



**HAL**  
open science

# Caractérisation de l'inconfort dans un environnement de travail contraint de type cockpit d'aéronef

Régis Mollard, Elisa Hubert, Nina Barthes, Marion Wolff

## ► To cite this version:

Régis Mollard, Elisa Hubert, Nina Barthes, Marion Wolff. Caractérisation de l'inconfort dans un environnement de travail contraint de type cockpit d'aéronef. ERGO'IA 2018, Oct 2018, Bidart, France. hal-01882548

**HAL Id: hal-01882548**

**<https://hal.science/hal-01882548>**

Submitted on 27 Sep 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Caractérisation de l'inconfort dans un environnement de travail contraint de type cockpit d'aéronef

Régis Mollard  
Univ. Paris Descartes  
45, rue des Saints-Pères-  
75006 Paris  
& ESTIA/PEPSS  
Technopôle Izarbel  
64210 Bidart  
regis.mollard@parisdescartes.fr  
r.mollard@estia.fr

Elisa Hubert  
Nina Barthes  
Univ. Paris Descartes  
45, rue des Saints-Pères-  
75006 Paris  
elisa.hubert@etu-parisdescartes.fr  
nina.barthes@etu-parisdescartes.fr

Marion Wolff  
Univ. Paris Descartes  
UMR 8257 COGNAC G  
45, rue des Saints-Pères-  
75006 Paris  
& ESTIA/PEPSS  
Technopôle Izarbel  
64210 Bidart  
marion.wolff@parisdescartes.fr  
m.wolff@estia.fr

## RESUME

Les postures induites par les activités de pilotage des aéronefs sont susceptibles de créer un inconfort postural qui peuvent conduire à une mauvaise utilisation de l'environnement de travail, voire être la cause de troubles musculo-squelettiques. La caractérisation des différentes positions adoptées en fonction des tâches à réaliser peut toutefois être délicate selon les contraintes liées aux équipements/dispositifs présents dans l'environnement de travail. Après une revue des différentes méthodes de caractérisation des postures pour des analyses ergonomiques, deux méthodes ont été testées dans un environnement de type cockpit d'avion : la *Kinect* et un dispositif *Motion Capture*. Vingt-quatre sujets ont effectué des tâches nécessitant des interactions à une ou deux mains sur différents écrans et des atteintes en positions extrêmes haute et avant. Pour les 14 postures étudiées le nombre de segments corporels identifiés a été dénombré : 9 pour la *Kinect* et 11 pour la *Motion Capture*. Tous les segments sont identifiés avec les capteurs de la *Motion Capture*, mais il peut y avoir des erreurs de restitution. Pour la *Kinect*, certaines postures ne sont pas identifiées ni caractérisables et de nombreuses incertitudes rendent le dispositif peu utile dans le contexte des tests réalisés dans cette étude. Les résultats obtenus avec le dispositif de *Motion Capture* sont beaucoup plus satisfaisants pour l'évaluation de l'inconfort postural.

## Mots Clés

Postures, inconfort, *Kinect*, *Motion Capture*, cockpit.

## ABSTRACT

The postures induced by the piloting activities of aircraft are likely to create postural discomfort that can lead to a misuse of

---

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the Owner/Author. Copyright is held by the owner/author. ERGO'IA, 3 - 5 Octobre, 2018, Bidart, France.

the working environment, or even be the cause of musculoskeletal disorders. The characterization of the different positions adopted according to the tasks to be performed may, however, be difficult depending on the constraints related to the equipment / devices present in the work environment. After a review of the various postural characterization methods for ergonomic analyzes, two methods were tested in an aircraft cockpit environment: the *Kinect* and a *Motion Capture* device. Twenty-four subjects performed tasks requiring one- or two-handed interactions on different screens and attacks in extreme high and forward positions. For the 14 postures studied, the number of identified body segments was counted: 9 for the *Kinect* and 11 for the *Motion Capture*. All segments are identified with *Motion Capture* sensors, but there may be restitution errors. For *Kinect*, some postures are not identified or characterizable and many uncertainties make the device of little use in the context of the tests performed in this study. The results obtained with the *Motion Capture* device are much more satisfactory for assessing postural discomfort.

## Keywords

Postures, discomfort, *Kinect*, *Motion Capture*, cockpit.

## ACM Classification Keywords

H.5.2. User interfaces: ergonomics: evaluation.

## 1. INTRODUCTION

La prévalence des douleurs dans le bas du dos ainsi que des Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) chez les pilotes a fait l'objet de nombreuses études, principalement chez les pilotes d'hélicoptères et en aviation générale mais également en aviation commerciale du fait du maintien d'une position assise prolongée. En effet, 70 à 85% des pilotes se plaignent de douleurs et d'inconfort au moins une fois au cours de leur vie, le plus souvent au niveau du bas du dos mais aussi dans les zones associées : haut du dos, épaules, bas des cuisses ainsi que dans le cou et les bras [12] [21] [31] (tableau 1).

The Frequency and Location of Pain Occurrence in Pilots

| Studies                           | Locations (%) |          |          |            |          |      |      |
|-----------------------------------|---------------|----------|----------|------------|----------|------|------|
|                                   | Neck          | Shoulder | Mid Back | Lower Back | Buttocks | Legs | Arms |
| Braithwaite & Vrynwry-Jones, 1986 | 1             | 7        | 29       | 61         | 24       |      |      |
| Foran & Zalevski, 1998            | 60            | 40       | 37       | 80         | 3        | 43   | 37   |
| Lusted et al., 1994               | 30            | 27       | 20       | 73         | 86       | 30   | 8    |
| Schulte-Wintrop & Knoche, 1978    |               | 17       | 34       | 54         |          |      |      |
| Shanahan et al., 1986             | 4             | 6        | 6        | 73         | 17       | 35   | 4    |
| Sheard et al., 1996               |               | 19       | 42       | 72         | 12       | 15   |      |
| Thomae et al., 1998               | 29            | 8        | 21       | 86         | 25       | 9    |      |

**Tableau 1. Fréquence et localisation des inconforts posturaux chez les pilotes. [31]**

Ces douleurs sont d'intensité faible à moyenne. La plupart d'entre elles (85%) sont temporaires, transitoires durant le vol et disparaissent rapidement après le vol (souvent moins de 6h après le vol) [29]. Pour les pilotes d'hélicoptères qui ressentent des douleurs celles-ci sont chroniques et perdurent 48 heures après un vol [4]. Une expérience menée par Simpson et Porter [30] a montré qu'après 20 minutes de vol, 20% des pilotes d'aviation générale ressentent des douleurs, cette proportion monte à 50% après une heure de vol et à 75% passé 2 heures de vol. Une corrélation positive avec l'expérience et le nombre d'heures de vol par semaine a été montrée. Chez les pilotes d'hélicoptères, les premières douleurs apparaissent entre 300 et 1500 heures de vol [5] [10]. Il a été observé que les risques de douleurs augmentent après 2 heures de vol ou si 20 heures de vol ont été effectuées dans la semaine [4]. Les douleurs chroniques sont liées à l'accumulation du nombre d'heures de vol dans la vie (> 2000h). Trois causes possibles sont avancées [10] : le maintien prolongé d'une posture statique, une posture asymétrique ou peu naturelle et une tension importante pour supporter la colonne. De plus, les pilotes peuvent adopter des postures peu stables ou peu naturelles pour améliorer leur champ de vision ou atteindre certaines commandes [33], ce qui accroît les risques de douleurs [30]. La douleur ressentie peut être cause de distractions qui peuvent interférer avec la concentration et l'attention des pilotes, entraînant ainsi une baisse d'efficacité [12] [31].

## 2. INCONFORT POSTURAL

L'inconfort postural est fréquemment étudié en ergonomie, comme un aspect essentiel de la conception d'espaces de travail. L'inconfort se définit comme le "caractère désagréable, incommode d'un état dans lequel se trouve quelqu'un" (Larousse). Dans un contexte ergonomique cependant il serait inexact de définir l'inconfort comme l'absence de confort, et vice versa, ces deux aspects étant souvent évalués séparément [14]. L'inconfort postural dépend essentiellement de deux types de facteurs : des facteurs biomécaniques, et la fatigue alors que le confort se rattache à la notion de bien-être [34]. Les facteurs pouvant entraîner de l'inconfort postural sont les suivants : les angles articulaires, les pressions au niveau des vertèbres et des zones de contact, les forces musculaires engagées, les blocages circulatoires et la durée pendant laquelle est maintenue la posture [18].

Le principal facteur qui affecte l'inconfort est le temps, corrélé avec la fatigue. Il n'existe pas une position de confort postural absolu telle qu'elle puisse être maintenue dans le temps : le confort requiert de changer régulièrement de posture, même de manière inconsciente [3]. Les facteurs biomécaniques

d'inconfort postural augmentent avec la durée de la tâche, et ce quelle que soit la posture ou le siège mis à disposition pour les postures assises [14]. Ils peuvent être mesurés (électromyogrammes, mesures de pression), ou évalués par le biais de grilles d'observations pour les angles articulaires par exemple. Mais l'inconfort postural n'est qu'un aspect de l'inconfort global qui est multifactoriel. L'inconfort dépend non seulement de facteurs biomécaniques et physiologiques mais également de l'environnement physique, et de facteurs psychosociaux et culturels. De fait inconfort et confort sont le plus souvent étudiés à l'aide de questionnaires pour évaluer le ressenti subjectif des personnes. Si des échelles existent évaluant confort et inconfort sur le même plan comme le *General Comfort Rating* [28], d'autres échelles ont été développées centrées uniquement sur l'inconfort comme la *Body Part Discomfort Scale* [7].

La posture assise, si elle présente de nombreux avantages, est particulièrement susceptible de créer des blocages circulatoires dans les zones corporelles où s'exercent des pressions. De même, les pressions intra-discales peuvent être très élevées en position assise quand les lombaires sont en cyphose, mais cela ne se traduit par aucune douleur. Cependant en termes d'inconfort, elle est généralement jugée moins inconfortable que la position debout et lui est préférée [20]. La conception des sièges est aussi une préoccupation majeure. Le siège doit offrir la possibilité de modifier la posture au cours du temps, doit soutenir les différents segments corporels, et notamment les lombaires pour qu'elles soient maintenues dans une position de lordose. De manière générale, un environnement de travail adapté doit permettre de maintenir des postures perçues comme confortables et ainsi améliorer les performances des utilisateurs. En effet, l'inconfort postural affecte la performance en termes de temps passé sur une tâche et de nombre d'erreurs commises sur cette même tâche [3]. L'inconfort postural est également corrélé à l'apparition de TMS [11].

## 3. LE MAINTIEN POSTURAL DANS LES COCKPITS D'AVIONS

Les pilotes d'avions commerciaux, du court à l'ultra long-courrier, sont également concernés par l'inconfort postural. En effet, ces derniers peuvent se trouver dans une position assise pendant de longues périodes, mais faut-il encore que cette position soit à la fois confortable et quelle permette de garantir l'efficacité du pilote dans les différentes phases de pilotage en interaction avec les équipements de pilotage et de gestion du vol [1]. Lors du décollage et de la montée, tout comme pendant l'approche et l'atterrissage, il y a la nécessité de maintenir une position redressée permettant de fréquentes interactions avec les commandes de vol et des prises d'informations visuelles dans le cockpit et à l'extérieur. Lors de la croisière, la position adoptée est plus relâchée lors des activités de monitoring, de communication mais également au cours de la prise de repas et de repos. En dehors des périodes relativement courtes (décollage et atterrissage) nécessitant une position redressée, les critères prioritaires à respecter sont de ne pas maintenir une position caractérisée par une inclinaison et une torsion du buste, que l'angle buste-jambes soit de l'ordre de 110° (et plus pour les

périodes de repos), que les membres supérieurs ne soient pas maintenus en dessus de l'horizontale des épaules et que les extrémités puissent reposer sur un repose-pied, des accoudoirs et un appui-tête [2]. Ces critères permettent de limiter une sollicitation trop importante des muscles entraînant une fatigue musculaire ou une augmentation du coût cardiaque, et de limiter la pression de contact sur des zones sensibles.

Afin de s'assurer du respect de ces préconisations il est nécessaire lors de l'introduction de nouvelles technologies comme des écrans tactiles [1] de vérifier que les positions adoptées par les futurs utilisateurs ne seront pas génératrices d'inconfort postural, ceci peut se faire par le recours à des simulations avec des mannequins numériques avec des étapes de validation sur des bancs de tests récréant les situations de pilotage [2]. Le besoin est alors de pouvoir caractériser les postures adoptées par des pilotes placés dans leur environnement de travail. La difficulté réside dans le fait que différents équipements peuvent masquer de manière plus ou moins importante la visibilité de la posture adoptée. Il convient alors de choisir la méthode pour caractériser les postures : elle doit être rapide à mettre en œuvre et non contraignante pour la personne évaluée.

## 4. CARACTÉRISATION DES POSTURES

### 4.1. Les méthodes disponibles

Elles peuvent se regrouper en plusieurs catégories selon les besoins : d'une description qualitative relativement globale à des évaluations précises par degré de liberté segmentaire. On peut les classer de la manière suivante :

- grilles d'observation : [16] [23] [8]
- photos et/ou vidéos : [13] [15]
- mesures par goniométrie/exosquelette[6] [22]
- systèmes électromagnétiques :[19]
- systèmes optiques avec marqueurs :[24]
- systèmes optiques sans marqueurs :[26] [27]
- systèmes inertiels : [2] [9] [25]

Pour l'expérimentation présentée ci-après nous avons retenu d'utiliser deux moyens de captation : la *Kinect*, système optique sans marqueur, qui est, selon certains auteurs un dispositif prometteur pour évaluer des postures et des mouvements [26], et le dispositif Motion Capture de *Technologies Ergonomie Applications (TEA)*<sup>1</sup>, associé au logiciel *CAPTIV*, pour obtenir des avatars 3-D des sujets en situation de test.

### 4.2. Dispositif *Kinect*

Le dispositif *Kinect* émet des ondes infrarouges, réfléchies par les objets et le corps humain, que sa caméra va ensuite traiter pour reconstruire une image en profondeur ainsi qu'une image en couleur. L'application *Skeleton Tracking* permet de déterminer la position des articulations et les segments du corps

humain. Grâce à ce système, les positions des articulations et les segments corporels peuvent être identifiés : le dispositif *Kinect* obtiendrait des résultats assez similaires à ceux obtenus avec des systèmes plus complexes [26] [27]. Ce dispositif présente comme intérêt une absence de marqueurs. Il est moins contraignant et moins coûteux que des systèmes plus complexes de type *Vicon* fonctionnant à partir de détections de mires par vidéo<sup>2</sup>. Cependant, la fiabilité des données dépend des conditions environnementales et de l'emplacement du dispositif par rapport au sujet étudié. Pour les sujets en position assise, l'application *Skeleton* ne détecte que la partie haute du corps (tête et membres supérieurs). Dans les espaces étroits et/ou encombrés, la *Kinect* demeure sensible aux occlusions [26]. Le capteur peut ne pas différencier les éléments corporels des éléments de l'environnement comme les dossiers de siège ou les tables de bureaux [32]. La *Kinect* peut également fournir des données moins fiables quand le sujet observé ne fait pas face au capteur, notamment si le capteur est placé trop bas. Enfin, les erreurs d'estimations des postures augmentent avec la complexité des mouvements étudiés [26]. Ce sont donc des éléments à prendre en compte dans l'utilisation du dispositif *Kinect* pour caractériser les postures, dans les environnements de travail à fortes contraintes d'encombrement ou de visibilité, du fait de l'architecture du poste de travail ou de pilotage.

### 4.3. Motion Capture (*TEA*)

La technologie de la *Motion Capture* consiste en l'enregistrement des positions d'un sujet à partir de capteurs composés d'accéléromètres et de gyroscopes calibrés pour donner leur position les uns par rapport aux autres et par rapport au sol afin de reconstruire la position du sujet en 3D sous la forme d'un avatar sur ordinateur. *TEA* propose des capteurs de Motion Capture associés au logiciel *CAPTIV* permettant de reconstituer l'ensemble du corps en 15 segments prédéfinis à l'aide de 15 capteurs.

## 5. EXPERIMENTATION

L'objectif de l'expérience menée à la PEPSS (Plateforme d'Evaluation, de Prototypage et de tests d'usageS) a été de simuler un cockpit d'aéronef et à l'aide de tâches à réaliser à une ou deux mains sur quatre écrans tactiles, d'identifier les apports des deux différents dispositifs de mesure : *Kinect* et *Motion Capture*.

### 5.1. Echantillon

Vingt-quatre sujets, dont 6 femmes et 18 hommes, âgés de 19 à 53 ans (moy : 29 ans  $\pm$  8) ont participé à l'expérience. La taille debout (stature) des sujets est comprise entre 157,5 cm et 192,6 cm et la taille-assis redressée entre 83,7 cm et 97,8 cm. On couvre ainsi pour la stature la dispersion entre le 50<sup>ème</sup> percentile féminin et le 92<sup>ème</sup> percentile masculin de la population des pilotes retenue par Airbus. Pour la taille-assis redressée, on

<sup>1</sup> <http://teaergo.com/wp/>

<sup>2</sup> <https://www.vicon.com>

couvre du 30<sup>ème</sup> percentile féminin au 85<sup>ème</sup> percentile masculin de la même population (Tableau 2).

## 5.2.

| ISO 7250-1 - Measurements |         | Mean   | SD   | P5   | P95  |
|---------------------------|---------|--------|------|------|------|
| Stature (mm)              | Males   | 18.15  | 87   | 1672 | 1959 |
|                           | Females | 1572.5 | 55.4 | 1481 | 1664 |
| Sitting Height (mm)       | Males   | 944.0  | 41.2 | 876  | 1012 |
|                           | Females | 860.0  | 36.4 | 800  | 920  |
| Buttock-knee length (mm)  | Males   | 643.0  | 36.4 | 583  | 703  |
|                           | Females | 533.4  | 22.1 | 497  | 570  |

**Tableau 2. Extrait de la base de données Airbus 2040 (d'après Barbé *et al.* [2])**

## 5.3. Dispositif expérimental

Les tests ont été réalisés sur la MEP (Multimodal Evaluation Plateform) de la PEPSS. Celle-ci était équipée d'un siège réglable, de 4 écrans tactiles pour les tests (frontal, latéral gauche, latéral droit et une tablette en position frontale basse), d'un joystick côté gauche et d'une manette de gaz placée sur un piédestal côté droit (Figure 1). La *Kinect* et une webcam étaient placées face au sujet à 1,25m de hauteur afin d'obtenir le champs de vision optimal du sujet assis dans le banc de test.

Un panneau incliné à 20° par rapport à l'horizontal était placé sur les écrans tactiles pour permettre un alignement de l'axe de vision du sujet correspondant à ce qui est prérequis dans un cockpit.

Les capteurs du dispositif *Motion Capture* étaient placés sur le sujet au moyen de fixations par stretch en début de test, avec un phase d'étalonnage (5 mn environ).

Initialement il était prévu d'utiliser les 15 capteurs. A la suite de prétests, il a été décidé de ne pas utiliser les capteurs au niveau des mains et des pieds, car les fixations étaient difficiles à placer et pouvaient gêner au niveau des mains pour l'exécution des tâches sur les écrans. Les tests ont donc été réalisés avec 11 capteurs : 1 sur la tête, 2 dans le dos, 2 sur les bras, 2 sur les avant-bras, 2 sur les cuisses et 2 sur les jambes.



**Figure 1. Dispositif de test**

## 5.4. Modalités de passation

Après un réglage du siège en hauteur pour avoir la référence de l'axe visuel (incliné à 20°), il était demandé au sujet, tout en conservant la position assis redressé, dos en appui sur le dossier du siège, de s'ajuster pour atteindre les bras tendus les extrémités supérieures externes des écrans latéraux, droit et gauche.

La description des positions étudiées est reportée sur le tableau 3. Les positions ont été recueillies dans le même ordre pour tous

les sujets en faisant tester les écrans gauche, central et droit puis la tablette. Les sujets étaient informés qu'ils devaient utiliser deux mains sur les écrans latéraux pour zoomer/dézoomer et une main pour naviguer. Sur l'écran de gauche, les sujets devaient chercher une localité sur Google Earth. Sur l'écran central, les sujets devaient jouer à un jeu de réussite. Sur l'écran de droite, les sujets utilisaient Google Maps/Espace pour chercher une formation géologique sur Mercure. Sur la tablette tactile, les sujets devaient nourrir un poisson sur le jeu « Zen Koi 2 ». Le but pour chacune des tâches était de faire maintenir une position pendant au minimum 5 secondes. Pour les autres positions (référence, avec maintien de commandes ou avec des atteintes maximales) elles étaient également maintenues pendant 5 secondes.

|             |   |
|-------------|---|
| Position 0  | référence : assis redressé, mains posées sur les cuisses              |
| Position 1  | bras tendus pour toucher les bords externes haut des écrans latéraux  |
| Position 2  | main gauche sur le joystick et droite sur la manette des gaz          |
| Position 3  | tâche à deux mains sur l'écran latéral gauche                         |
| Position 4  | tâche main gauche sur l'écran latéral gauche                          |
| Position 5  | tâche sur l'écran central à une main                                  |
| Position 6  | tâche à deux mains sur l'écran latéral droit                          |
| Position 7  | tâche main droite sur l'écran latéral droit                           |
| Position 8  | tâche à deux mains sur la tablette                                    |
| Position 9  | main gauche sur le joystick et main droite agit sur l'écran de gauche |
| Position 10 | atteinte maximale haute avec la main droite                           |
| Position 11 | atteinte maximale droite, bras tendus                                 |
| Position 12 | atteinte maximale gauche, bras tendus                                 |
| Position 13 | atteinte maximale avant, bras tendus                                  |

**Tableau 3. Positions retenues pour les tests**

La position 2 correspond à la position de référence utilisée de manière réglementaire au décollage dans les avions commerciaux : « position à l'œil » ou « *Design Eye Position* » (Figure 2). Les positions 11, 12 et 13 nécessitaient une mise en posture avec une flexion (13) ou une flexion/inclinaison du buste (11 et 12) en butée vers l'avant ou en latéral. Le maintien de ces positions n'est pas requis dans une situation de pilotage mais elles peuvent survenir de manière ponctuelle [2]. Elles ont été retenues pour cette expérimentation pour évaluer les possibilités de capture avec la *Kinect*.



**Figure 2. Design Eye Position (d'après Barbé *et al.* [2])**

## 5.5. Données collectées

Pour chaque position les enregistrements ont été effectués de manière synchrone par la *Kinect*, la webcam et le dispositif de *Motion Capture*. La position retenue pour les analyses correspond à la 4<sup>ème</sup> seconde de maintien postural. Un exemple des captures effectuées pour la position 7 est reporté sur la figure 3. Les données disponibles sont : l'exosquelette fourni par l'application *Skeleton tracking* en mode *seated*, la photo extraite de la webcam et l'avatar 3-D issu des traitements sur *CAPTIV* (+ les valeurs angulaires des articulations).



Figure 3. Données retenues pour l'analyse de la position 7.

## 6. ANALYSE DES DONNEES DE KINECT

Sur les 24 tests réalisés, 19 ont été retenus pour l'analyse, pour les 5 autres des problèmes de sauvegarde ont rendu les fichiers inexploitable. Avec l'application *Skeleton Tracking* les segments corporels visibles sont répartis en "segments corporels sûrs", quand ils sont correctement calculés et apparaissent en vert, et "segments corporels supposés" quand le calcul de position est incertain et qu'ils apparaissent en jaune (figure 4). L'ensemble de ces segments a été retenu pour la suite de l'analyse.

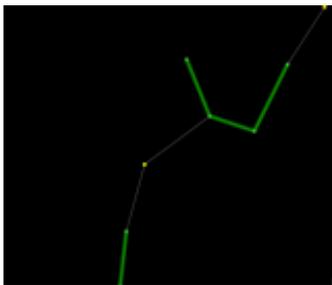


Figure 4. Données de l'application « Skeleton Tracking »

Les segments articulaires vus par position ont été dénombrés. Pour les positions de référence (0 et 1) et de pilotage (2 à 10) les segments les plus vus sont les épaules droite (87,08%) et gauche (84,21%), suivies de la tête (77,03%) et des bras gauche (74,64%) et droit (73,21%). Les avant-bras gauche (67,94%) et droit (67,46%) ainsi que les mains droite (43,06%) et gauche (41,63%) sont les segments les moins vus (tableau 4). Pour les autres positions (11, 12 et 13), l'identification des segments demeure très faible (tableau 5). La caractérisation des postures demeure possible pour la position 10 avec 90,64% des segments identifiés et les positions de référence 0 (78,64%), 1 (82,46%) et 2 (84,80%), les sujets étant placés face à la caméra de la *Kinect*. Pour les autres positions les occlusions empêchant les distinctions entre les segments sont fréquentes du fait de la posture adoptée pour réaliser les tâches demandées.

| Positions | Segments |          |          |        |        |              |              |        |        |       | TOTAL | %     |
|-----------|----------|----------|----------|--------|--------|--------------|--------------|--------|--------|-------|-------|-------|
|           | Tête     | Epaule G | Epaule D | Bras G | Bras D | Avant-bras G | Avant-bras D | Main G | Main D |       |       |       |
| 0         | 17       | 17       | 17       | 17     | 18     | 17           | 7            | 7      | 7      | 7     | 134   | 78,36 |
| 1         | 16       | 16       | 16       | 17     | 17     | 14           | 16           | 12     | 14     | 12    | 141   | 82,46 |
| 2         | 17       | 17       | 18       | 17     | 18     | 18           | 18           | 7      | 15     | 15    | 145   | 84,80 |
| 3         | 12       | 15       | 16       | 16     | 11     | 15           | 8            | 9      | 3      | 3     | 105   | 61,40 |
| 4         | 17       | 17       | 17       | 15     | 16     | 16           | 15           | 11     | 14     | 11    | 140   | 81,87 |
| 5         | 15       | 15       | 17       | 14     | 11     | 12           | 8            | 5      | 4      | 4     | 101   | 59,06 |
| 6         | 11       | 15       | 15       | 9      | 10     | 7            | 10           | 4      | 6      | 6     | 87    | 50,88 |
| 7         | 14       | 15       | 14       | 13     | 12     | 9            | 12           | 3      | 8      | 8     | 100   | 58,48 |
| 8         | 14       | 15       | 15       | 10     | 11     | 8            | 11           | 4      | 3      | 3     | 91    | 53,22 |
| 9         | 10       | 16       | 18       | 12     | 10     | 8            | 9            | 2      | 4      | 4     | 89    | 52,05 |
| 10        | 18       | 18       | 19       | 16     | 19     | 15           | 18           | 15     | 17     | 17    | 155   | 90,64 |
| TOTAL     | 161      | 176      | 182      | 156    | 153    | 142          | 141          | 87     | 90     | 90    |       |       |
| %         | 77,03    | 84,21    | 87,08    | 74,64  | 73,21  | 67,94        | 67,46        | 41,63  | 43,06  | 43,06 |       |       |

Tableau 4. Identification des segments selon les positions.

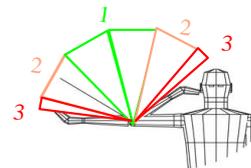
| Positions | Segments |          |          |        |        |              |              |        |        |      |
|-----------|----------|----------|----------|--------|--------|--------------|--------------|--------|--------|------|
|           | Tête     | Epaule G | Epaule D | Bras G | Bras D | Avant-bras G | Avant-bras D | Main G | Main D |      |
| 11        | 5        | 4        | 2        | 2      | 1      | 1            | 0            | 0      | 0      | 0    |
| 12        | 2        | 2        | 2        | 0      | 2      | 1            | 2            | 1      | 1      | 1    |
| 13        | 1        | 1        | 1        | 0      | 1      | 0            | 2            | 0      | 0      | 0    |
| TOTAL     | 8        | 7        | 5        | 2      | 4      | 2            | 2            | 1      | 1      | 1    |
| %         | 14,04    | 12,28    | 8,77     | 3,51   | 7,02   | 3,51         | 3,51         | 1,75   | 1,75   | 1,75 |

Tableau 5. Identification des segments selon les positions.

## 7. ANALYSE DES DONNEES MOTION CAPTURE

Sur les 336 tests réalisés (24 sujets x 14 positions), 29 ont fourni de mauvaises caractérisations de posture, principalement en raison de problèmes de batterie pour un ou plusieurs capteurs. Ce problème était toutefois facilement détectable à la visualisation de l'avatar. Ils ont été écartés pour la suite de l'analyse. Par contre le dispositif de *Motion Capture* n'est pas sensible aux changements de positions, tous les segments sont identifiés pour chacune des positions étudiées.

A l'aide du logiciel *CAPTIV* les angles pour les principales articulations ont été calculés : 3 valeurs par articulation pour la nuque, le dos, les épaules et les hanches et 2 valeurs pour les coudes et les genoux qui n'ont que 2 degrés de liberté. Ces séries de données peuvent servir à mettre en posture des mannequins numériques (cf figure 2). Dans le contexte de cette étude nous avons utilisé le principe d'une caractérisation de l'inconfort postural présente dans les applications de mannequin numérique et disponible avec *CAPTIV*. Ce principe de catégorisation, dérivé de la norme EN-1005-4 :2005+A1 :2008, est généralisable à toutes les segments anatomiques. Il repose sur le principe d'une minimisation des sollicitations musculaires, tendineuses, vasculaires et articulaires : en zone centrale « 1 » cette minimisation des sollicitations est bien respectée ; pour les zones « 2 » les sollicitations vont augmenter au fur et à mesure de l'ouverture ou de la fermeture de l'angle concerné ; en limite des butées pour les zones « 3 » les sollicitations sont au maximum et la position ne peut être maintenue car elle crée soit une forte compression vasculonerveuse, par exemple flexion maxi à 140° pour le coude, soit un étirement péri-articulaire intense pour une extension maxi à 0°(figure 5).



**Figure 5. Principe de catégorisation de l'inconfort postural**  
 Pour les tests réalisés, avec la configuration à 11 capteurs (les mains et les pieds ne sont pas étudiés), un score d'inconfort est obtenu pour l'ensemble du corps pour caractériser l'inconfort postural de la position. Il peut varier de 0 (inconfort minimal) à 52 (inconfort maximal, chaque degré de liberté étant en butée articulaire). Ce score est fourni par le logiciel *CAPTIV* à partir des zones d'inconfort reprenant le principe présenté sur la figure 5. Chaque zone donne un nombre de point différent : 0 pour la zone centrale, 1 pour la zone de sollicitation limite, et 2 pour la zone de danger. Une moyenne est ensuite faite pour tous les sujets. Ce score permet de comparer rapidement les différentes postures. Pour les positions retenues pour ces tests on peut

constater que les scores sont les plus faibles pour les positions de référence (2) ou n'imposant pas de modification posturale notable (4) (tableau 6).

| Articulations | Positions |    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------|-----------|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|               | 0         | 1  | 2 | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 |
| nuque         | 2         | 2  | 1 | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 1  | 2  | 4  | 3  | 3  | 2  |
| dos           | 1         | 1  | 1 | 3  | 2  | 2  | 2  | 2  | 3  | 1  | 2  | 2  | 1  | 1  |
| epaule droite | 1         | 2  | 0 | 5  | 1  | 3  | 3  | 2  | 2  | 5  | 3  | 2  | 0  | 6  |
| epaule gauche | 1         | 2  | 1 | 2  | 1  | 2  | 5  | 1  | 1  | 2  | 1  | 1  | 2  | 5  |
| coude droit   | 0         | 0  | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  |
| coude gauche  | 1         | 0  | 0 | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  |
| hanche droite | 1         | 1  | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 1  | 1  |
| hanche gauche | 1         | 1  | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 2  | 2  |
| genou droit   | 2         | 2  | 2 | 2  | 1  | 2  | 1  | 1  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  |
| genou gauche  | 2         | 2  | 2 | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  | 1  |
| corps entier  | 11        | 11 | 9 | 17 | 10 | 13 | 17 | 12 | 12 | 18 | 14 | 16 | 16 | 20 |

**Tableau 6. Exemple de caractérisation de l'inconfort postural pour un sujet pour les positions étudiées.**

Selon cette méthode, la posture la plus inconfortable est la posture 13 avec un score global de 20 qui correspond à une position penchée en avant les bras tendus vers l'avant avec une flexion en butée avant pour le buste (dos). La position la moins inconfortable est la posture 2 avec un score de 9 qui correspond à la position adoptée au décollage (cf figure 2). Pour l'ensemble des tests, on retrouve ce même degré d'inconfort (tableau 7). Les positions ne nécessitant pas de fortes flexions et inclinaisons du buste se retrouvent naturellement avec des scores assez faibles (positions 0 à 2). Il en est de même avec les positions adoptées pour réaliser des tâches à une main sur l'écran situé à proximité (position 4 pour activité main gauche sur écran latéral gauche et position 6 pour activité main droite sur écran latéral droit).

| Positions  | 0    | 1    | 2   | 3   | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   |
|------------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Moyenne    | 11,3 | 11,5 | 8,6 | 17  | 10,2 | 12,8 | 16,8 | 11,9 | 12,3 | 17,7 | 14,2 | 16,4 | 15,7 | 20,2 |
| Ecart type | 3,7  | 3,6  | 2,1 | 2,2 | 2    | 2,1  | 3,4  | 2,3  | 1,2  | 2,2  | 1,6  | 2,5  | 3    | 1,6  |

**Tableau 7. Caractérisation de l'inconfort postural global pour les positions étudiées.**

## 8. DISCUSSION - CONCLUSION

Les problèmes de visibilité des segments rencontrés avec les enregistrements *Kinect* peuvent être répartis en deux catégories : ceux dus à un passage hors-champ des segments ou du participant, et ceux dus à des mauvaises distinctions entre les différents segments. Compte tenu de l'agencement du poste à évaluer, la *Kinect* n'était pas placée de manière optimale (dispositif placé à 1,5m des sujets au lieu de 2,0m recommandé) Le champ de détection de la *Kinect* était donc plus limité, ce qui pose problème pour les atteintes extrêmes (positions 11, 12 et 13) et les postures où le sujet interagit sur l'écran central et sur la tablette (position 5 et 8). Un des problèmes majeurs de la *Kinect* et du module de *Skeleton Tracking*, mis en avant dans plusieurs études [26][32], est que les occlusions empêchent de faire une bonne distinction des différents segments. C'est ce qui a été notamment le cas pour les bras, les avant-bras et les mains dans les positions avec des activités à deux mains sur les écrans (positions 3, 6 et 9). De la même manière, des confusions entre les segments et des éléments de l'environnement comme le dossier du siège peuvent expliquer la mauvaise détection de certains segments. De ce fait de nombreuses postures sont difficilement interprétables. Il est arrivé plusieurs fois que des

segments affichés par le module de *Skeleton Tracking* ne soient pas pris en compte car impossibles à identifier manuellement, même avec l'aide de la vue fournie par la webcam. Pour la suite, il est envisagé de réaliser des tests avec plusieurs dispositifs *Kinect* afin de tenter de mieux identifier les segments corporels non vus lors des tests. Il conviendrait également de disposer d'un module de *tracking* plus efficace pour caractériser les positions du buste, ce qui n'est pas possible avec la version actuelle du *Skeleton Tracking*.

Par contre le dispositif de *Motion Capture* apparaît plus approprié pour analyser les contraintes posturales. Il conviendrait de modifier les modes de fixation des capteurs au niveau des mains et des pieds pour une caractérisation posturale complète. Le codage de l'inconfort postural apporte une évaluation synthétique des postures et des zones avec le plus d'inconfort, ce qui permet de qualifier assez rapidement un agencement de poste de travail pour un type donné d'activités et d'utilisateurs. De plus les valeurs angulaires obtenues sont transférables vers les applications de Conception Assistée par Ordinateur utilisant des mannequins numériques.

## Remerciements

Les auteurs remercient la société *TEA* pour la mise à disposition du système *Motion Capture et Patxi Bérard (ESTIA/PEPSS)* pour son implication dans la mise en œuvre des moyens de test.

## Bibliographie

- Barbé, J., Wolff, M., & Mollard, R. (2013). Human centred design approach to integrate touch screen in future aircraft cockpits. In M. Kurosu (Ed.): *Human-Computer Interaction, Part IV, HCII 2013, LNCS 8007*, (pp. 429–438). © Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Barbé, J., Chatrenet, N., Mollard, R., Bérard, P., & Wolff, M. (2012). Physical ergonomics approach for touch screen interaction in an aircraft cockpit. In *Proceedings of the ErgoIHM 2012 conference* (pp. 12-19). New-York: ACM.
- Bhatnager, V., Drury, C. G., Schiro, S. G. (1985). Posture, Postural discomfort and Performance. *Human Factors*, 27(2), 189 - 199.
- Bongers, P., Hulshof, C., Dijkstra, L., Boshuizen, H., Groenhout, H., & Valken, E. (1990). Back pain and exposure to whole body vibration in helicopter pilots. *Ergonomics*, 33(8), 1007–1026.
- Bowden, T. (1985). Postural fatigue and the backache of helicopter pilots (DCIEM No. 85-R-30). Downsview, Canada: Biosciences Division, DCIEM.
- Chao, E. Y. (1980). Justification of triaxial goniometer for the measurement of joint rotation. *Journal of Biomechanics*, 13(12), 989995-9931006.
- Corlett, E. N., & Bishop, R. P. (1976). A technique for assessing postural discomfort. *Ergonomics*, 19(2), 175-182
- Corlett, E. N., Madeley, S., & Manenica, I. (1979). Posture targeting: a technique for recording working postures. *Ergonomics*, 22(3), 357-366.
- Cuesta-Vargas, A. I., Galán-Mercant, A., & Williams, J. M. (2010). The use of inertial sensors system for human motion analysis. *Physical Therapy Reviews*, 15(6), 462-473.

Delahaye, R., Auffret, R., Metges, P., Poirier, J., & Vettes, B. (1982). Backache in helicopter pilots. In *Physiopathology and pathology of the spine in aerospace medicine (AGARD AG-250)*. Neuilly-sur-Seine, France.

Dul, J., Douwes, M. (1994). Ergonomic guidelines for the prevention of discomfort of static postures based on endurance data. *Ergonomics*, 37(5), 807 - 815

Foran, D., & Zalevski, A. (1998). A survey of musculoskeletal pain & discomfort experienced by S-70A-9 aircrew (DSTO-TR-97/027). Melbourne, Australia: DSTO, Dept. of Defence.

Fransson-Hall, C., Gloria, R., Kilbom, Å., Winkel, J., Karlqvist, L., & Wiktorin, C. (1995). A portable ergonomic observation method (PEO) for computerized on-line recording of postures and manual handling. *Applied ergonomics*, 26(2), 93-100.

Helander, M. G., Zhang, L. (1997). Field studies of comfort and discomfort in sitting. *Ergonomics*, 40(9), 895 - 915.

Holzmann, P. (1982). ARBAN - A new method for analysis of ergonomic effort. *Applied Ergonomics*, 13(2), 82 - 86.

Karhu, O., Härkönen, R., Sorvali, P., Vepsäläinen, P. (1981). Observing working postures in industry: Examples of OWAS applications. *Applied Ergonomics*, 12(1).

Karhu, O., Kansi, P., & Kourinka, I. (1977). Correcting working posture in industry: a practical method for analysis. *Applied Ergonomics*, 8, 199-201.

Kee, D., Lee, I. (2012). The relationship between subjective and objective measures in asserting postural stresses. *Applied Ergonomics*, 43, 277 - 282.

Kulkarni-Lambore, S., & Peat, M. (2000). Reliability and validity of 3Space Isotrak in the measurement of metacarpophalangeal joint range. *Physiotherapy Theory and Practice*, 16, 219 - 227.

1. Le, P., Marras, W. S. (2016). Evaluating the low back biomechanics of three different office workstations: seated, standing, and perching. *Applied Ergonomics*, 56, 170 - 178.

Lusted, M., Healey, S., & Mandryk, J. (1994). Evaluation of seating of Qantas flight-deck crews. *Applied Ergonomics*, 25(5), 275-287.

Marras, W. S., Fathallah, F. A., Miller, R. J., Davis, S. W., Mirka, G. A. (1992). Accuracy of a three-dimensional lumbar motion monitor for recording dynamic trunk motion

characteristics. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 9, 75 - 87.

McAtamney, L., & Corlett, E. N. (1993). RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, 24, 91-99.

Merriau, P., Dupuis, Y., Boutteau, R., Vasseur, P., & Savatier, X. (2017). A Study of Vicon System Positioning Performance. *Sensors*, 17(7), 1591.

Nath, N. D., Akhavian, R., & Behzadan, A. H. (2017). Ergonomic analysis of construction worker's body postures using wearable mobile sensors. *Applied Ergonomics*, 62, 107-117.

Plantard, P., Auvinet, E., Le Pierres, A. S., & Multon, F. (2015). Pose estimation with a Kinect for ergonomics studies: Evaluation of the accuracy using a virtual mannequin. *Sensors*, 15(1), 1785-1803.

Plantard, P., Shum, H. P. H., Le Pierres, A. S., & Multon, F. (2017). Validation of an ergonomic assessment method using Kinect data in real workplace conditions. *Applied Ergonomics*, 25, 562-569.

Shackel, B., Chidsey, K. D., & Shipley, P. (1969). The assessment of chair comfort. *Ergonomics*, 12(2), 269-306.

Sheard, S., Pethybridge, R., Wright, J., & McMillan, G. (1996). Back pain in aircrew: An initial survey. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 67(5), 474-477.

Simpson, P. a., & Porter, J. M. (2003). Flight-Related Musculoskeletal Pain and Discomfort in General Aviation Pilots From the United Kingdom and Ireland. *The International Journal of Aviation Psychology*, 13(3), 301-318.

Thomae, M., Porteous, J., Brock, J., Allen, G., & Heller, R. (1998). Back pain in Australian military helicopter pilots: A preliminary study. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 69(5), 468-473.

Xu, X., Robertson, M., Chen, K. B., Lin, J., McGorry, R. W. (2017). Using the Microsoft Kinect to assess 3-D shoulder kinematics during computer use. *Applied Ergonomics*, 65, 418-423.

Zacharkow, D. (1988). *Posture: Sitting, standing, chair design and exercise*. Springfield, IL: Thomas.

Zhang, L., Helander, M. G., & Drury, C. G. (1996). Identifying factors of comfort and discomfort in sitting. *Human factors*, 38(3), 377-389.