sagittal vertical (W. WADMAN et coll., 1979 ; J. SOECHTING et coll., 1981 ; F. LACQUANITI et coll., 1982). Les études 3-D dans ce domaine sont en général orientées vers des applications de biomécanique (M. ZELLER, 1953 ; Z. DVIR et coll., 1978 ; E. CHAO, 1980 ; W. NELSON, 1983) ou d'ergonomie (M. AYOUB et coll., 1976 ; N. MIYASHIRO, 1982). Il ressort de ces travaux que des couplages angulaires existent entre les mouvements articulaires, essentiellement entre l'épaule et le coude. Les trajectoires de la main pour des actions dans le plan sont de type linéaire (P. MORASSO, 1981) avec des mises en mouvement décalées au niveau des rotations de l'épaule et du coude, l'élément anatomique ayant à effectuer les déplacements les plus importants serait mobilisé en premier et ceci de manière indépendante des positions initiales et finales de la main. Le synchronisme des déplacements articulaires ne serait observé que pour des amplitudes de rotation équivalentes du bras et de l'avant-bras. Cette caractéristique de trajectoire quasi-linéaire de la main ne semble toutefois pas se retrouver dans des actions réelles d'atteintes de commandes (N. MIYASHIRO, 1982). Compte tenu de ces résultats, il nous a paru intéressant d'entreprendre une étude 3-D pour des actions typiques d'atteintes du membre supérieur, de manière à contribuer à l'identification des lois générales qui gouvernent l'évolution spatio-temporelle des mouvements. Enfin, cette connaissance des caractéristiques des actions d'atteintes des membres supérieurs, pour des opérateurs assis, va trouver des applications immédiates dans les analyses ergonomiques de poste d'activité par méthode CAO pour des restitutions de mouvements réalistes de modèles 3-D d'opérateurs (A. COBLENTZ et coll., 1985).

## 2 - METHODE D'ETUDE -

### 2.1 - Echantillon expérimental -

Pour effectuer cette analyse 3-D de gestuelle nous avons sélectionné un échantillon de 25 sujets droitiers, d'âge compris entre 19 et 30 ans. La répartition des sujets pour la longueur du membre supérieur est comprise entre le 3ème et le 95ème percentile de la population générale française extraite de la Banque de Données de ERGODATA (A. COBLENTZ et coll., 1986).

### 2.2 - Dispositif d'acquisition -

Il s'agit du système automatisé de vidéogrammétrie VICON (Oxford Metrics), dont le fonctionnement a été décrit au cours de travaux antérieurs (A. COBLENTZ et coll., 1984 ; R. MOLLARD et coll., 1985). Ce dispositif permet une obtention rapide d'informations stéréométriques à partir d'une saisie à 50 Hertz de mires par l'intermédiaire de trois caméras vidéo synchrones, équipées d'un éclairage stroboscopique à infrarouge. Il convient de souligner que ce type d'éclairage ne modifie pas le comportement du sujet, ce qui est essentiel pour les études de mouvement.

Après identification des mires, les reconstructions tridimensionnelles des trajectoires s'effectuent de manière automatique suivant les principes de la stéréophotogrammétrie analytique (méthode de "Direct Linear Transformation" décrite par Y. ABDEL AZIZ et coll. 1971). La résolution de cet appareil, compte tenu du nombre de lignes balayées par le système TV, est de  $\pm 0,1\%$  du champ de mesure. Pour un champ de prises de vues de 2 m on obtient une précision théorique de  $\pm 2$  mm. Les investigations préliminaires avec ce moyen de mesure ont conduit aux résultats suivants :

- temps de calibration : 1 heure, acquisition et restitution d'un mouvement : 10 minutes,
- précision :  $\pm 2$  à  $\pm 4,4$  mm pour des mires standards placées sur des repères anatomiques, avec une distance caméra-sujet de 2,5 m et inter-caméra de 1,4 m (A. COBLENTZ et coll., 1984). La relative imprécision des mesures est en partie le résultat des déformations de la peau au cours des mouvements.

Afin d'améliorer la qualité des informations 3-D, une nouvelle procédure de saisie a été retenue. Pour cette étude elle a consisté essentiellement en une diminution de la distance caméras-sujet, et une réduction de la dimension des mires, ce qui est rendu possible grâce au rapprochement des caméras.

Le résultat des essais réalisés dans ces conditions s'est traduit par : le choix d'une distance caméras-sujet comprise entre 1,5 et 1,8 m, une distance entre les caméras de 0,60 m à 0,80 m, l'utilisation de mires réduites à des cônes de 1 cm de hauteur et de 1 cm de diamètre à la base, et une inclinaison des caméras de 20 à 30 degrés de manière à conserver une bonne définition des mires. La réalisation d'un siège orientable permettant de restituer des postures variées, ainsi que des dispositifs de sanglage du sujet et des supports de commande rigides se sont également avérés nécessaires pour l'étude des mouvements (figure n°1).

L'évaluation de la validité de la méthode de mesure a été effectuée en plusieurs étapes pour la précision de la mesure 3-D sur les mires, et pour celle des angles calculés à partir des coordonnées des mires placées sur les différents chaînons articulaires : bras, et avant-bras. Une première vérification a été réalisée en utilisant le dispositif de calibration du système VICON. Huit mires réfléchissantes réparties sur quatre fils à plomb ont été restituées, avec la disposition de caméras retenues pour les études de gestuelle. Les distances entre les fils à plomb étaient de 500 mm et les écarts d'altitude entre les mires de 400 mm. On dispose ainsi d'une mesure directe et précise des distances et des angles. Trois des huit mires ont été employées pour le calcul des distances AB et BC, représentant un bras et un avant-bras, et des quatre angles  $\theta_1$  à  $\theta_4$ . On aboutit à des écarts de  $\pm 1,5$  mm pour les distances et de  $\pm 1,2^\circ$  pour les angles. La seconde série d'essais a été réalisée avec un dispositif mécanique représentant le bras et l'avant-bras. Dans ce cas, les mires sont situées directement sur les centres de rotation, les segments sont rigides et de longueurs fixes. Les écarts enregistrés sont du même ordre de grandeur que précédemment. Les vérifications sur le vivant conduisent par contre à des écarts supérieurs, de l'ordre de  $\pm 3$  mm, en raison des déformations de la peau.

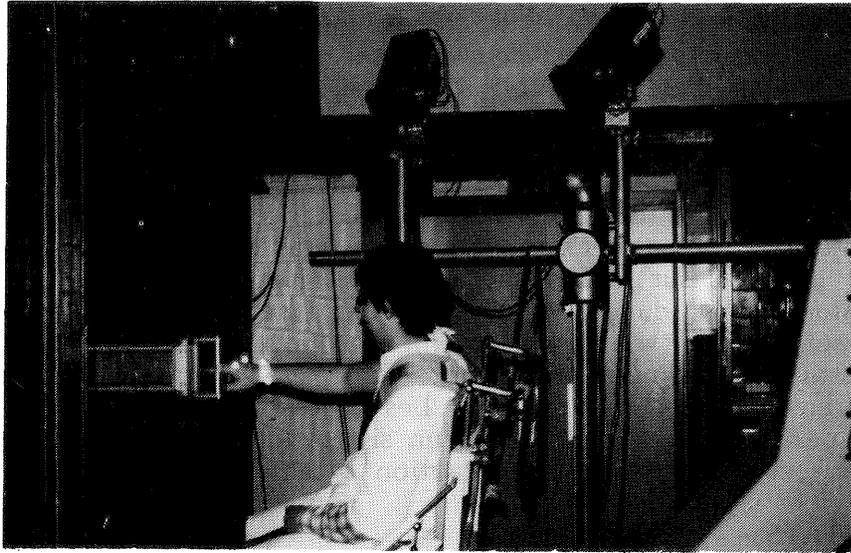
### 2.3 - Choix d'un modèle d'étude -

A la suite de cette étape, nous avons retenu un modèle à chaînons articulés permettant de décrire la cinématique du membre supérieur pour le bras et l'avant-bras. Cette représentation repose sur les hypothèses suivantes :

- les centres de rotations internes sont uniques et leurs déplacements sont du même type que ceux des mires externes placées à proximité immédiate,
- les distances inter-articulaires sont fixes,
- les mobilités de la main ne sont pas prises en compte.

Il est bien certain que ces hypothèses ne constituent qu'une approximation par rapport à la réalité anatomique. Mais notre objectif ne consiste pas à aboutir à une description de la cinématique réelle du membre supérieur dont on sait qu'elle met en jeu des mécanismes articulaires complexes. Il s'agit plutôt de définir le nombre de paramètres cinématiques minimal permettant une représentation simplifiée du mouvement compatible avec les précisions habituelles de localisation du geste.

Cibles :  
bouton poussoir  
ou poignée  
équipée  
de capteurs  
de force.



siège et  
support  
réglable

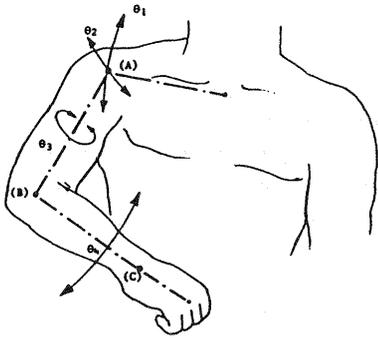
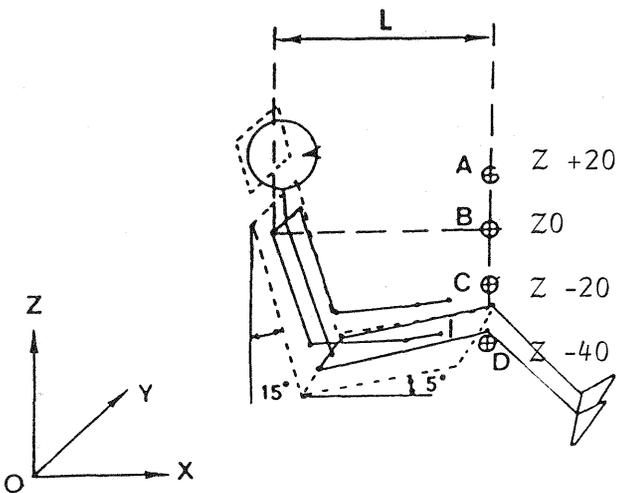
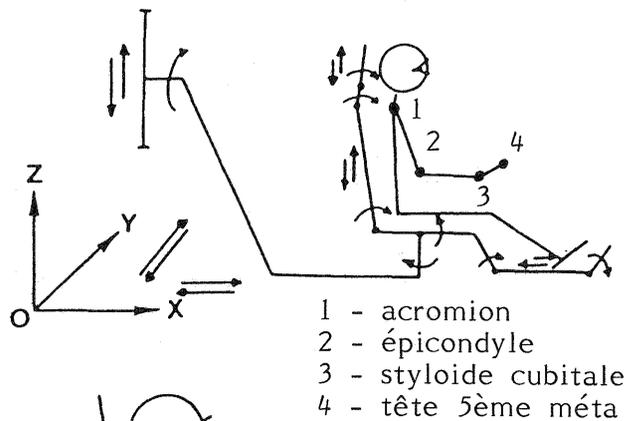


Schéma de principe du siège orientable  
Vue de profil.



Exemple de posture de référence et zones d'implantations théoriques. L = distance ajustable en fonction de la morphologie du sujet, pour que l'angle bras - avant-bras soit de 135°.

Figure n° 1

Dispositif expérimental mis en place pour permettre l'enregistrement de mouvements variés pour des opérateurs assis.

## 2.4 - Protocole -

Les mouvements retenus correspondaient à des actions d'atteintes de commandes de type bouton-poussoir, caractéristiques d'actions de pointé, ne nécessitant pas d'effort notable sur la cible à atteindre. Quatre mires ont été placées aux niveaux de points anatomiques sur le membre supérieur droit de chacun des sujets (cf. figure n°1). Les points A, B, C, et D représentaient les commandes à atteindre. Le point B se trouvait à la même cote d'altitude Z que la mire 1 (épaule droite) et à une distance X correspondant à un angle d'ouverture de l'avant-bras par rapport au bras de 135°. Les cibles A, B, C, et D étaient disposés sur une même verticale, dans un plan sagittal passant par l'acromion droit du sujet. Cette configuration expérimentale a permis d'analyser quatre types de mouvements d'atteintes. Pour chaque orientation cinq essais d'entraînement étaient réalisés avant la phase d'acquisition qui portait ensuite sur 3 mouvements. Les ordres de début de mouvement étaient donnés par la mise sous tension d'un signal lumineux et le mouvement n'était considéré comme correct qu'à l'action effective sur le bouton poussoir.

## 3 - RESULTATS -

La représentation des mouvements sous forme de trajectoires pour les mires situées à proximité des différents centres de rotation articulaires impliqués dans le mouvement, fait apparaître une bonne reproductibilité dans le déroulement du geste aussi bien pour les phases aller que retour. L'atteinte à niveau Z0, se traduit par de faibles déplacements au niveau de l'épaule (mire n°1) et les trajectoires des mires 2 (coude), 3 (poignet) et 4 (main) sont caractérisées par des formes curvilignes (figure n°3). Ceci se retrouve pour tous les sujets, quel que soit l'orientation du mouvement. Dans tous les cas on constate une différence très nette entre les déplacements de la phase d'atteinte et ceux de retour à la position de départ. Les trajectoires de la main dans l'espace ne sont jamais linéaires, ce qui avait déjà été observé de manière ponctuelle par d'autres auteurs (M. AYOUB et coll., 1976 et N. MIYASHIRO, 1982). Ces constatations sont par contre en contradiction avec les résultats obtenus par des analyses portant sur des mouvements du membre supérieur réalisés dans un plan, (P. MORASSO, 1981 ; T. KAMINSKI et coll., 1986). Il est probable que l'aspect linéaire des déplacements de la main, mis en évidence dans ces travaux résulte de la contrainte expérimentale retenue par les auteurs. En limitant les déplacements de l'épaule au seul mouvement d'antépulsion on aboutit, en fait, à un geste non naturel puisque la trajectoire de la main ne peut s'effectuer que dans le plan. Pour nos essais qui portent sur des mouvements naturels sans contrainte de ce type, les déplacements de la main, assimilés à ceux de la mire n°4, sont toujours caractérisés par une trajectoire courbe traduisant un mouvement concomitant d'élévation et de déplacement de la main vers l'avant. Cette élévation peut traduire la nécessité de vaincre l'action gravitaire pour accomplir le mouvement souhaité d'atteinte de la cible. La variabilité intra-individuelle a été évaluée par superposition des trajectoires des différentes mires pour chaque orientation d'atteinte : Z0, Z+20, Z-20, Z-40. La répétitivité des déplacements reste très bonne, avec une augmentation de la variabilité des trajectoires de la partie proximale (épaule) vers la partie distale (main). Les écarts pour les différents points sont les suivants :

- épaule (acromion) :  $\pm 0,7$  cm
- coude (épicondyle) :  $\pm 0,9$  cm
- poignet (styloïde cubitale) :  $\pm 1,6$  cm
- main (tête 3ème méta) :  $\pm 1,8$  cm

Cette répétitivité paraît être affectée par l'éloignement de la commande à atteindre. Les atteintes à Z-20 et Z-40 présentent les plus grandes variabilités.

Nous avons également étudié la variabilité temporelle dans la réalisation de chacune des atteintes. Pour cela nous avons calculé les 4 angles intersegmentaires permettant de caractériser la position du poignet à tout instant au cours du mouvement. Ce mode de représentation a permis de dégager deux types de schémas d'action dans le déroulement du geste. Pour un tiers des sujets on constate une bonne homogénéité des variations spatio-temporelles pour les 4 angles alors que pour les autres sujets, on observe des différences dans le déroulement temporel du mouvement. Cette forte variabilité dans la durée d'exécution du mouvement n'affecte toutefois que la phase de retour.

D'une manière générale, la durée du mouvement est comprise entre 580 et 640 millisecondes pour la partie aller de l'atteinte, avec une phase de latence, sans déplacement segmentaire, de 150 à 180 millisecondes. Pour la seconde partie du mouvement, la durée du déplacement segmentaire est approximativement augmentée de 10%. L'aspect curviligne des déplacements de la main a été évalué en calculant pour chaque sujet et chaque mouvement le rapport entre la distance réellement parcourue par la main (trajectoire 3-D entre la position de départ et la position d'atteinte), et la distance linéaire 3-D entre ces deux positions. On aboutit aux résultats suivants :

- niveaux Z+20 et Z0 : 1,10 à 1,15,
- niveaux Z-20 et Z-40 : 1,04 à 1,10.

Ces valeurs présentent une très faible variabilité inter-individuelle et semblent constituer une caractéristique typologique du mouvement. Pour les phases de retour à la position initiale on obtient des valeurs légèrement supérieures :

- niveaux Z+20 et Z0 : 1,15 à 1,20,
- niveaux Z-20 et Z-40 : 1,05 à 1,13.

Ceci confirme les écarts observés sur les trajectoires entre les phases aller et retour.

Afin de comparer les variations spatiales des mouvements entre les sujets, un nouveau mode de représentation a été adopté. On retient comme point cible, les coordonnées X,Y,Z du point C (poignet) au moment de l'action sur la commande. La distance entre le point C à cet instant par rapport au début de l'action donne la valeur unitaire U du déplacement. Chaque valeur angulaire est ensuite exprimée en fonction du rapport (U.normé) entre la distance à parcourir et la distance unitaire. Pour la phase d'atteinte, ce rapport est affecté d'un signe négatif, ce qui fait qu'il évolue de -1, position de début, à 0 en phase terminale d'atteinte, puis à +1 en position de fin de geste. Cette manière de procéder permet d'étudier les variations angulaires interindividuelles sans tenir compte de la vitesse d'exécution du mouvement. Pour chaque type d'atteinte on a ainsi pu dégager les caractéristiques générales du geste. Il existe une typologie assez marquée des courbes (figure n°3), pour les niveaux équivalents (angles  $\theta_2$  et  $\theta_4$ ), ou pour des niveaux différents (angles  $\theta_1$  et  $\theta_3$ ). Plusieurs tentatives de regroupement, en tenant compte de caractéristiques morphologiques, ont été réalisées, notamment en fonction des longueurs du membre supérieur, du bras, de l'avant-bras ou encore du rapport entre les longueurs du bras et de l'avant-bras. Cela n'a pas permis d'effectuer une différenciation entre les sujets. Les courbes ont cependant pu être regroupées en fonction de leurs caractéristiques géométriques par des polynômes du 3ème degré pour  $\theta_1$  et  $\theta_3$  et du 2ème degré pour  $\theta_2$  et  $\theta_4$ .

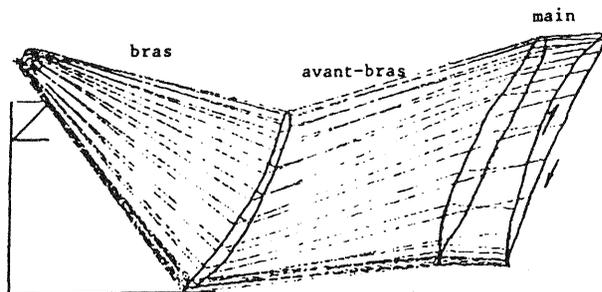


Figure n°2

Exemple de restitution d'une action de pointé à Z +20

Variation de l'Angle  $\theta_2$

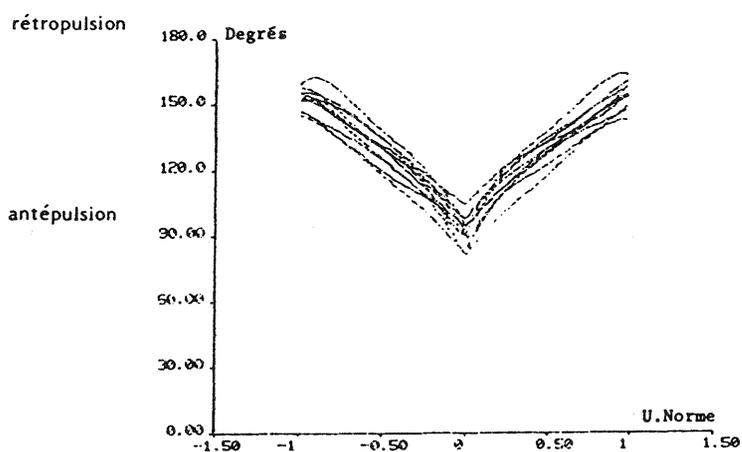


Figure n°3

Variations angulaires pour une action à Z +20

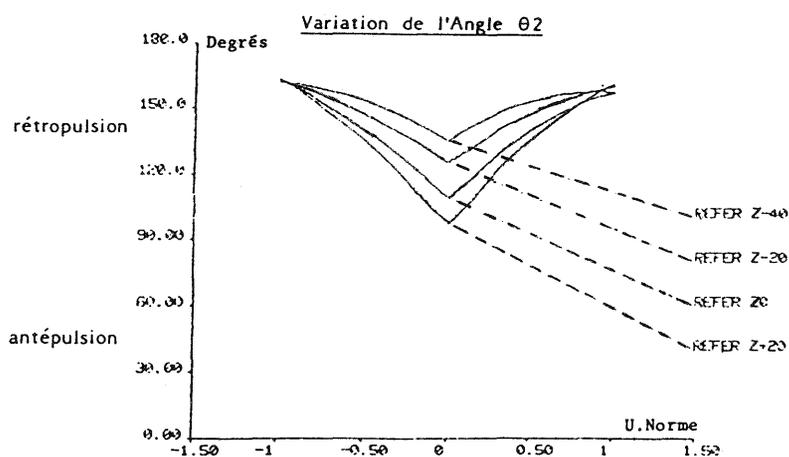


Figure n°4

Modification des caractéristiques de l'angle  $\theta_2$  (antépulsion de l'épaule) en fonction de la hauteur de la commande à atteindre.

L'influence de la localisation de la commande a également été étudiée. Seul l'angle  $\theta_2$  paraît modifié en fonction de l'altitude de l'atteinte. On observe une augmentation de la pente de la courbe proportionnelle à la variation d'altitude, Z-40 à Z+20 (figure n°4). Les courbes typiques ont ensuite été utilisées pour déterminer à nouveau les trajectoires de points anatomiques de sujets ayant participé aux expérimentations. La comparaison des trajectoires théoriques aux trajectoires acquises par le système de mesure VICON a été réalisée pour des étapes caractéristiques du geste. Quelques résultats concernant les écarts obtenus pour la détermination du point C (poignet) en phase terminale de pointé sont reportés dans le tableau 1. Les écarts observés soulignent la nécessité d'apporter plus de précision sur le modèle utilisé. Pour cela il faut intégrer des facteurs de corrections entre la position des mires externes, et les centres d'articulations internes des éléments anatomiques ainsi que des angles complémentaires de manière à prendre en compte les déplacements de l'épaule par rapport au thorax et les mouvements de la main.

Ecarts(cm.)	X	Y	Z
Mini.	0,6	0,3	0,9
Maxi.	2,4	2,3	2,7

Tableau 1

Ecarts obtenus entre la position calculée du point C (poignet) à partir des courbes moyennes des variations angulaires et la position mesurée expérimentalement en phase terminale du mouvement de pointé.

Condition d'essai : posture préférentielle, atteinte d'une commande située à 20 cm au dessus de l'épaule.

#### 4 - DISCUSSION- CONCLUSION -

L'obtention rapide de mesures 3-D précises ne constitue plus un obstacle avec les moyens actuels que sont les analyseurs 3-D de mouvement comme celui que nous avons utilisé. En fait l'emploi du terme analyseur est un peu abusif. Ces outils n'apportent que des séries de coordonnées 3-D référencées par rapport au temps. Les trajectoires que l'on peut reconstruire permettent une restitution visuelle intéressante, mais limitée à quelques vérifications et interprétations élémentaires. La plus grande partie des traitements reste donc à élaborer par l'expérimentateur en fonction des objectifs qu'il s'est fixé. C'est ce que nous avons été conduit à réaliser au cours de cette recherche, après avoir vérifié les capacités de mesures 3-D de l'analyseur que nous avons utilisé.

Les différentes investigations portant sur des actions d'atteintes élémentaires ont permis de confirmer les couplages angulaires entre l'épaule et le coude évoqués par de nombreux auteurs à la suite d'expérimentations sur des mouvements plans. Par contre pour des mouvements que nous avons étudiés, les déplacements de la main ne sont jamais linéaires. Ceci peut s'expliquer par la nécessité de vaincre l'action gravitaire simultanément au déplacement vers la cible à atteindre.

Il ressort de ces expérimentations sur la gestuelle du membre supérieur que des éléments invariants existent au niveau des déplacements segmentaires. Les typologies mise en évidence ne portent toutefois pas sur le décours temporel de l'action, les variabilités intra et interindividuelles pouvant être

très importantes. Un mode de représentation de ces invariants dans le déroulement de l'action est proposé. Il repose sur des modifications simultanées des différents angles articulaires en fonction du pourcentage de distance séparant la main de la cible à tout instant. On élimine de cette manière les variabilités temporelles pour ne conserver que les aspects de déplacement, et on aboutit à des descriptions mathématiques très simples des courbes de variations angulaires : polynômes de degré 2 ou 3.

Les couplages angulaires entre l'épaule et le coude, évoqués ci-dessus, semblent se modifier en fonction de l'orientation du mouvement. L'antépulsion de l'épaule est le seul angle affecté par des écarts dans l'orientation du mouvement suivant l'axe vertical Z.

Les courbes moyennes typiques ainsi définies ont par ailleurs été utilisées pour recréer des trajectoires 3-D, et les écarts observés restent acceptables compte tenu de la simplicité du modèle utilisé.

Ces résultats, malgré leur aspect fragmentaire, ont été intégrés pour simuler des actions d'atteintes réalistes pour des modèles géométriques d'opérateurs dans des études CAO. Les modèles utilisés au sein de ERGODATA notamment sont mobilisables au niveau des différentes articulations. Les principales difficultés de manipulation de ces modèles CAO sont d'une part de recréer des postures, d'autre part de simuler des mouvements. Pour ce second point les logiciels de cinématique disponibles ne permettent pas d'aboutir à des résultats satisfaisants, et on doit avoir recours à des données expérimentales. Celles-ci doivent avoir un caractère général et elles ne peuvent être transmises que sous forme de variations angulaires. Les modes de présentation des données que nous avons adoptés se prêtent bien à ces simulations, chaque mouvement étant actuellement caractérisé par quatre angles évoluant simultanément en fonction d'une distance à parcourir par la main. Avec ce type de données on peut recréer une action complète, et évaluer ainsi les volumes occupés par le ou les membres supérieurs au cours de tâches typiques. Ces évaluations prennent tout leur intérêt dans des études d'aménagements de postes d'activité confinés où le volume utilisable par l'opérateur est à déterminer de façon optimale.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABDEL-AZIZ (Y.I.) ; KARARA (H.M.).- Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close range photogrammetry.- In : Proceedings of the ASP/UI Symposium on Close-Range Photogrammetry. 1971. Urbana (Illinois).

ABEND (W.) ; BIZZI (E.) ; MORASSO (P.).- Human arm trajectory formation.- Brain, vol. 105, 1982, pp. 331-348.

AYOUB (M.M.) ; DEIVANAYAGAM (S.) ; KENNEDY (K.W.).- Paths of movement for selected body segments during typical pilot tasks.- Wright - Patterson Air Force Base : Aerospace Medical Research Laboratory, 1976.- 390 p.- (AMRL-TR-75-111).

CHAO (E.Y.).- Justification of triaxial goniometer for the measurement of joint rotation.- Journal of Biomechanics, 13, 1980, pp. 989-1006.

COBLENTZ (A.) ; IGNAZI (G.) ; MOLLARD (R.).- ERGODATA : a complete system of data and research in human biometry and biomechanics : New Advances.- Communication at the 55th Annual Meeting of the American Association of Physical Anthropologists. Albuquerque (New Mexico) 9-12 avril 1986.- American Journal of Physical Anthropology, 69, 2, 1986, p.188.

- COBLENTZ (A.) ; IGNAZI (G.) ; MOLLARD (R.) ; PINEAU (J.C.).- Analyse biostéréométrique du geste. Constitution d'un catalogue informatisé du mouvement.- Le travail Humain, 48, 3, 1985, pp. 255-264.
- COBLENTZ (A.) ; MOLLARD (R.) ; IGNAZI (G.) ; PINEAU (J.C.).- Etude biostéréométrique de gestes par photogrammétrie infrarouge.- Communication au XVème Congrès ISPRS. June 1984. Rio de Janeiro.- Archives Internationales de Photogrammétrie et de Télédétection, 25, 5, 1984, pp. 205-213.
- COBLENTZ (A.) ; STECK (R.) ; RENAUD (C.) ; IGNAZI (G.).- La conception et l'évaluation de systèmes homme-machine par la représentation 3-D en CAO.- Le Travail Humain, 48, 3, 1985, pp. 265-278.
- COOKE (J.D.).- Dependence of human arm movements on limb mechanical properties.- Brain Research, 165, 1979, pp. 366-369.
- DVIR (Z.) ; BERME (N.).- The shoulder complex in elevation of the arm : a mechanism approach.- Journal of Biomechanics, 11, 1978, pp. 219-225.
- FREUND (H.J.) ; BÜDINGEN (H.J.).- The relationship between speed and amplitude of the fastest voluntary contraction of human arm muscles.- Experimental Brain Research, 31, 1978, pp. 1-12.
- HOLLERBACH (J.M.) ; FLASH (T.).- Dynamic interactions between limb segments during planar arm movement.- Biological Cybernetics, 44, 1982, pp. 67-77.
- KAMINSKI (T.) ; GENTILE (A.M.).- Joint control strategies and hand trajectories in multijoint pointing movements.- Journal of Motor Behavior, 18, 3, 1986, pp. 261-278.
- LACQUANITI (F.) ; SOECHTING (J.F.).- Coordination of arm and wrist motion during a reaching task.- The Journal of Neuroscience, 2, 4, 1982, pp.399-408.
- MIYASHIRO (N.).- The measurement of three-dimensional hand motion by the use of V.T.R.- In : Proceedings of the 26th Annual Meeting of the Human Factors Society. 1982.- Santa Monica : The Human Factors Society, 1982.- pp. 945-949.
- MOLLARD (R.) ; COBLENTZ (A.) ; FOSSIER (E.).- Contribution of infrared strobophotogrammetry in movements analysis. Applications.- In : Biostereometrics'85. December 2-6, 1985. Cannes/A.M. Coblentz ed ; R.E. Herron ed.- Bellingham : The International Society for Optical Engineering, 1985.- pp. 23-30.- (SPIE Proceedings, volume 602).
- MORASSO (P.).- Spatial control of arm movements.- Experimental Brain Research, vol. 42, 1981, pp. 223-227.
- NELSON (W.L.).- Physical principles for economics of skilled movements.- Biological Cybernetics, 46, 1983, pp. 135-137.
- SOECHTING (J.F.) ; LACQUANITI (F.).- Invariant characteristics of a pointing movement in man.- Journal of Neuroscience, 1, 1981, pp. 710-720.
- WADMAN (W.J.) ; DIENER VAN DER GON (J.J.) ; GEUZE (R.H.) ; MOL (C.R.).- Control of fast goal-directed movements.- Journal of Human Movements, 5, 1979, pp. 3-17.
- ZELLER (M.).- Stereophotogrammetry and studies of movements.- Photogrammetric Engineering, 19, 1953, pp. 654-655.