



Université  
de Toulouse

# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

---

**Présentée et soutenue par :**

**Bénédicte Schmitt**

le jeudi 12 juin 2014

**Titre :**

Conception de Techniques d'Interaction Mixtes dédiées aux Environnements  
Virtuels Hétérogènes : Approche centrée sur les usages et guidée par les  
modèles

---

**École doctorale et discipline ou spécialité :**

ED MITT : Image, Information, Hypermedia

**Unité de recherche :**

Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT) - UMR 5505

**Directeur(s) de Thèse :**

Emmanuel Dubois, Directeur de thèse

Mathieu Raynal, Co-encadrant

Cédric Bach, Co-encadrant

**Jury :**

Franck Poirier, lab-STICC, Rapporteur

Pascal Salembier, Université de Technologie de Troyes, Rapporteur

David Croenne, Global Vision Systems, Invité

*A mes parents*



## Remerciements

Il y a un an encore, après un break dans la thèse et un changement de vie professionnelle, je ne pensais pas que je pourrais mener à bien ce projet qui me semblait un peu fou. Sans frustration particulière à cette époque de ne pas avoir soutenu, je réalise à présent l'importance que la soutenance a à mes yeux et de la fierté que j'éprouve à pouvoir partager et présenter mes travaux de thèse. Je me suis finalement rendue compte que ces 3 ans m'avaient beaucoup marquée et faisaient indéniablement partie de moi. Cette expérience qui m'a permis de grandir n'aurait pu être aussi riche sans toutes les personnes que j'ai rencontrées et qui m'ont beaucoup apportées. J'espère que je réussirai cet exercice que sont les remerciements sans oublier personne, car je ne voudrais en aucun cas les froisser.

Tout d'abord, je tenais à remercier Franck Poirier et Pascal Salembier, qui m'ont fait l'honneur d'être mes rapporteurs. Je vous remercie pour le soin que vous avez pris à lire mon mémoire et pour le temps que vous m'avez accordé. Merci pour vos commentaires qui m'ont permis de regarder mon travail sous un autre angle.

Je souhaiterais désormais remercier ceux qui ont donné vie à ce sujet de thèse et qui y ont consacré tant de temps et d'énergie. Je voudrais tout particulièrement remercier Emmanuel Dubois qui m'a accompagnée et supportée pendant ces 3 ans et j'espère avoir pu profiter de toute son expérience et de sa rigueur. J'espère également pouvoir mettre à contribution dans mes travaux futurs, qu'ils soient de recherche ou pas, la méthodologie dont il sait faire preuve et qui est nécessaire pour réaliser un travail de qualité. Comme dans tout travail de thèse, j'ai pu douter de moi et de mon travail, mais merci Manu de m'avoir accordé ta confiance pour finaliser ces 3 ans de thèse et de me donner l'opportunité de la soutenir. Merci à Mathieu Raynal d'avoir été présent pendant ses années de thèse, de m'avoir accompagnée et d'avoir partagé avec moi son savoir sur les méthodes d'évaluation. Enfin, merci à Cédric Bach de m'avoir apporté ses connaissances afin d'établir des protocoles expérimentaux dans les règles de l'art.

Au cours de ces 3 ans à l'IRIT, j'ai pu évoluer dans une équipe de personnes passionnées et je souhaitais notamment remercier Olivier pour avoir partagé avec moi son expérience et sa vision de la vie. J'ai également pu connaître des moments inoubliables où les rires étaient souvent présents avec Louis-Pierre et Christophe. Merci les garçons pour votre écoute et votre soutien. Enfin, merci à toute l'équipe pour la place que vous m'avez accordée et pour votre accueil chaleureux.

J'ai également pu faire la connaissance de Martine Labruyère qui m'a aidée dans les démarches administratives et sans elle, je n'aurais peut-être jamais pu mener à bien cette dernière année de thèse. Merci du temps que tu m'as accordé et de ta bienveillance.

J'ai réalisé ma thèse par le biais d'une bourse CIFRE et ainsi intégrer Global Vision Systems (GVS). Je tenais à remercier Baptiste Gendron Canion et David Croenne de m'avoir accueillie dans leur société et de m'avoir donné l'opportunité de participer à leur ambition d'innover.

Au sein de GVS, j'ai bénéficié d'une très bonne ambiance et j'ai pu y croiser un grand nombre de personnes incroyables, dont : Guillaume, Olivier, Jonathan, Myriam, Philippe, Frédéric, Romain, Harold et Vincent (j'en oublie certainement, ne m'en tenez pas rigueur...). J'ai également pu rencontrer Sonia qui m'a soutenue et encouragée, Stéphane qui m'a apportée son expérience et sa sagesse et Julien qui m'a supportée et (longuement) écoutée. A votre façon, vous avez contribué à cette thèse et je vous remercie pour votre enthousiasme et votre soutien sans faille.

Depuis un peu plus d'un an, j'ai intégré une nouvelle société dans laquelle j'ai rencontré des collègues qui m'ont encouragée à concrétiser ce projet. Même s'ils n'ont partagé avec moi que la dernière ligne droite (et non la moins importante), merci tout particulièrement à Aurore, Noémie, David, Mickael, Marc, Florent et Guillaume pour l'intérêt que vous avez porté à mes travaux de thèse.

Christophe (alias CC) a été mon premier maître de stage en informatique et il a eu la lourde tâche de m'accompagner dans mes premiers pas dans ce milieu qui m'était alors inconnu. Je le remercie pour toute l'attention qu'il me porte depuis près de 8 ans et surtout du soutien dont il fait preuve pour me donner toute confiance en mes capacités.

Je tenais également à remercier Mathieu et Aurélien pour leur enthousiasme et leur présence depuis toutes ces années. J'ai également une pensée toute particulière pour Coralie, qui malgré la distance, m'a toujours épaulée. J'ai apprécié tous les moments que j'ai partagés avec toi et qui m'ont permis de décrocher de la thèse quand il le fallait. Merci pour être à mon écoute depuis toutes ces années.

La thèse a également été pour moi l'occasion de rencontrer deux filles formidables : Anke et Célia. Je vous remercie pour tous les conseils que vous m'avez prodigués et j'espère que malgré les chemins assez différents que nous allons emprunter, notre amitié ne fera que se renforcer. Une petite note particulière à Anke qui a su me guider lorsque j'en avais le plus besoin, merci encore.

Je termine ces remerciements par ceux qui comptent le plus pour moi, qui m'acceptent telle que je suis et qui ne me jugent jamais dans mes choix, quels qu'ils soient.

Merci à Florine, Céline et Mathieu pour l'intérêt que vous avez porté à mes travaux et pour l'énergie que vous m'avez apportée. Mathieu, tu réussis toujours à me faire relativiser les situations que je vis et merci pour ton aide lors de toutes ces années.

Enfin, je voulais remercier du fond du cœur mes parents. Je crois que les mots ne suffisent pas pour vous exprimer toute la gratitude que je ressens et je pense que vous ne pouvez imaginer la force que vous avez su m'insuffler pendant la thèse. Sans vous, je n'aurais pu croire en mes capacités à réussir et je n'aurais certainement jamais pensé un jour soutenir ma thèse. Il n'y a rien de plus beau pour moi que de vous rendre fiers, et j'espère que je serai toujours à la hauteur de vos espérances.



# Table des matières

Table des illustrations	10
Table des tableaux	12
I Introduction	14
I.1 S'unir pour innover	14
I.2 Techniques d'interaction en pleine évolution	16
I.3 Objectifs de thèse et approches adoptées	18
I.4 Structure du mémoire	20
I.5 Bibliographie	22
II Analyse Fonctionnelle Du Système	24
II.1 Description de MyTest-EasySensorManager	25
II.1.1 Présentation du système	27
II.1.2 Différents utilisateurs du système	28
II.2 Etude détaillée de MyTest-EasySensorManager	29
II.2.1 Fonctions présentes dans MyTest-EasySensorManager	29
II.2.2 Tâches d'interaction présentes dans le système	32
II.3 Bibliographie	34
III Méthodes D'évaluation En Environnement Complexe	36
III.1 Multiplicité des méthodes d'évaluation de l'utilisabilité	37
III.1.1 Méthodes d'évaluation utilisées en EV	40
III.1.2 Bilan	47
III.2 Méthodes d'évaluation de la tâche de pointage	50
III.2.1 Evaluation classique de la tâche de pointage	50
III.2.2 Méthodes d'évaluation ad-hoc	55
III.2.3 Bilan	62
III.3 Bibliographie	64
IV Adaptation D'un Standard A Un Contexte Hétérogène	68
IV.1 Unification de l'évaluation de la tâche de pointage en Environnement Virtuel 3D	70
IV.1.1 Introduction	70
IV.1.2 Adaptation de la norme ISO 9241-9 à la tâche de pointage en 3D	71
IV.1.3 Utilisation concrète de l'adaptation à la norme et résultats de l'évaluation	79

IV.1.4 Mesures quantitatives	83
IV.1.5 Mesures qualitatives	87
IV.1.6 Conclusion	89
IV.2 Adaptation de la norme ISO 9241-9 à la tâche de pointage en 2D/3D	91
IV.2.1 Introduction	91
IV.2.2 Méthodes de mesure des variables	93
IV.2.3 Adaptation du standard d'un point de vue performance	99
IV.2.4 Adaptation de la norme pour les aspects qualitatifs	116
IV.2.5 Instrumentation	118
IV.2.6 Synthèse	119
IV.2.7 Présentation du cas d'étude et du protocole d'expérimentation	121
IV.2.8 Conclusion	126
IV.3 Bibliographie	128
V Prototypage « Léger » Pour Manipuler Des Données Complexes	130
V.1 Contexte de la situation actuelle	131
V.1.1 Présentation de la situation actuelle	131
V.1.2 Description des techniques d'interaction actuellement utilisés et des tâches d'interaction courantes	131
V.1.3 Verrous actuels	131
V.2 Description de la solution proposée	132
V.2.1 Objectifs et intérêt de la future solution	132
V.2.2 Acteurs concernés	132
V.2.3 Fonctionnalités du système	133
V.3 Conception du prototype léger	136
V.3.1 Choix de la solution apportée	136
V.3.2 Contraintes techniques	140
V.3.3 Présentation générale de la solution	142
V.3.4 Apport de la situation d'interaction et discussion	146
V.4 Discussion	148
V.5 Bibliographie	149
VI Conclusion et perspectives	151
VI.1 Conclusion	151



VI.2 Perspectives .....	153
VI.3 Bibliographie .....	155
Annexes .....	157
A. Questionnaires pour l'évaluation d'une tâche de pointage en situation hétérogène 2D / 3D .....	157
A.1. Questionnaire sur le confort .....	161
A.2. Questionnaire de satisfaction .....	163
A.3. Questionnaire de satisfaction globale .....	164
B. Tâches d'interaction de EasySensorManager .....	165
C. Spécifications détaillées du prototype léger .....	174
C.1. Story-Board de la mise en œuvre de la solution .....	174
C.1.1. Description du cas d'utilisation « PlacerCapteur » .....	174
C.1.2. Description du cas d'utilisation « AjouterCommentPoint » .....	177
C.1.3. Description du cas d'utilisation « PlacerMeasureTools » .....	180
C.1. Exigences fonctionnelles .....	183
C.2. Exigences non-fonctionnelles .....	184
Bibliographie .....	187

# Table des illustrations

Figure 1: Exemples de réalité augmentée proposée par Lego (a), de réalité virtuelle à Laval (b) et d'interaction tangible avec la ReacTable (c) .....	15
Figure 2: Exemple d'un système interactif à multi-vues de GVS .....	16
Figure 3: Exemple d'un système à multi-vues coordonnées - Visdom .....	17
Figure 4: Etapes de réalisation des travaux de thèse .....	20
Figure 5: Structure globale du mémoire .....	21
Figure 6: Gestion des campagnes de test à l'aide du système proposé par GVS .....	25
Figure 7: Maquette numérique de l'avion à instrumenter .....	26
Figure 8: Modèle concret de l'A350 qui passera au banc d'essai et subira les différents tests .....	26
Figure 9: Configuration principale du système .....	27
Figure 10: Exemples de configuration de l'application permettant l'affichage de la vue 3D, de la vue sous forme d'arbre mais également de la vue détaillée des capteurs et de la vue sous forme de table. ....	32
Figure 11: Exemples de configuration de l'application permettant l'affichage de la vue planning mais également de la vue des interventions .....	33
Figure 12 : Classification des méthodes d'évaluation.....	41
Figure 13 : Approche adoptée par Bowman et Hodges (1999).....	42
Figure 14 : Approche de Gabbard, Hix et Swan (1999).....	44
Figure 15 : Critères ergonomiques adaptés aux EVs .....	47
Figure 16: Illustration de la distance effective mesurée d'après le point de départ et le point d'arrivée de la tâche de pointage et de la taille effective (Teather et al., 2009). .....	52
Figure 17. Environnements de test des études de Teather et al. : Interaction sur un plan vertical (à gauche) et sur un plan horizontal (à droite).....	55
Figure 18. Environnements d'évaluation des études (1) Translation d'une sphère de petite taille dans une cible plus grande, (2) Translation d'un cube le plus proche possible d'un autre cube et (3) Positionnement et alignement d'un tétraèdre dans un tétraèdre cible de même taille. ....	56
Figure 19 : Environnements d'expérimentation pour la partie 2D (a) et pour la partie 3D (b) .....	58
Figure 20 : Environnements d'expérimentation pour la partie 2D (a) et pour la partie 3D (b) .....	59
Figure 21: Scène 3D utilisée lors de l'évaluation de la tâche de pointage sur cible dynamique dans un EV 3D dense .....	61
Figure 22: Configuration utilisée lors de l'évaluation de la tâche de pointage dans un EV 3D.....	62
Figure 23. Exemple d'un contact entre le curseur et la cible .....	72
Figure 24. Disposition des cibles pour une tâche de pointage réalisée en 2D (à gauche) et en 3D (à droite) .....	72
Figure 25. Exemple de coordination au cours d'une tâche de pointage.....	74
Figure 26. Illustration de l'instrumentation : disposition des cibles sur le support et illustration de la profondeur entre les cibles dans la scène 3D .....	77
Figure 27. Illustration de la mesure de la distance entre deux points dans une maquette numérique dans l'application EasySensorManager .....	80
Figure 28. Posture des utilisateurs manipulant les deux techniques d'interaction qui sont le SpaceNavigator, dispositif isométrique (gauche) vs. le Polhemus Patriot, dispositif isotonique (droite). .....	82
Figure 29. Régression linéaire MT vs ID .....	85
Figure 30. Régression linéaire MT vs ID sans les cibles situées à une distance de 750px. Il reste donc 6 IDs obtenus (1.89, 2.24, 2.8, 3.19, 3.61, 4.24) par la combinaison des tailles (25,40 et 55) et des distances (150 et 450) .....	85

Figure 31: Echelle définie dans (Bangor, Kortum, & Miller, 2008) afin de déterminer le classement et l'applicabilité générale donnée par le score SUS .....	88
Figure 32 : Illustration des phases initiale et finale.....	94
Figure 33 : Illustration de 3 types de point de passage (par le milieu, en privilégiant la 2D, en privilégiant la 3D) .....	96
Figure 34 : Illustration d'une zone de passage pour un bloc avec la possibilité de mesurer un point moyen de passage .....	96
Figure 35 : Illustration de De et Du .....	97
Figure 36 : Illustrations des différents types d'ajustement (en Y, en X, en Z) .....	98
Figure 37 : Présentation de la disposition des cibles 2D et 3D sur les supports circulaire et sphérique ----	100
Figure 38 : Détail des différents éléments à prendre en compte dans le calcul du RDE .....	107
Figure 39 : Distances mesurées lors de l'expérimentation .....	111
Figure 40 : Panneau de configuration de l'expérimentation en 2D/3D .....	118
Figure 41 : Illustration de l'état de la cible de départ et d'un contact entre le curseur et une cible 2D.....	119
Figure 42 : Illustration d'une tâche de pointage hétérogène dans un environnement 2D/3D .....	121
Figure 43 : Polhemus Patriot .....	124
Figure 44 : SpaceNavigator .....	124
Figure 45 : Illustration de l'utilisation de la technique d'interaction.....	126
Figure 46: Vue fonctionnelle du futur prototype .....	132
Figure 47 : Diagramme de cas d'utilisation .....	133
Figure 48: Mise en œuvre de la méthode MACS avec l'éditeur tangible et les légendes utilisées pour comprendre les composantes du modèle ASUR .....	136
Figure 49 : Mindmap de la séance de créativité.....	137
Figure 50: Modèle ASUR représentant la solution n°9 .....	137
Figure 51: Modèle ASUR représentant la solution n°5 .....	137
Figure 52: Modèle ASUR représentant la solution n°12 .....	138

# Table des tableaux

Tableau 1 : Fonctions et tâches présentes dans MyTest-EasySensorManager .....	29
Tableau 2 : Méthodes d'évaluation classées par l'implication utilisateur .....	39
Tableau 4 : Caractéristiques des différentes évaluations .....	57
Tableau 5. Synthèse de notre adaptation à la norme 9241-9 pour le pointage en EV 3D.....	78
Tableau 6 : Synthèse des analyses en fonction des caractéristiques de la tâche .....	95
Tableau 7: Liste des mesures de l'expérimentation associées aux critères .....	102
Tableau 8 : Liste des variables dépendantes associées aux mesures .....	102
Tableau 9 : Synthèse de notre adaptation à la norme 9241-9 pour la tâche de pointage hétérogène 2D/3D .....	120
Tableau 10 : Tableau de synthèse sur la solution retenue pour l'utilisation des techniques.....	126
Tableau 12: Tableau récapitulatif des solutions issues de la séance de créativité .....	139



# I Introduction

Depuis plusieurs décennies, des systèmes avancés ont émergé afin de proposer des interactions toujours plus proches des interactions naturelles des utilisateurs avec son environnement physique, et aussi lui offrir une expérience plus riche. En parallèle, l'usage de la 3D s'est largement démocratisé, se multipliant dans les domaines professionnels et atteignant le web, les musées et les dispositifs mobiles. Pour contribuer à cette démocratisation, mes travaux de thèse proposent d'investiguer le large champ de l'évaluation des interactions avancées utilisées dans des contextes 3D afin de comprendre l'enjeu d'apporter aux utilisateurs des techniques d'interaction adaptées à leur contexte d'utilisation et à leurs contraintes.

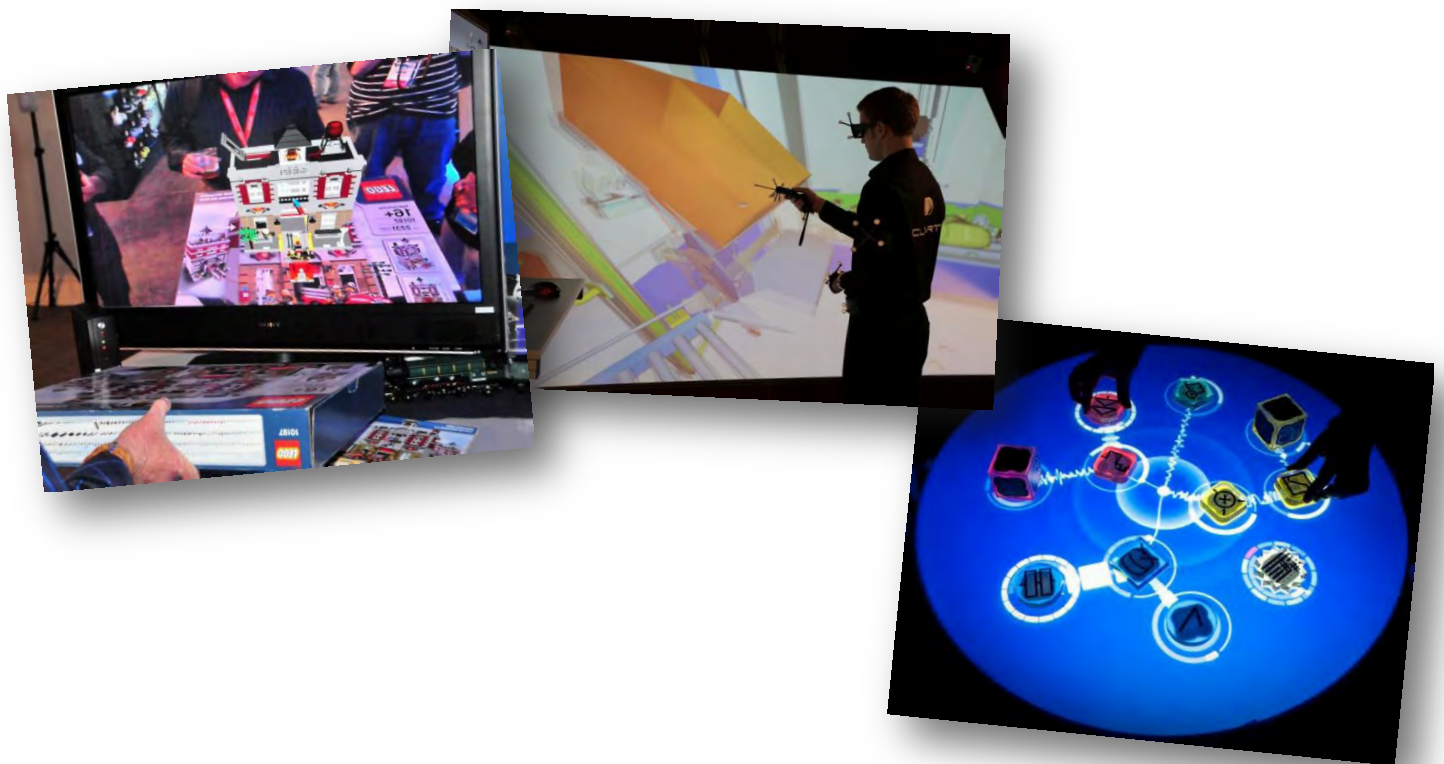
Ces nouvelles interactions en 3D intéressent de façon importante le milieu industriel du fait de ses grandes possibilités et de la complexité croissante des informations à traiter. Cette thèse a ainsi été réalisée dans un contexte double : il a permis d'apporter des contributions scientifiques, accompagnées par le laboratoire de recherche IRIT, et de répondre à une problématique industrielle apportée par une start-up souhaitant inclure de l'innovation dans ses logiciels. Les travaux de thèse ont ainsi croisé les compétences scientifiques de l'équipe ELIPSE du laboratoire IRIT et les ambitions de la société GVS dans le cadre d'un contrat CIFRE co-financé par l'ANRT.

## I.1 S'unir pour innover

---

Intégrée à l'équipe ELIPSE, spécialisée dans la conception et l'évaluation d'interactions homme-machine, et plus particulièrement de systèmes avancés, nous avons ainsi eu l'opportunité d'étudier l'impact des systèmes avancés sur les interactions de l'utilisateur avec ces systèmes. Les systèmes avancés incluent un ensemble de systèmes en émergence : les systèmes de Réalité Virtuelle (RV), ceux de Réalité Augmentée (RA) et les interactions tangibles (TUI). La RV est un environnement ou un espace où un ou plusieurs utilisateurs interagissent avec des données numériques 3D par des le biais de moyens physiques (Milgram & Kishino, 1994) - (Loeffler & Anderson, 1994). La RA est parfois définie comme prenant le contre-pied de l'approche immersive de la RV, et se propose d'utiliser l'ordinateur pour simplement augmenter le monde réel des utilisateurs (Wellner, Mackay, & Gold, 1993). Selon Mackay (Mackay, 1998), la RA est une manière de *permettre aux gens de tirer parti de leurs compétences dans l'interaction avec le monde de tous les jours, tout en profitant de la puissance des réseaux informatiques*. Quant aux TUI, elles ont pour objectif que l'humain manipule de façon plus directe des informations numériques ajoutées aux objets et environnements physiques de tous les jours (Ishii & Ullmer, 1997). L'étude de ces systèmes avancés est désormais en phase de maturation, et l'équipe ELIPSE s'efforce de développer

des méthodes de conception et d'évaluation appropriées aux systèmes avancés en s'appuyant sur les besoins des utilisateurs et en modélisant leurs usages avec ces systèmes.



(a)

(b)

(c)

Figure 1: Exemples de réalité augmentée proposée par Lego (a), de réalité virtuelle à Laval (b) et d'interaction tangible avec la ReactTable (c)

Au sein de GVS, nous avons découvert des systèmes interactifs à multi-vues combinant des vues 3D avec d'autres types de données (cf. Figure 2) afin de faciliter l'accès aux données et de rendre la visualisation des différentes informations plus simple pour l'utilisateur. Leurs systèmes peuvent également proposer la supervision en temps réel de différents paramètres d'un système complexe (e.g. satellite, barrage). Dans un milieu où les contraintes décisionnelles sont fortes et les enjeux importants, il est nécessaire d'interpréter et d'analyser correctement les données hétérogènes présentes dans les différentes vues du système. La manipulation, l'exploration et l'interaction avec des données hétérogènes rendent possible l'alignement entre la signification des données apportées par le système et la représentation qu'ont les utilisateurs de ces mêmes données. Les systèmes de GVS doivent ainsi offrir à leurs utilisateurs une utilisabilité forte en impliquant l'utilisateur dans la réalisation de sa tâche.

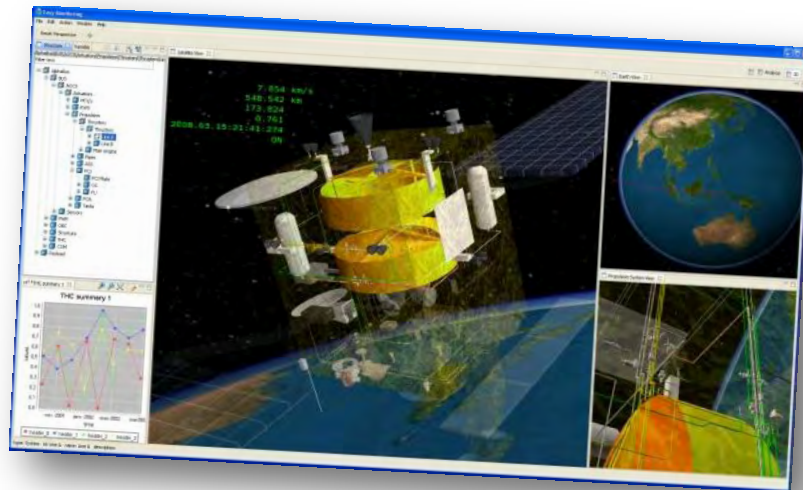


Figure 2: Exemple d'un système interactif à multi-vues de GVS

La combinaison des compétences scientifiques de l'équipe ELIPSE qui propose une approche multidisciplinaire et des ambitions de la société GVS a pour objectif de concevoir un système utilisable et adapté aux usages et contraintes des utilisateurs. En se basant sur des systèmes interactifs avancés, qui rendent possible la manipulation d'objets physiques dans un espace 3D, l'alignement des espaces d'interaction en entrée (interaction avancée) et en sortie (visualisation hétérogènes) doit contribuer à favoriser la combinaison de l'accès aux données visualisées principalement en 3D et des actions réalisées par les utilisateurs pour interagir avec ces données. La solution apportée devrait ainsi permettre aux utilisateurs de manipuler directement ces données et d'améliorer l'efficacité de son analyse.

## 1.2 Techniques d'interaction en pleine évolution

Les Environnements Virtuels 3D (EV 3D) ont émergé dans différents domaines pouvant aller des jeux (Duke Nukem ou encore Prince of Persia) aux applications industrielles, telles que des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG, comme ArcGIS de Esri), la Conception Assistée par Ordinateur (CAO, comme Catia de Dassault Systèmes), etc. Un EV 3D peut être défini comme « *un espace où un ou plusieurs utilisateurs interagissent en temps réel à travers des moyens physiques et des dispositifs, avec des données 3D générées par un ordinateur* » (Bach & Scapin, 2003). Ces environnements peuvent être soit immersifs, tels que des systèmes basés sur la vision stéréoscopique ou encore les systèmes CAVEs utilisés en Réalité Virtuelle, soit non-immersifs et ainsi afficher les informations sur des écrans de bureau. Notre étude s'intéresse plus particulièrement aux EV 3D non-immersifs : ils ne requièrent pas un espace de travail dédié, ils peuvent être utilisés en situation de travail de bureau, ils s'adressent à un public plus large et ne nécessitent pas l'utilisation de technologies dédiées ou coûteuses. Pour tirer pleinement avantage de ces vues 3D, des



travaux ont porté sur l'utilisation conjointe de celles-ci avec d'autres types de vues (cf. Figure 3), comme avec de la 2D. Ces travaux s'inscrivent dans les études menées sur les systèmes à multi-vues coordonnées, où l'utilisation de plusieurs vues a pour objectif de faciliter la manipulation et la compréhension de données complexes en proposant différents points de vue sur ces données. Il émerge alors de ces systèmes une hétérogénéité due aux espaces d'affichage, aux données et aux représentations utilisées : ils sont de types variés et de tailles différentes, les données représentées forment alors des environnements de perception complexes. De plus, cette hétérogénéité des données visualisées induit alors une complexité dans les interactions de l'utilisateur.

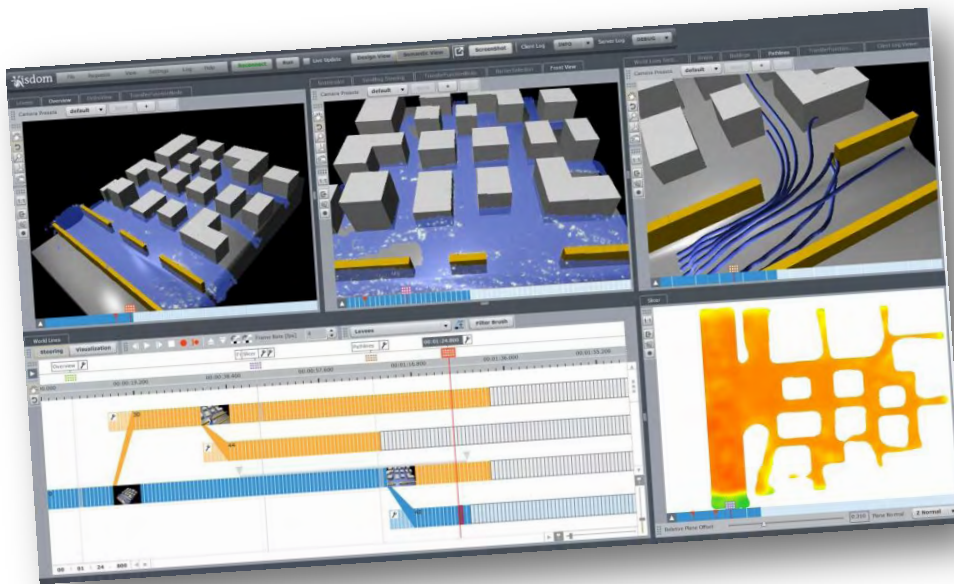


Figure 3: Exemple d'un système à multi-vues coordonnées - Visdom

Pour répondre à ces besoins en interactions, de nouvelles technologies, telles que la Wiimote et la Kinect, sont récemment apparues auprès du grand public : ces technologies constituent des formes d'interaction avancées et rencontrent un grand succès auprès des utilisateurs. Majoritairement destinées à des applications de jeux, l'étude de (Gallo, De Pietro, & Marra, 2008) a montré qu'elles s'avèrent également adaptées à une utilisation en EV 3D. Avant tout vouées à des situations ludiques et grand public, ces formes d'interaction avancée doivent prioritairement s'avérer satisfaisantes et confortables. Dans des contextes plus professionnels, des dispositifs dédiés, tels que la Rockin'Mouse (Balakrishnan, Baudel, Kurtenbach, & Fitzmaurice, 1997), la Cubic Mouse (Froehlich & Plate, 2000), ont été proposés pour offrir des formes d'interaction avancées avec des environnements 3D. Mais ils sont encore peu répandus et ne font pas partie des dispositifs d'interaction bien acceptés pour ces activités. Ce sont finalement des dispositifs classiques, tels que la souris, le joystick ou la souris 3D qui restent encore les plus utilisés, malgré une adaptation aux tâches et une adéquation limitées. Dans ces contextes professionnels, les techniques d'interaction, classiques ou avancées, doivent répondre à des besoins spécifiques tels que la précision, la

rapidité d'exécution, la robustesse et la facilité d'apprentissage. Satisfaction et degré de confort ont pourtant un rôle à jouer pour contribuer à l'acceptation des techniques du fait de leur utilisation quotidienne.

### **1.3 Objectifs de thèse et approches adoptées**

---

Pour aider à mieux concilier ces deux points de vue (efficacité et satisfaction), la maturation des formes d'interaction avancées constitue une opportunité à développer. Afin d'accompagner et de développer la mise en œuvre de forme d'interaction avancée pour interagir avec des environnements 3D ou complexes, dans des domaines grands publics et professionnels, il est en particulier nécessaire de se doter de moyens d'évaluation permettant de concilier performance et satisfaction : ces moyens sont nécessaires pour permettre de mesurer et comparer selon différents points de vue complémentaires les techniques d'interaction avancée.

Le contexte de la thèse étant double, les objectifs des travaux de thèse le sont également. En effet, d'un point de vue scientifique, l'interaction des utilisateurs avec un environnement hétérogène fera l'objet d'une étude afin de comprendre l'enjeu de proposer une solution qui implique l'utilisateur dans la réalisation de sa tâche et qui l'amène à manipuler directement des données hétérogènes et complexes. L'évaluation de techniques d'interaction est un champ d'étude qui permet de mesurer l'adéquation entre une solution et un contexte particulier. L'objectif est ainsi de définir des mesures de performance et d'utilisabilité qui permettront de déterminer l'adaptation d'une technique d'interaction avec un environnement entièrement ou partiellement 3D. D'un point de vue industriel, l'enjeu de la thèse est de concevoir une solution d'interaction adaptée aux contraintes industrielles et aux usages des utilisateurs, c'est-à-dire à la situation d'interaction.

Pour y parvenir, nous avons choisi d'adopter une approche centrée sur des tâches d'interaction élémentaires, i.e. constitutives des tâches de haut niveau que sont la navigation, la sélection et la manipulation. L'intérêt est double. Tout d'abord, cette approche permet de traiter des situations atomiques et par conséquent, facilement comparables et reproductibles. De plus, les recommandations construites sur la base d'une tâche élémentaire pourront ensuite être agrégées et prises en compte dans la conception de techniques d'interaction pour des tâches de plus gros grains. Par ailleurs, l'intérêt de se concentrer prioritairement sur des expérimentations de techniques d'interaction en EV 3D pour une tâche élémentaire est conforté par une étude de (Masliah, 2001). Celle-ci a révélé l'intérêt de décomposer l'évaluation de la tâche de manipulation par l'évaluation séparée des deux sous-tâches définies par Bowman (Bowman D. , 1999): une tâche de translation (spécification d'une position) et une tâche de rotation (spécification d'une orientation). En effet, les utilisateurs les considèrent comme deux tâches différentes ; cette étude renforce donc l'intérêt que représente une tâche élémentaire claire et sans biais pour les utilisateurs comme base pour l'évaluation de l'interaction en EV3D. Typiquement, le pointage, la

sélection ou encore le déplacement peuvent être considérées comme des tâches élémentaires d'un système interactif, et ceci même en 3D. La tâche de pointage est d'ailleurs une des tâches les plus répandues dans les applications : pour la 3D, elle consiste à déplacer un curseur jusqu'à un endroit spécifique, en modifiant les coordonnées en translation (tx, ty, tz) du curseur. La tâche de pointage est inhérente et sous-jacente aux tâches de sélection, qui précèdent elles-mêmes quasi systématiquement les tâches de manipulation. Certains parallèles ont d'ailleurs été dressés entre les tâches de sélection et de manipulation : les deux concernent la position d'un objet, la première la spécifie tandis que la seconde la modifie (Pan, 2008). Des recommandations extraites des évaluations de la tâche de pointage pourront donc servir comme base pour les tâches de sélection et de manipulation.

Notre approche centrée sur la prise en compte de tâches élémentaires privilégiera donc le cas de la tâche de pointage.

En résumé, l'objectif de ces travaux de thèse est de proposer un cadre d'évaluation unificateur pour l'évaluation de techniques d'interaction avancées pour la tâche de pointage en 3D ou pour des situations plus complexes comme un contexte hétérogène 2D/3D. L'unification de l'évaluation de la tâche de pointage a pour objectif de mesurer la performance et la satisfaction des utilisateurs lors de l'utilisation des techniques d'interaction avancée et de proposer des données de référence pour ces contextes particuliers d'évaluation répondant à des besoins industriels.

Comme le résume la Figure 4, nous nous attacherons donc dans un premier temps à déterminer le contexte d'interaction en étudiant les usages des utilisateurs pour le système MyTest-Easymonitoring. Les tâches d'interaction seront ainsi mises en lumière et nous pourrons sélectionner la tâche réalisée principalement en contexte hétérogène par les utilisateurs. Dans un deuxième temps, nous pourrons nous baser sur des standards et déterminer des mesures adaptées à la tâche sélectionnée afin de mener l'évaluation des techniques d'interaction, puis définir un cadre d'évaluation afin de faciliter la mise en œuvre des protocoles d'évaluation. Nous nous appuierons ainsi sur des modèles prédictifs de performance et sur des standards utilisés pour évaluer des techniques d'interaction que nous adapterons au contexte hétérogène de la situation d'interaction. La détermination de la technique d'interaction proposée à GVS sera alors basée sur des recommandations ergonomiques et sur la mise en place d'une conception participative. Les recommandations seront issues des évaluations menées d'un point de vue scientifique afin d'assurer l'adéquation entre la technique d'interaction et la situation d'interaction.

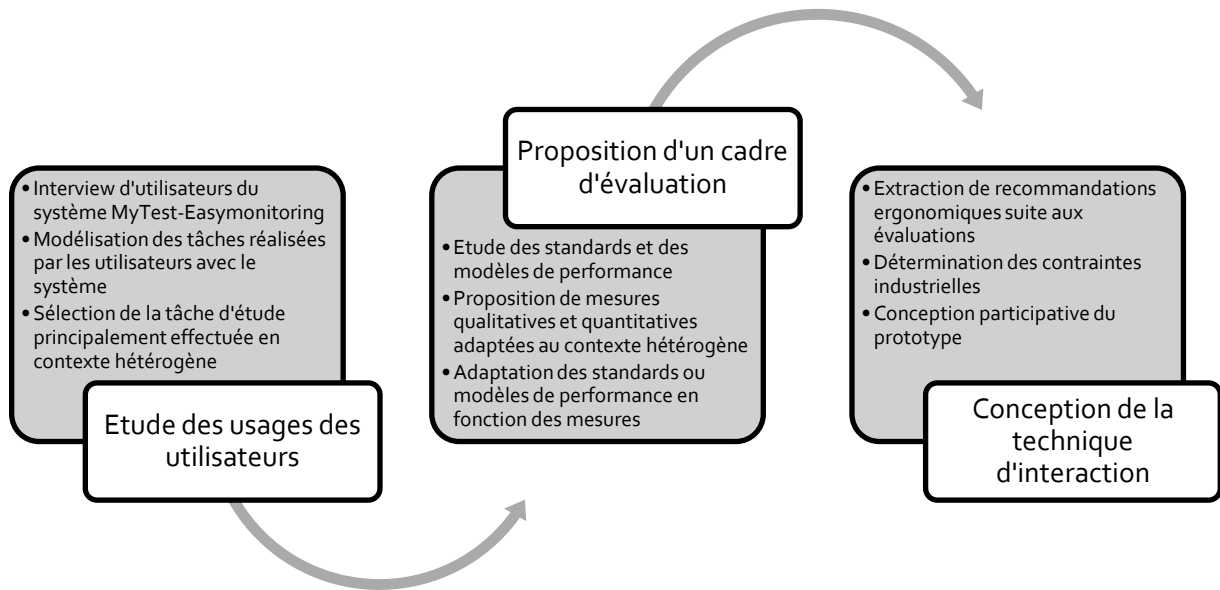


Figure 4: Etapes de réalisation des travaux de thèse

#### 1.4 Structure du mémoire

Le mémoire suit l'approche présentée dans l'introduction et est organisé autour de quatre parties (cf. Figure 5) :

- La partie 1 est consacrée à la présentation de l'objet d'étude de la thèse basée sur une analyse fonctionnelle du logiciel développé par GVS et se décompose en 2 chapitres :
  - Le 1<sup>er</sup> chapitre aborde le contexte industriel dans lequel la thèse s'est déroulée et décrit globalement le logiciel pour lequel une technique d'interaction doit être proposée.
  - Le 2<sup>ème</sup> chapitre présente de façon détaillée les caractéristiques du logiciel.
- La partie 2 comprend trois chapitres et permet de comprendre le contexte scientifique dans lequel cette thèse s'inscrit :
  - Le 1<sup>er</sup> chapitre de cette partie définit les méthodes d'évaluation dédiées à des environnements virtuels 3D ainsi que leurs mises en œuvre.
  - Dans le 2<sup>ème</sup> chapitre, les méthodes d'évaluation ad-hoc sont présentées afin de mettre en avant leurs spécificités incluant leurs atouts et leurs faiblesses.
  - Enfin, dans le 3<sup>ème</sup> chapitre, un bilan permet de comprendre les enjeux liés à ces différentes méthodes d'évaluation et celles qui s'adaptent le mieux à notre objectif scientifique.
- La partie 3 présente la contribution scientifique qui comprend deux apports majeurs :

- Le 1<sup>er</sup> chapitre de cette partie présente l'adaptation de la norme ISO 9241-9 à un environnement virtuel 3D, le protocole expérimental et une plateforme support pour évaluer des techniques d'interaction en 3D en appliquant l'adaptation de la norme ISO puis les résultats de cette évaluation.
- Le 2<sup>ème</sup> chapitre met en avant l'évolution de cette même norme pour être adaptée à un environnement virtuel hétérogène combinant de la 2D et de la 3D, ainsi que le protocole expérimental proposé afin de mener une étude dans cet environnement hétérogène.
- La partie 4 est organisée en deux chapitres afin de présenter la contribution industrielle :
  - Le 1<sup>er</sup> chapitre propose la démarche adoptée pour concevoir le prototype de la technique d'interaction.
  - Le 2<sup>ème</sup> chapitre de cette partie décrit le prototype qui répond aux contraintes industrielles et qui se base sur les résultats de l'évaluation menée d'un point de vue scientifique.

Enfin, une conclusion propose une synthèse des travaux menés et met en lumière les perspectives qui découlent de ces contributions.

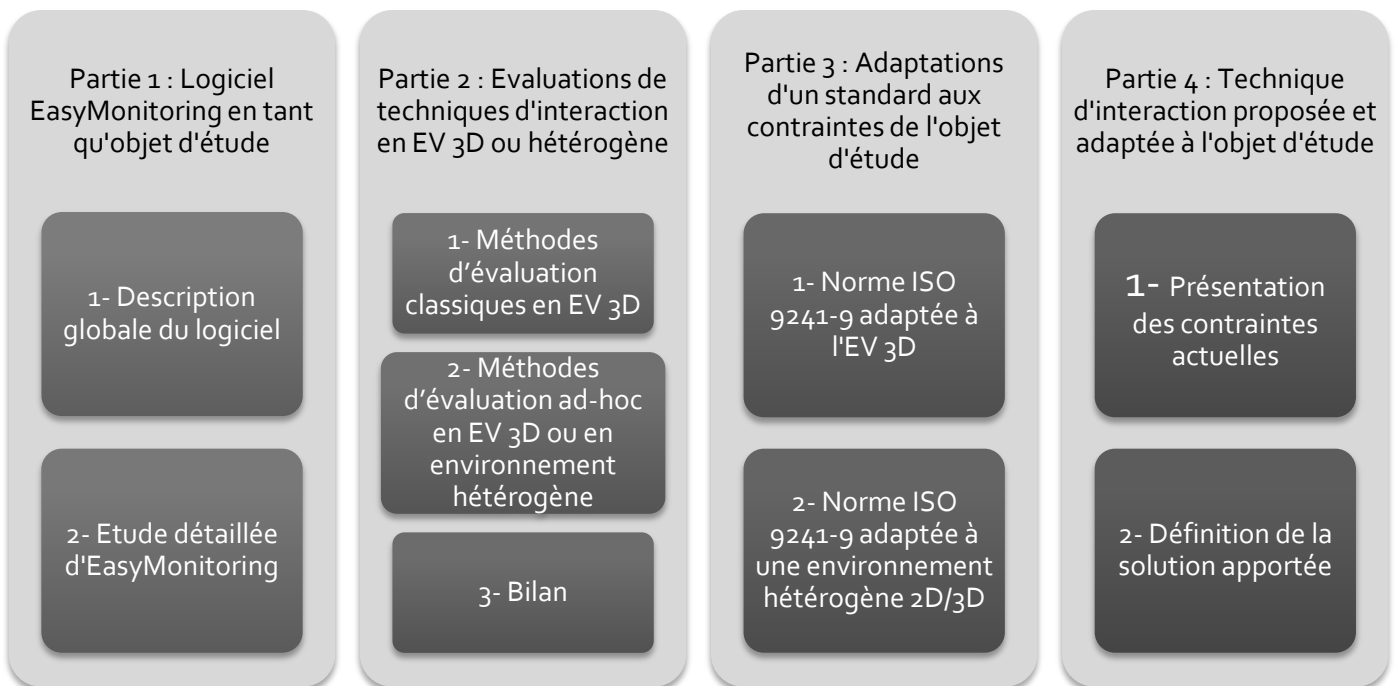


Figure 5: Structure globale du mémoire

## I.5 Bibliographie

---

- Bach, C., & Scapin, D. (2003). Ergonomic criteria adapted to human virtual environment interaction. *IHM'03*, (pp. 24-31).
- Balakrishnan, R., Baudel, T., Kurtenbach, G., & Fitzmaurice, G. (1997). The Rockin'Mouse: integral 3D manipulation on a plane. *CHI'97*, (pp. 311-318).
- Bowman, D. (1999). *Interaction techniques for common tasks in immersive Virtual Environments: Design, evaluation, and application*. Thèse de doctorat.
- Froehlich, B., & Plate, J. (2000). The cubic Mouse: a new device for three-dimensional input. *CHI'00*, (pp. 526-531).
- Gallo, L., De Pietro, G., & Marra, I. (2008). 3D interaction with volumetric medical data: experiencing the Wiimote. *Ambi-Sys'08*.
- Ishii, H., & Ullmer, B. (1997). Tangible Bits: Towards seamless interfaces between people. *CHI'97*, (pp. 234-241).
- Loeffler, C., & Anderson, T. (1994). *The Virtual Reality Casebook*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Mackay, W. (1998). Augmented Reality: Linking real and virtual worlds - A new paradigm for interacting with computers. *ACM Conference on Advanced Visual Interfaces*.
- Maslah, M. (2001). *Measuring the allocation of control in 6 degree of freedom human-computer interaction tasks*. Thèse de doctorat, Université de Toronto.
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transaction on Information Systems, Vol E77-D(12)*, 1321-1329.
- Pan, Q. (2008). *Techniques d'interactions mixtes isotonique et élastique pour la sélection 2D et la navigation / manipulation 3D*. Thèse de doctorat, Université de Lille.
- Wellner, P., Mackay, W., & Gold, R. (1993). Computer Augmented Environments: Back to the Real World. *Special issue of communications of the ACM, 36(7)*, 24-26.



## II Analyse Fonctionnelle Du Système

II.1 Description de MyTest-EasySensorManager .....	25
II.1.1 Présentation du système .....	27
II.1.2 Différents utilisateurs du système.....	28
II.2 Etude détaillée de MyTest-EasySensorManager .....	29
II.2.1 Fonctions présentes dans MyTest-EasySensorManager .....	29
II.2.2 Tâches d'interaction présentes dans le système .....	32
II.3 Bibliographie .....	34



L'analyse fonctionnelle a pour objectif d'ordonner et de valoriser les différentes fonctions du système proposé par GVS. Le système sur lequel l'analyse fonctionnelle a été réalisée est myTest-EasySensorManager, dans les premières phases de son développement.

Dans un premier temps, nous allons présenter les fonctions et tâches principales présentes dans le système, puis nous allons établir la liste des différentes tâches d'interaction par lesquelles l'utilisateur peut interagir avec le système.

## II.1 Description de MyTest-EasySensorManager

Le banc d'essai spécifique à l'A350 a pour objectif d'appliquer et d'induire des forces à la structure de l'appareil. Pour ce faire, près de 12000 capteurs sont placés sur l'appareil afin d'enregistrer l'ensemble des données de tests. Un grand nombre d'acteurs s'interfaçent pour travailler à la mise en œuvre de ce banc d'essai : le processus de mesure des données de test débute à la spécification du besoin pour se terminer par la récupération des données d'essai (cf Figure 6). Il s'agit ainsi d'un processus lourd : le but de l'application MyTest-EasySensorManager est de faciliter le travail collaboratif et de simplifier et sécuriser l'accès aux différentes données afin d'améliorer la performance des tests en gagnant du temps sur la campagne d'essais.

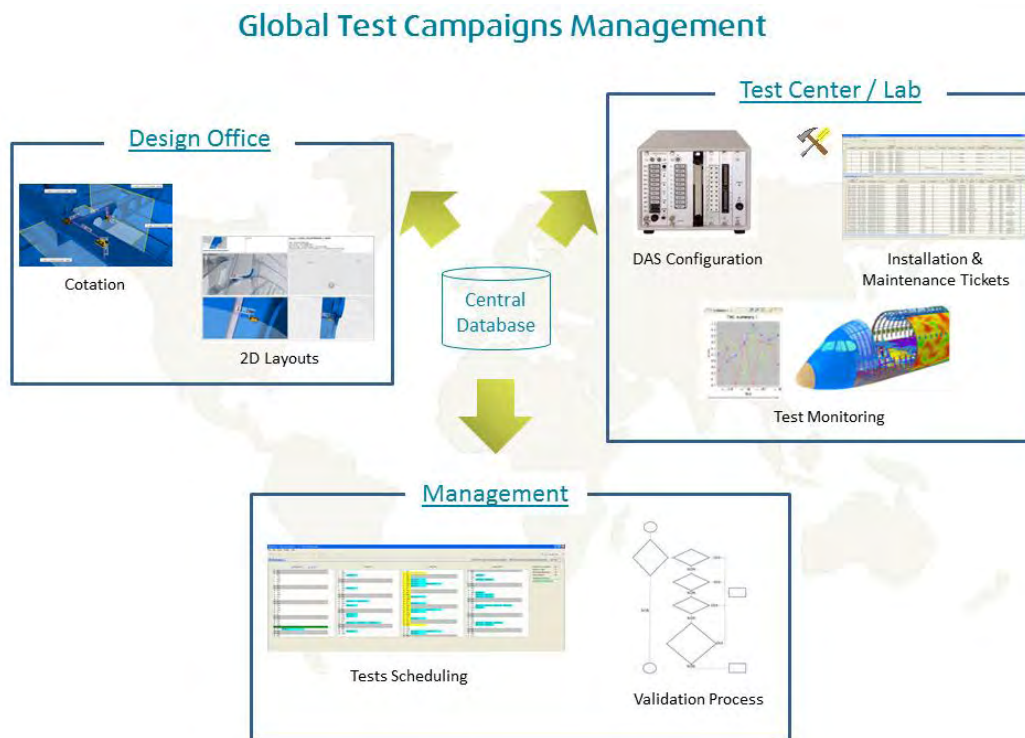


Figure 6: Gestion des campagnes de test à l'aide du système proposé par GVS

La principale originalité du système myTest-EasySensorManager est de rendre possible l'instrumentation d'une maquette numérique 3D en vue de préparer et de suivre des campagnes de tests. Mis en œuvre dans des bureaux d'études aéronautiques, tels que ceux

d'Airbus, le système propose aux utilisateurs de suivre l'ensemble du cycle de vie des outils d'instrumentation, capteurs ou jauges. Il leur est ainsi possible d'instrumenter une maquette numérique d'avion (cf Figure 7) avec des milliers de capteurs et d'établir, entre autres, les plans de pose de ces capteurs sur un avion physique concret (cf Figure 8), en garantissant la qualité de l'information présente sur les plans de pose.

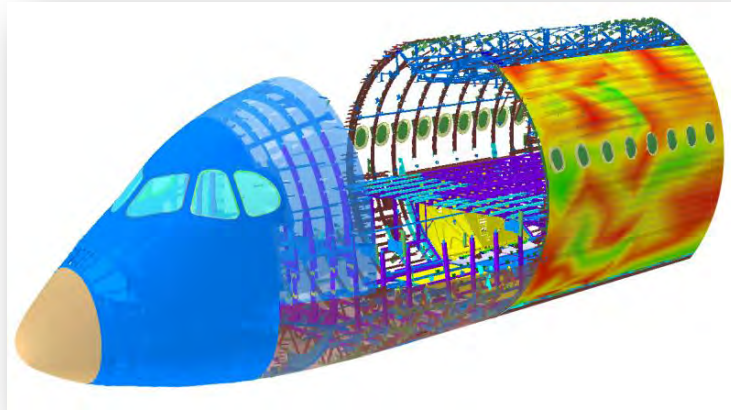


Figure 7: Maquette numérique de l'avion à instrumenter



Figure 8: Modèle concret de l'A350 qui passera au banc d'essai et subira les différents tests

### II.1.1 Présentation du système

Le système myTest-EasySensorManager est un système à multi-vues agrégeant dans plusieurs vues des données différentes provenant d'une base de données. Ce type de système utilise au moins 2 vues afin de représenter un même concept. Les vues diffèrent par leur représentation visuelle : des vues soit paramétriques, soit systèmes, ou encore 3D ou 4D sont ainsi proposées dans le système de GVS (North & Shneiderman, 1997) (cf Figure 9). Ces vues rendent possible les comparaisons et permettent, entre autres, de faciliter la mémorisation des informations (Wang Baldonado, Woodruff, & Kuchinsky, 2000). L'utilisation des multi-vues est avantageuse lorsque le nombre de données à représenter est volumineux. Elles permettent ainsi d'avoir une meilleure vue d'ensemble de ces données selon plusieurs points de vue. L'objectif est de faciliter l'accès aux données, leur compréhension et la prise de décisions. Des études ont été réalisées sur les interactions possibles sur ces vues multiples afin de faciliter la manipulation et le traitement de ces données (Roberts, 2007).

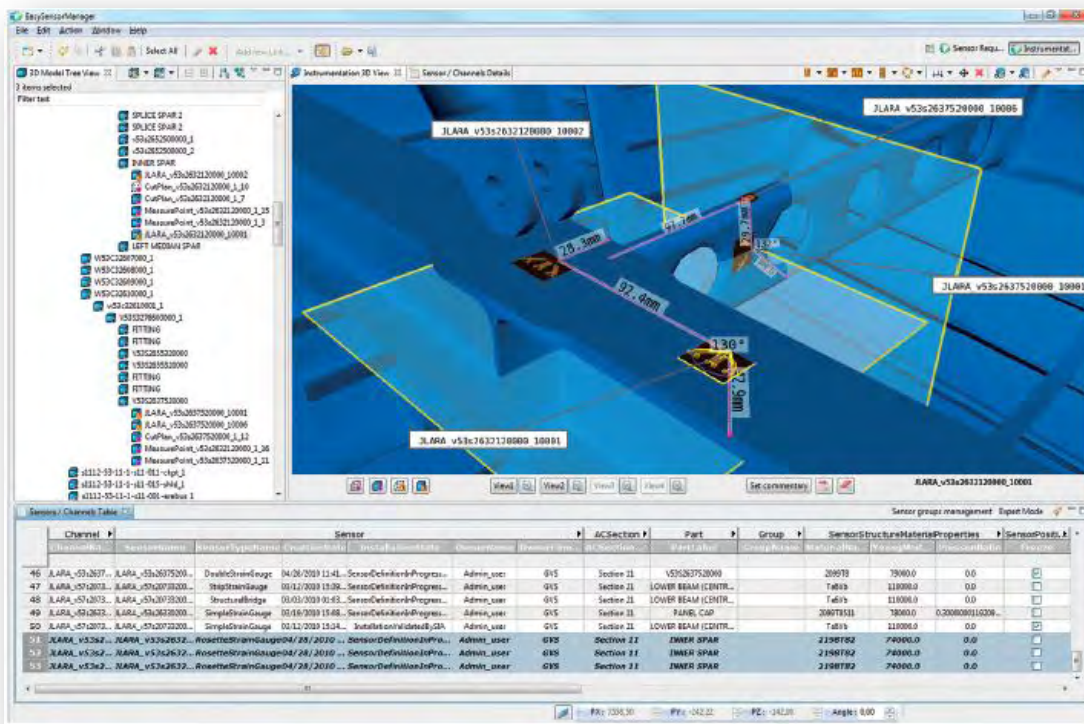


Figure 9: Configuration principale du système

Les différentes vues du système sont personnalisées/configurées en fonction du profil de l'utilisateur afin de lui proposer un accès direct aux données qui le concernent en priorité. L'utilisateur peut ajouter ou fermer des vues en fonction de son besoin afin de compléter les différentes données pour lesquelles il a déjà accès.

### **II.1.2 Différents utilisateurs du système**

Les différents utilisateurs identifiés qui participent à la mise en œuvre du processus d'instrumentation de l'appareil sont :

- Le Sensor Requestor (SR) : définit les besoins en capteurs et les place sur la maquette numérique.
- Le Sensor Definition Approver (SDA) : supervise l'équipe de sensors requestors, vérifie et valide leur travail avant de pouvoir passer à l'étape suivante.

Ces deux utilisateurs travaillent de façon étroite avec l'application et notamment avec la visualisation 3D de la maquette numérique de l'avion.

- Le Sensor Installation Approver (SIA) : supervise l'équipe d'installation, édite et vérifie la pose des capteurs sur l'avion.
- Le Sensor Installer (SI) : installe et fait la maintenance des capteurs sur l'avion.

Ces deux utilisateurs travaillent davantage sur le modèle concret de l'appareil. Toutefois, le SIA a pour rôle de contrôler la cohérence des positions et de la pose entre les capteurs définis sur les plans issus de la maquette numérique et ceux placés sur le modèle concret de l'appareil.

- Le Schedule Manager (SM) : gère les différents événements du planning, et vérifie que tout ce qui a été défini dans le plan de test a bien été mis en place.

Ces différents profils ont été identifiés en fonction des tâches réalisées dans le processus d'instrumentation de l'appareil et des responsabilités qu'ils occupent, c'est pourquoi leur intervention ne nécessite pas de traiter les informations de façon similaire.

Nous allons désormais définir les différentes fonctions présentes dans le système myTest-EasySensorManager afin de détailler davantage le rôle de chaque utilisateur.

## II.2 Etude détaillée de MyTest-EasySensorManager

### II.2.1 Fonctions présentes dans MyTest-EasySensorManager

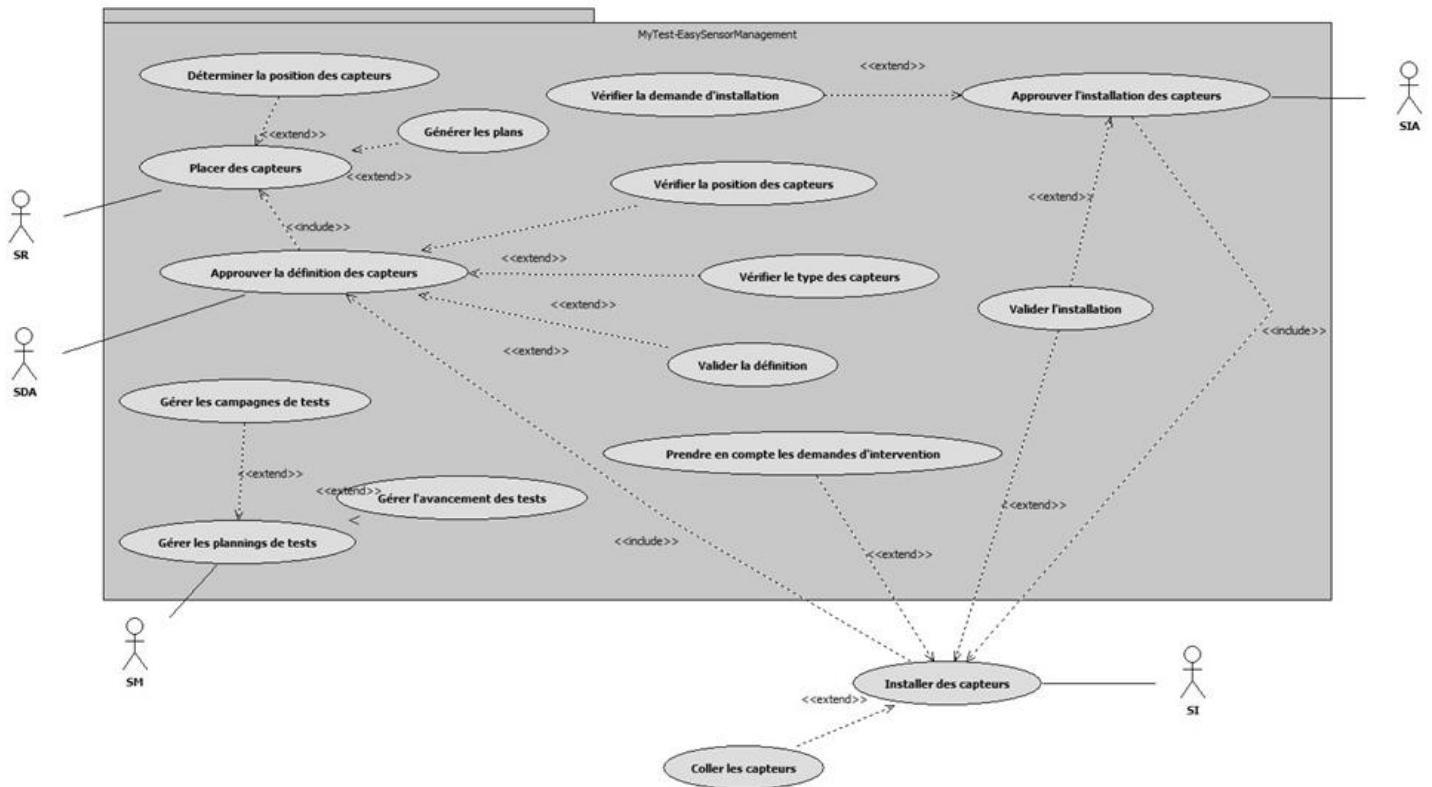
Le système MyTest-EasySensorManager permet ainsi d'instrumenter des pièces d'avion et de placer des capteurs pour tester la résistance de l'avion, la fatigue de pièces, etc... et déterminer où placer le capteur ainsi que son type.

L'ensemble des fonctions a été recensé et trié en fonction des rôles des utilisateurs (cf. Tableau 1).

Rôle	Fonction	Tâches principales
Sensor requestor (SR)	Placer des capteurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Déterminer la position et le type des capteurs</li> <li>• Générer les plans</li> </ul>
Sensor Definition Approver (SDA)	Approuver la définition des capteurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vérifier la position et le type des capteurs</li> <li>• Valider la définition</li> </ul>
Sensor Installation Approver (SIA)	Approuver l'installation des capteurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vérifier la demande d'installation</li> <li>• Valider l'installation</li> </ul>
Sensor Installer (SI)	Installer des capteurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prendre en compte les demandes d'intervention</li> <li>• Coller les capteurs</li> <li>• Valider l'installation</li> </ul>
Schedule Manager (SM)	Gérer les plannings de tests	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gérer les campagnes de tests</li> <li>• Gérer l'avancement des tests</li> </ul>

Tableau 1 : Fonctions et tâches présentes dans MyTest-EasySensorManager

Pour les 5 profils, la configuration de l'application et les vues présentées sont différentes afin d'être adaptées au mieux aux tâches qu'ils réalisent. Par exemple, le Schedule Manager ne visualise pas de vue 3D de l'avion car il gère avant tout un planning des tests, alors que la vue principale affichée au Sensor Requestor est la vue 3D.



Le processus mis en place par le biais des différentes fonctions de l'application est décrit ci-dessous selon les 5 types de profil :

*Sensor requestor - Membre du BE*

- L'utilisateur peut utiliser la vue 3D ou un fichier excel copié-collé dans l'application.
- En **manipulant** la vue 3D, il peut visualiser la pièce, d'après un point de vue sur la pièce adéquat pour poser le sensor. Il peut sélectionner un sensor en cliquant sur un bouton puis directement cliquer sur la pièce dans la 3D pour le poser.
- Il peut **modifier** le sensor soit en le déplaçant s'il était mal positionné, soit en le tournant pour l'orienter dans la bonne direction. Pour s'aider, il peut utiliser des quotation objects :
  - Measure points – measure lines pour relier deux objets ensemble et pour calculer la distance entre deux points
  - Cutplanes: pour faciliter l'alignement dans l'environnement 3D, il peut sélectionner la création de cutplane puis le poser sur la pièce en cliquant. Ils sont toujours perpendiculaires à l'arête de la pièce (jointure de 2 plans), l'utilisateur peut ainsi poser ses objets à l'intersection du cutplane et de la pièce.
  - Orthogonal path: 1 forme de mesure line pour avoir des mesures orthogonales par rapport aux arêtes.



- Il peut également **générer des pdfs**, comprenant 4 vues paramétrées (position caméra...). Le document pourra ainsi être imprimé pour installer concrètement les sensors.
- L'utilisateur peut **paramétrer** les propriétés matérielles de la pièce qui peut influencer les mesures. Il a une bibliothèque de matériels à sa disposition.
- Il peut également **changer l'état** dans le cycle de vie du capteur pour indiquer la fin de la définition de celui-ci.

*Sensor Definition Approver (SDA) - Chef du BE (Sensor requestor aussi)*

- Il **vérifie** le travail effectué par les sensors requestors en sélectionnant la pièce/ le sensor à partir du tree ou de la table en utilisant la fonction « Goto » ou de la vue 3D avec les vues paramétrées. Puis dans la vue 3D, il peut sélectionner une des 4 vues pour vérifier la position du sensor, aller dans la vue détail ou dans la table pour vérifier les différents paramètres.
- Il **approuve** la définition des sensors avec soit la vue détail (statut de progression dans le process d'installation d'un sensor), soit la table.

*Sensor Installation Approver (SIA) - Chef d'équipe (un peu équivalent du SDA du côté installation)*

- Son rôle est d'**approuver** la demande d'installation du SDA. Il peut soit la refuser s'il n'a pas le type de capteur... et émettre un commentaire pour expliquer ce refus ; soit l'accepter en affectant l'installation à un Sensor Installer.
- Pour ce faire, il modifie le statut du sensor ce qui crée automatiquement une demande d'intervention pour l'installation du sensor. Il peut le faire soit dans la vue détail (onglet interventions), soit dans la vue intervention. Ensuite, il peut **valider** que le sensor est bien installé en se basant sur les documents fournis par le SI.

*Sensor Installer - Prestataires de services*

- Son objectif est de **coller** le sensor sur les pièces des avions. Il utilise la vue listant toutes les interventions pour réaliser les installations sur tous les sensors. Avec la vue détail du sensor, il a accès aux pdfs générés par le SR et peut ainsi consulter l'ensemble des informations nécessaires à la bonne installation du sensor.
- Il prend donc en compte l'intervention en cochant une case, il réalise l'intervention et une fois le sensor collé, il **prend une photo** du sensor installé et l'upload dans la vue détail du sensor pour preuve de l'installation. D'après cette photo, les SR et le SDA peuvent vérifier que cela correspond à leurs attentes. Il peut aussi **modifier** quelques paramètres du sensor et ajouter des commentaires sur l'installation. Enfin il **valide** l'installation (*voir SIA*).

Schedule Manager

- Il gère les plannings des tests.
- Pour ce faire, il crée les campagnes de tests dans le planning. Il peut utiliser la vue détail pour allouer un test au sensor, ainsi que la vue planning pour suivre le nombre de sensors installées pour les tests, ceux qui sont connectée, en ordre, etc.

II.2.2 Tâches d'interaction présentes dans le système

Les différentes tâches d'interaction recensées dans le système sont présentées dans l'Annexe IC.

L'application comprend en tout 6 vues qui sont liées entre elles et permettent ainsi à l'utilisateur d'interagir avec une même donnée d'une vue à une autre :

- une vue 3D de l'avion (Figure 10),
- une vue décrivant la hiérarchie des pièces de l'avion sous forme d'arbre (Figure 10),
- une vue présentant les différents capteurs et leurs caractéristiques sous forme de table (Figure 10),
- une vue présentant les capteurs de manière détaillée (Figure 10),
- une vue présentant un planning des tests (Figure 11),
- une vue décrivant les différentes actions et interventions réalisées par rapport à la pose des capteurs (Figure 11).

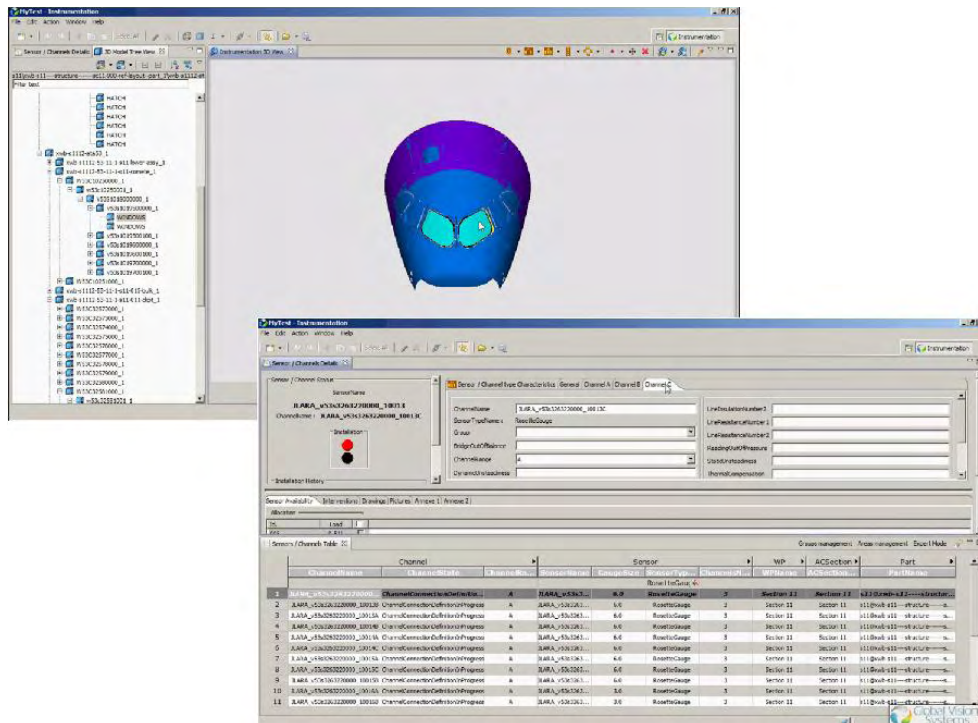


Figure 10: Exemples de configuration de l'application permettant l'affichage de la vue 3D, de la vue sous forme d'arbre mais également de la vue détaillée des capteurs et de la vue sous forme de table.



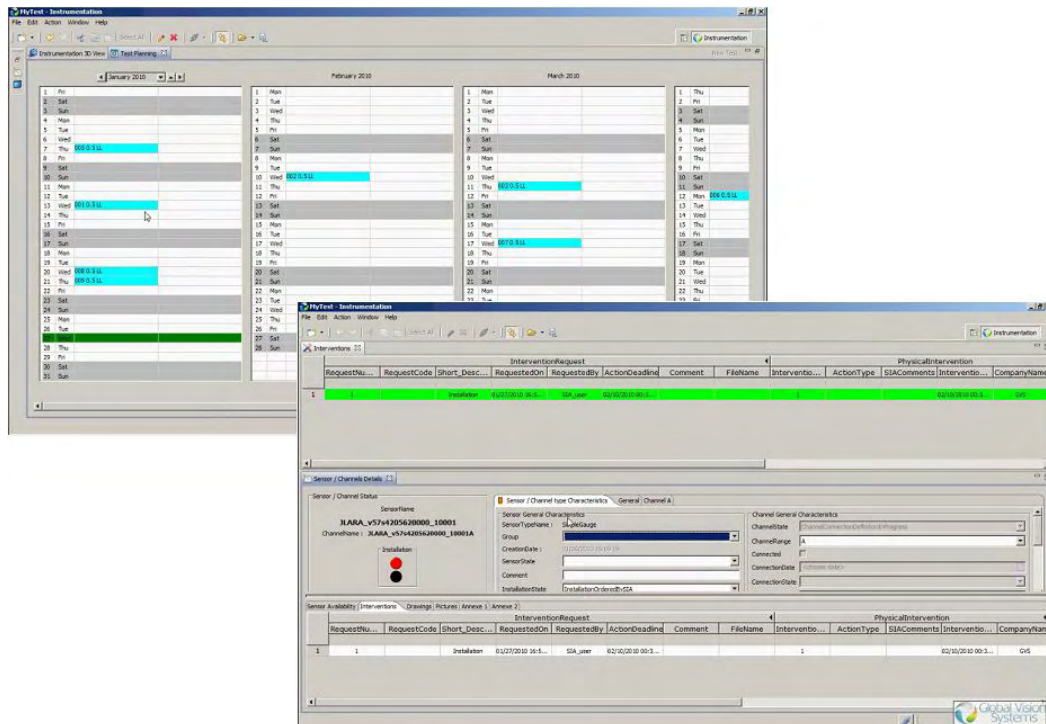


Figure 11: Exemples de configuration de l'application permettant l'affichage de la vue planning mais également de la vue des interventions

Ces tâches d'interaction nous montrent que le système propose un grand nombre d'interactions via des menus et des menus contextuels. Ces menus contextuels sont d'ailleurs présents d'une vue à une autre pour rester en cohérence lorsque les mêmes fonctionnalités sont possibles. Selon les vues, il est ainsi possible de réaliser des tâches en 1D, en 2D ou encore en 3D et de combiner des tâches parmi cet ensemble de différentes données.

Les interactions sont réalisées à l'aide de la souris et/ou du clavier et un grand nombre de raccourcis clavier sont proposés à l'utilisateur afin de réaliser les différentes fonctionnalités. L'utilisation de nombreux raccourcis clavier montrent la difficulté de donner accès de façon simple à l'ensemble des fonctionnalités du système. Il est d'ailleurs possible de remarquer que ces raccourcis clavier sont très nombreux en 3D pour répondre aux différents besoins de navigation et de manipulation.

D'après ces différents éléments et l'utilisation prépondérante de la vue 3D, il semble intéressant de simplifier les interactions proposées en 3D afin de faciliter à l'utilisateur l'accès aux données et aux différentes fonctionnalités de l'application.

Cette analyse fonctionnelle met en avant les grandes tâches réalisées dans l'application de GVS, mais également les moyens d'interaction mis en œuvre pour les effectuer. Il semble également que les différentes tâches d'interaction sont réalisées en séquence entre différents types de donnée par les utilisateurs afin de réaliser leur activité. Nous allons nous intéresser désormais aux méthodes d'évaluation mises en place pour évaluer des tâches d'interaction dans des environnements complexes.

### **II.3 Bibliographie**

---

North, C., & Shneiderman, B. (1997). *A taxonomy of multiple window coordinations*. University of Maryland: Technical Report CS-TR-3854.

Roberts, J. (2007). State of the art: Coordinated multiple views in exploratory visualization. *Coordinated and Multiple Views in Exploratory Visualization* (pp. 61-71). IEEE Computer Society.

Wang Baldonado, M., Woodruff, A., & Kuchinsky, A. (2000). Guidelines for using multiple views in information visualization. *Working conference on Advanced Visual Interfaces* (pp. 110-119). New York: ACM.



## III Méthodes D'évaluation En Environnement Complexe

III.1 Multiplicité des méthodes d'évaluation de l'utilisabilité .....	37
III.1.1 Méthodes d'évaluation classiques .....	37
III.1.2 Méthodes d'évaluation utilisées en EV .....	40
III.1.2.1 En Réalité Augmentée.....	40
III.1.2.2 En Environnement Virtuel .....	41
III.1.3 Bilan .....	47
III.2 Méthodes d'évaluation de la tâche de pointage.....	50
III.2.1 Evaluation classique de la tâche de pointage .....	50
III.2.1.1 Loi de Fitts et ses extensions .....	50
III.2.1.2 Evaluation du débit d'une technique .....	51
III.2.1.3 Norme ISO 9241-9.....	52
III.2.1.4 Proposition d'adaptation de la norme ISO 9241-9 à un environnement 3D ..	54
III.2.2 Méthodes d'évaluation ad-hoc .....	55
III.2.2.1 Evaluation de techniques d'interaction en environnements virtuels 3D .....	55
III.2.2.2 Evaluations menées dans des environnements 2D et 3D .....	57
III.2.2.3 Evaluations menées pour la tâche de pointage sur des cibles 3D dynamiques .....	60
III.2.3 Bilan.....	62
III.3 Bibliographie.....	64

Les principaux objectifs de l'évaluation des techniques d'interaction sont de connaître sa performance, son utilisabilité (satisfaction utilisateur, efficacité et efficience) et de repérer par là-même les problèmes potentiels de ces techniques d'interaction. Cette phase est essentielle pour s'assurer de l'adéquation de la solution proposée à la problématique à laquelle répond la technique d'interaction.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord mettre en avant l'éventail des méthodes d'évaluation existantes premièrement d'un point de vue global puis d'un point de vue propre aux interactions avancées. Ensuite, nous allons nous focaliser sur l'évaluation de la tâche de pointage qui s'avère essentielle dans l'interaction avec un système. Ce focus a pour but de présenter le manque de cadre de référence et de formalisation pour mener ce type d'évaluation.

### III.1 Multiplicité des méthodes d'évaluation de l'utilisabilité

---

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser dans un premier temps à présenter les méthodes classiquement utilisées pour évaluer les techniques d'interaction et dans un second temps, les méthodes d'évaluation plus spécifiques aux techniques d'interaction avancées en environnement complexe. Ce chapitre a pour objet de montrer la multiplicité des méthodes d'évaluation de l'utilisabilité mais également à démontrer que toutes ces méthodes ne sont pas encore adaptées à des contextes particuliers, tels que les EV 3D.

#### III.1.1 Méthodes d'évaluation classiques

Les méthodes qui suivent sont issues d'une classification d'un rapport de (Scapin, Law, & Bevan, 2008) et utilisées différents types de techniques d'interaction, sans être spécifiquement adaptées aux techniques d'interaction avancées.

La première méthode d'évaluation recensée dans la classification est l'acquisition de connaissances sur les utilisateurs et leurs activités (Data Gathering Modelling Methods - DGMM) par le biais de deux méthodes : le recueil de données (Data Gathering Methods - DGM) et les méthodes de modélisation (Modelling Methods - MM). Les méthodes de recueil de données se concentrent sur les moyens de collecter des connaissances sur les caractéristiques pertinentes des utilisateurs, les tâches et le contexte dans lequel les systèmes interactifs sont utilisés. Le questionnaire post-hoc est une des méthodes de recueil de données contenant un ensemble de questions écrites utilisé pour obtenir des informations démographiques et des points de vue et intérêts des utilisateurs après une séance d'évaluation de l'utilisabilité. Les questionnaires sont utiles pour recenser des données subjectives et sont souvent plus pratiques et plus cohérents que des interviews personnelles (Hix & Hartson, 1993). L'interview est d'ailleurs une autre méthode de recueil de données permettant de récolter des informations sur l'utilisateur en parlant directement avec lui. Il est alors possible de collecter plus d'informations qu'un questionnaire et aller plus loin dans le niveau de détail. Elle sert à obtenir des réactions subjectives, des opinions et des

aperçus sur comment les personnes raisonnent par rapport à des problèmes. Il existe des interviews structurées et des interviews open-ended par exemple (Hix & Hartson, 1993). Les méthodes de modélisations sont souvent associées à des méthodes de collecte d'informations spécifiques. Elles fournissent, avec des modèles basés sur des variables et des langages, une représentation précise des utilisateurs et de ses activités, comme GOMS, HTA, K-MAD, CTTE.

La deuxième méthode d'évaluation de la classification comprend les évaluations des interactions utilisateur (User Interactions Evaluation Methods – UIEM) d'après les trois méthodes suivantes : les méthodes basées sur la connaissance et sur les modèles (Knowledge-based and Model-based Methods - KMbM), les méthodes empiriques (Empirical Methods - EM) et les Approches mixtes (Mixed Approaches). Les méthodes basées sur la connaissance et sur les modèles sont basées sur des connaissances ergonomiques validées et ne nécessitent pas l'utilisateur. Parmi ces méthodes, il existe l'évaluation par heuristiques ou basée sur des recommandations d'expert pour laquelle des experts de l'utilisabilité évaluent le design d'une interface utilisateur (souvent un prototype) en appliquant un ensemble d'heuristiques ou de recommandations qui sont pertinentes. Les résultats des experts sont combinés et triés pour prioriser les conceptions itératives de chaque problème d'utilisabilité découvert (Nielsen & Marck, 1994). Le cognitive walkthrough est également possible. Cette méthode se base sur les buts de l'utilisateur, où un groupe d'évaluateurs observent les tâches, évaluant à chaque étape les difficultés rencontrées par l'utilisateur pour identifier et interagir avec l'interface pour le sous-but demandé et si le système fournit des feedbacks clairs à l'action. Les processus de la pensée de l'utilisateur qui contribuent à prendre la décision (chargement en mémoire, raisonnement...) sont pris en considération (Polson, Lewis, Rieman, & Wharton, 1992). Quant aux méthodes empiriques, elles ne peuvent s'effectuer qu'avec un prototype qui peut être testé et les utilisateurs finaux sont requis. L'évaluation formative est une de ces méthodes empiriques permettant la détection de problèmes d'utilisabilité lors d'une conception itérative. Les mesures sont essentiellement qualitatives et réalisées à partir de maquettes statiques et de scénarios. Ces tests sont ainsi intéressants à mettre en place suite à des brainstormings pour évaluer les maquettes résultantes de ceux-ci (Scriven, 1967). L'évaluation sommative est une autre méthode empirique utilisée pour mesurer l'adéquation d'un prototype assez avancé à des exigences d'utilisabilité spécifiques ; les mesures étant avant tout quantitatives : évaluation et comparaison statistique de deux configurations ou plus de designs d'interface utilisateur, de composants d'interface utilisateur, et / ou de techniques d'interaction utilisateur. Comme dans l'évaluation formative, des utilisateurs exécutent des scénarios basés sur la tâche alors que les évaluateurs collectent des données quantitatives et qualitatives (Scriven, 1967). Enfin, les approches mixtes utilisent conjointement plusieurs méthodes d'évaluations des interactions utilisateur présentées précédemment.

Les méthodes collaboratives (Collaborative Methods - CM) sont les dernières méthodes indiquées dans la classification. Celles-ci sont des méthodes créatives proposant aux concepteurs et utilisateurs d'échanger des idées ou des résultats d'un point de vue subjectif sur l'évaluation de l'utilisabilité. Il s'agit de conception participative comme le brainstorming qui a pour objectif de générer autant d'idées possibles autour d'un sujet ou d'un problème pour ensuite ne sélectionner que celles qui seront étudiées après le brainstorming. (Wilson, 2006) Une autre technique de créativité est le focus group qui est une discussion permettant de recueillir les perceptions des membres du groupe sur un sujet d'intérêt défini. Un modérateur guide les discussions des participants, dont le nombre varie entre 3 et 12, selon une structure pré-définie. Les participants sont sélectionnés d'après des caractéristiques qui leur sont spécifiques afin d'enrichir les informations collectées lors du focus-group (Kontio, Lethola, Bragge, & Box, 2004)

Outre cette classification, la norme ISO-16982 (2002) a séparé ces différentes méthodes d'évaluation d'après la participation des utilisateurs et il existe ainsi deux types d'évaluations : celles nécessitant la présence d'utilisateurs et celles qui peuvent se réaliser sans (cf Tableau 2). Cela peut avoir une influence sur le choix de la méthode à utiliser dans un projet, les méthodes ne répondant pas de façon similaire aux différentes contraintes d'un projet telles que l'environnement d'un projet ou encore la tâche à accomplir.

Participation directe des utilisateurs	Méthodes de la norme ISO-16982	Méthodes de la classification du rapport de Scapin, Law et al.
<b>Requise</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Observation des utilisateurs</li> <li>b. Incidents critiques</li> <li>c. Questionnaires</li> <li>d. Interviews</li> <li>e. Penser à voix haute</li> <li>f. Mesurages relatifs aux performances</li> <li>g. Conception et évaluation collaborative</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acquisition de connaissances sur les utilisateurs et leurs activités / recueil de données pour a., b., c., d. et e.</li> <li>f. Acquisition de connaissances sur les utilisateurs et leurs activités / méthodes de modélisation</li> <li>g. Méthode collaborative</li> </ul>
<b>Non Requise</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Méthodes basées sur des documents</li> <li>b. Approches basées sur des modèles</li> <li>c. Evaluation par expertise</li> <li>d. Evaluation automatisée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Evaluations des interactions utilisateur / méthodes basées sur la connaissance et sur les modèles pour a., b., c. et d.</li> </ul>
<b>Les deux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Méthode de créativité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Méthode collaborative</li> </ul>

Tableau 2 : Méthodes d'évaluation classées par l'implication utilisateur

En comparant les deux classifications, nous nous rendons compte qu'implicitement, les méthodes sont classées selon l'implication utilisateur dans le rapport de (Scapin, Law, & Bevan, 2008). Nous remarquons que la norme ISO-16982 ne stipule pas le test utilisateur parmi les méthodes d'évaluation de l'utilisabilité, car les méthodes recensées dans la norme ISO-16982 sont en partie dédiées aux recueils de données de test utilisateur. Le test utilisateur n'est donc pas une méthode en soi mais plutôt une approche permettant de mobiliser des méthodes de recueil de données de tests utilisateur. Il semble donc pertinent de développer les différentes méthodes de recueil de données proposées lors d'un test utilisateur afin de recueillir des données utiles et complémentaires pour déterminer la performance et la satisfaction d'une technique d'interaction.

Nous allons désormais détailler les méthodes d'évaluation mises en œuvre en 3D qui ont été spécifiquement proposées pour ce contexte ou alors adaptées.

### III.1.2 Méthodes d'évaluation utilisées en EV

Après avoir eu un aperçu des méthodes classiques, nous présentons une revue des études portant sur les méthodes d'évaluation spécifiques aux environnements 3D ainsi qu'aux interactions avancées.

#### III.1.2.1 En Réalité Augmentée

(Dünser, Grasset, & Billingham, 2008) a pu établir un état des lieux des pratiques et a catégorisé celles-ci selon les méthodes d'évaluation afin d'avoir un aperçu des différentes approches utilisées en RA pour évaluer les systèmes. Le premier groupe de méthodes d'évaluation comprend les mesures les plus utilisées :

- Mesures objectives : Mesures les plus courantes → temps d'exécution et taux précision / erreur ; mais aussi scores, position, mouvement, nombre d'actions... (et utilisation d'analyse statistique des variables mesurées) ;
- Mesures subjectives : étude de l'utilisateur par le biais de questionnaires, jugements ou évaluation subjective de l'utilisateur (et utilisation d'analyse statistique ou description de l'analyse). Ce type de mesure correspond à la méthode de recueil de données définie dans le chapitre 0.

Le deuxième groupe de méthodes d'évaluation inclut les mesures les moins courantes :

- Analyse qualitative : observations formelles de l'utilisateur, interviews formelles ou classification du comportement de l'utilisateur (parole, gestes...) ;
- Techniques d'évaluation de l'utilisabilité : évaluation heuristique ou basée sur un expert, analyse de la tâche, méthode de la pensée à voix haute ou méthode du magicien d'Oz. Ces techniques font partie des méthodes d'évaluations des interactions utilisateur présentées dans le chapitre 0 ;



- Evaluations informelles de l'utilisateur : observations informelles de l'utilisateur, ensemble informel de réactions utilisateur.

Cette étude a mis en avant la compréhension grandissante du besoin de formaliser le processus d'évaluation et de conduire dans les règles de l'art la conception des études utilisateur.

### III.1.2.2 En Environnement Virtuel

Les EV 3D sont des environnements particuliers où il faut prendre en compte 3 dimensions d'interaction pour lesquels une classification des méthodes d'évaluation de l'utilisabilité a été proposée par (Bowman, Gabbard, & Hix, 2002). Cette classification est structurée d'après 3 caractéristiques : l'implication des utilisateurs, le contexte de l'évaluation et les types de résultats produits (cf. Figure 12).

Il est important de connaître le coût de l'évaluation, l'impact de cette évaluation et l'application des résultats. Le degré d'implication de l'utilisateur affecte le coût de réalisation et d'analyse de l'évaluation, les résultats du processus indiquent le type d'information produite et le contexte de l'évaluation dicte de façon inhérente dans quelle mesure les résultats vont être appliqués.

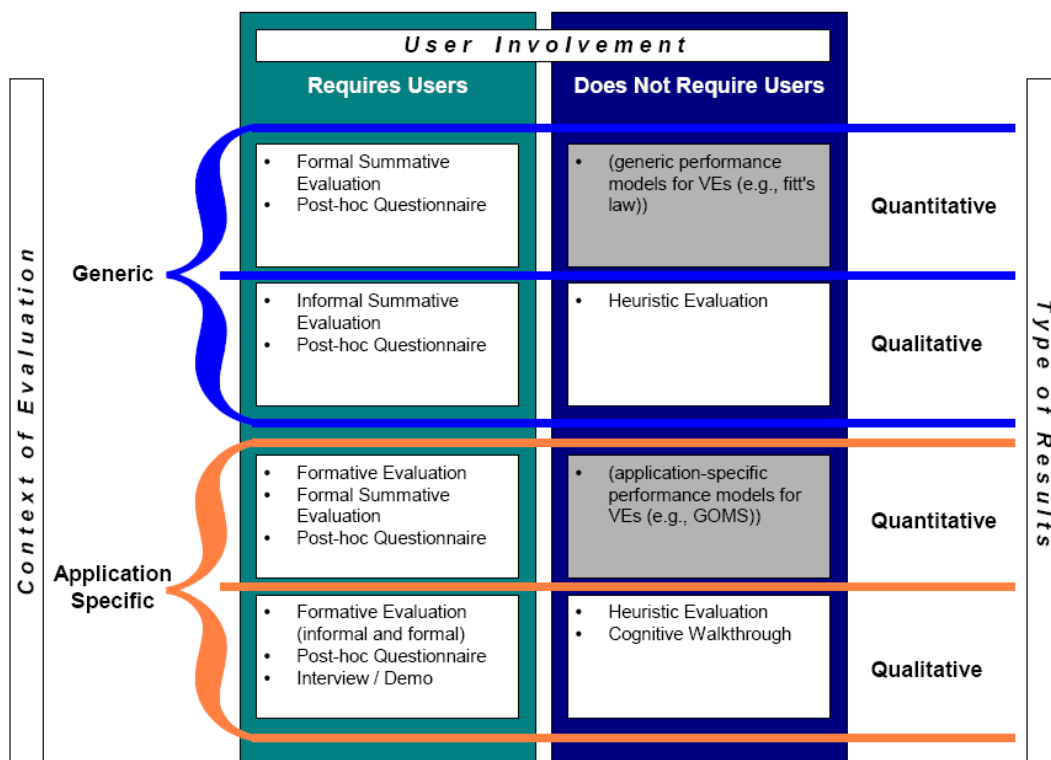


Figure 12 : Classification des méthodes d'évaluation

Les cases grisées montrent les manques en ce qui concerne des méthodes d'évaluation pour les EVs qui ne requièrent pas d'utilisateur. Les méthodes utilisées pour la 2D et les GUI sont certes listées entre parenthèses mais n'ont pas encore été appliquées aux EVs.

Il est à noter que cette classification n'indique pas l'étape du cycle de développement où il faut appliquer les méthodes, ni combien de méthodes peuvent être utilisées en parallèle ou en séquence ; ceci étant dépendant par exemple des buts recherchés, de l'effort du développement.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons présenter quatre méthodes d'évaluation : les évaluations avec banc d'essai et séquentielles ont été spécifiquement mises au point pour les EV 3D alors que les tests utilisateur et les évaluations heuristiques sont des adaptations ; par ailleurs, les évaluations avec banc d'essai, celles qui sont séquentielles et les tests utilisateur nécessitent la participation d'utilisateurs contrairement à la dernière méthode d'évaluation présentée.

#### III.1.2.2.1 Evaluations avec banc d'essai

Les bancs d'essai correspondent à un ensemble représentatif de tâches et d'environnements. La performance des TIs peut être quantifiée en les exécutant à travers les différentes parties du banc d'essai. Les évaluations avec banc d'essai se distinguent des autres types d'expérimentations formelles car elles combinent plusieurs tâches, plusieurs variables indépendantes et de multiples mesures pour la réponse pour obtenir une image plus complète des caractéristiques de performance d'une TI.

(Bowman & Hodges, 1999) ont pris comme approche d'évaluer les techniques d'interaction de façon empirique en dehors du contexte de l'application et ont ajouté comme support un framework pour concevoir et évaluer les TI (cf. Figure 13). Les frameworks formels fournissent une plus grande compréhension des avantages et inconvénients des techniques courantes mais également de meilleures opportunités de créer de nouvelles techniques robustes et performantes, basées sur les connaissances acquises lors des évaluations.

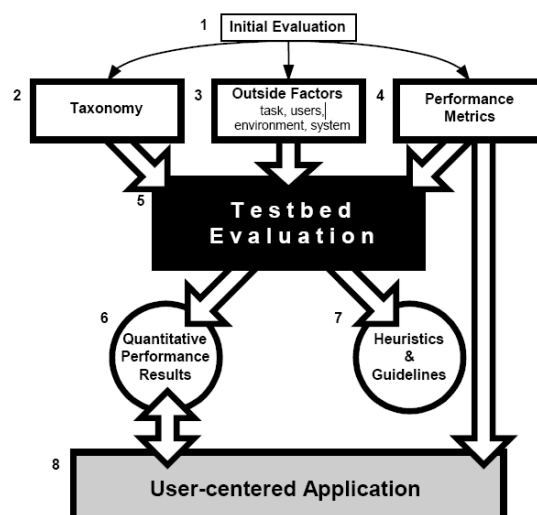


Figure 13 : Approche adoptée par Bowman et Hodges (1999)

L'évaluation avec banc d'essai utilise des frameworks formels et des expériences formelles avec des variables dépendantes et indépendantes permettant d'obtenir un large champ de

données de performance pour des techniques d'interaction VE. Pour mesurer la performance, il apparaît que des facteurs liés à la tâche jouent souvent un rôle : orientation spatiale durant la navigation ou l'expressivité de la manipulation. Ces facteurs ne peuvent pas être directement mesurables donc il est recommandé l'utilisation de questionnaires standards ou de commentaires de la part du sujet. Des facteurs extérieurs peuvent influencer la performance comme les caractéristiques de la tâche, l'environnement, l'utilisateur, le système.

Les critères de mesure définis par Bowman pour les tâches de sélection et de manipulation sont :

- Sélection :
  - 3 variables: distance de l'utilisateur à l'objet à sélectionner (3 niveaux), taille de l'objet à sélectionner (2 niveaux), densité des objets entourant l'objet à sélectionner (2 niveaux).
  - Facteurs les plus importants comme la vitesse, la précision, la facilité d'utilisation et le confort des techniques de sélection.
- Manipulation :
  - 3 variables: ratio de la taille de l'objet et de la taille de la cible (2 niveaux), nombre de degrés de liberté requis (2 niveaux) → test de l'expressivité des techniques, distance de l'utilisateur à laquelle l'objet doit être placé (3 niveaux).
  - Facteurs extérieurs : stereo vs mono, utilisation d'ombres.
- Variables de réaction : vitesse de la sélection, nombre d'erreurs fait pour la sélection, vitesse de placement, données qualitatives liées au confort de l'utilisateur (tension du bras, de la main, vertige, nausée).

Pour ce type d'évaluation, il est possible de lister les inconvénients et avantages :

Inconvénients	Avantages
prend beaucoup de temps, plus coûteux à implémenter, requiert plus de sujets pour les expériences, produit un ensemble de résultats complexes difficile à analyser	réutilisabilité (comparaison avec d'anciennes expériences), résultats plus intéressants à exploiter : interactions entre variables, capacité à produire des modèles prédictifs de performance dans un espace de conception pour une taxonomie

Ces évaluations sont particulièrement intéressantes pour la compréhension des performances utilisateur. Elles fournissent un grand nombre de données de performance qui peuvent être appliquées à des situations variées.

III.1.2.2.2 Evaluations séquentielles

(Gabbard, Hix, & Swan, 1999) ont choisi une approche séquentielle pour l'évaluation de l'utilisabilité des applications spécifiques aux EV. C'est une approche qui s'adresse aussi bien à la conception qu'à l'évaluation de ces applications en donnant lieu à de la conception centrée utilisateur (cf. Figure 14). Cette méthodologie comporte quatre étapes qui sont :

- Analyse de la tâche utilisateur : comprend les types des tâches, séquences de tâche utilisateur : liste de fonctionnalités et de descriptions détaillées de la tâche, séquences et relations, travail de l'utilisateur et flux d'information.
- Evaluation experte basée sur des guidelines : supprimer des problèmes d'utilisabilité évidents mais également subtiles et importants. Sert à rédiger les scénarios utilisateur. Indications générales de ce qu'il faut faire et non de comment résoudre les problèmes d'utilisabilité.
- Evaluation formative centrée utilisateur : permet de renseigner la conception des études sommatives en aidant la détermination des caractéristiques d'utilisabilité appropriées pour évaluer et comparer les applications. Mise à jour des caractéristiques d'utilisabilité et des problèmes les plus importants et subtiles en montrant où ils apparaissent et de façon à pouvoir les résoudre.
- Evaluations sommatives comparatives : seules évaluations à pouvoir réellement comparer la conception d'au moins deux applications.

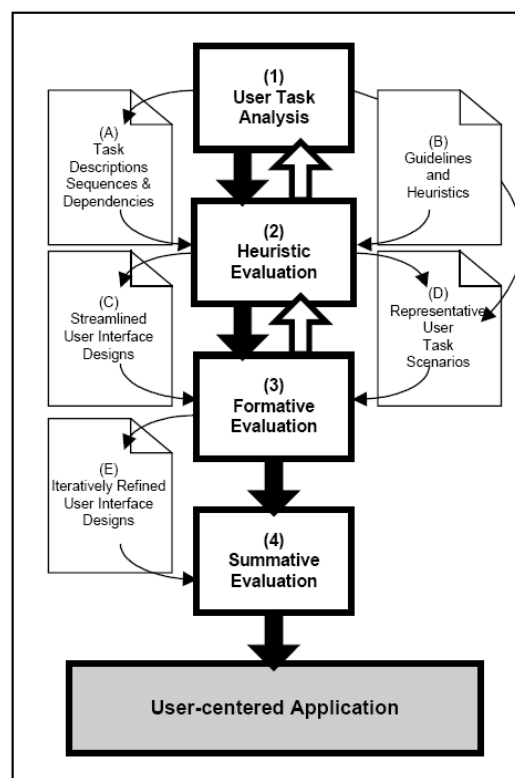


Figure 14 : Approche de Gabbard, Hix et Swan (1999)

Un avantage important de la méthodologie est le temps gagné dans les efforts d'évaluation. Les recommandations sont de plus en plus mises en œuvre, et les prototypes sont parfaits pour l'évaluation itérative formative et centrée utilisateur. Il s'avère souvent primordial d'inclure des experts du domaine afin de mieux comprendre les tâches cognitives.

Ce type d'évaluations est utile en début de conception car elles sont utilisables même sur des prototypes basse-fidélité. Il permet également de mettre en place une conception itérative pour garantir l'efficacité de l'application.

#### III.1.2.2.3 Les tests utilisateur

Certaines caractéristiques propres aux EV sont à prendre en compte en vue des évaluations car les tests utilisateur dans ce type d'environnement comportent certaines difficultés (Bowman, Gabbard, & Hix, 2002) – (Bach & Scapin, 2004) :

- Environnement physique et celui des tests utilisateur : la nécessité d'avoir plusieurs évaluateurs pour extraire les données intéressantes reste grande. L'utilisation de la vidéo est obligatoire car les séquences du comportement de l'utilisateur sont plus complexes à extraire et décrire pour ces environnements. Mais cette utilisation peut être accompagnée d'un certain nombre de difficultés : nécessité de recourir à plusieurs experts pour garantir un environnement fiable et stable de tests. Il s'avère également nécessaire de prévoir du temps supplémentaire pour les évaluations car les utilisateurs ne connaissent rien aux situations testées et il est important de bien expliquer les buts de la tâche. Il y a également un conflit entre les techniques utilisées pour interagir et celles pour récolter les données utilisateur comme le think aloud, tout le corps pouvant bouger. Les techniques d'interaction peuvent également représenter un obstacle pour la collecte de données (comme avec l'utilisation de la stéréoscopie).
- Evaluateur : sa présence peut être gênante pour les utilisateurs si ceux-ci sont immergés dans l'environnement. Elle peut également affecter les performances. De plus, plusieurs évaluateurs peuvent être nécessaires car les environnements sont complexes.
- Utilisateur : les applications ou techniques d'interaction peuvent ne pas être connues ou mal comprises, les utilisateurs doivent alors être capables de s'adapter à un grand nombre d'environnements. Il existe aussi des difficultés pour déterminer le niveau de l'utilisateur - novice ou expert, car le domaine est récent et les utilisateurs ont peu d'expériences. Prédire le nombre de sujets utiles pour l'expérimentation est également une difficulté à prendre en compte. Il existe aussi certains systèmes qui peuvent entraîner certaines maladies ou inconforts pour l'utilisateur ; ce facteur est donc à considérer pour l'évaluation. Il est également important d'assurer la sécurité des sujets de l'évaluation pour éviter les incidents ou accidents potentiels.

- Type d'évaluation de l'utilisabilité : les évaluations d'après des heuristiques et des recommandations ergonomiques sont difficiles car il en existe peu dans le domaine. Des modèles de performance tels que GOMS ou Fitts n'existent pas encore pour les EV ; ce qui rend la prédiction de résultats difficile pour ces environnements. Les tests utilisateur n'ont pas une méthodologie très précise du fait d'un manque de données fiables sur l'utilisabilité de ces systèmes. Le manque d'experts du domaine et les caractéristiques des tâches vagues entraînent un certain nombre de problèmes qui sont encore à résoudre (des aspects techniques et des aspects d'interaction et d'utilisabilité). L'empirisme reste une méthodologie très marquée pour ces environnements : apprendre en s'exerçant est une méthode très utilisée dans ces environnements.
- Autres : les évaluations de composants de haut-niveau comme les techniques d'interaction sont difficiles à mener car il n'existe pas d'interface standard.

#### III.1.2.2.4 Evaluations heuristiques et recommandations ergonomiques

Bien souvent des inspections ergonomiques sont menées sur les systèmes et les évaluations se font d'après des heuristiques connues (i.e. heuristiques de Nielsen) ou encore des critères ergonomiques (i.e. critères ergonomiques de Bastien et Scapin). Le manque d'utilisabilité des EVs, où les caractéristiques propres ne sont pas prises en compte par les méthodes classiques d'évaluation d'utilisabilité, a été étudié par Bach. En 2005, il publie avec Scapin un rapport (Bach & Scapin, 2005) sur des critères ergonomiques spécifiques aux EVs, s'appuyant sur la classification de ceux de Bastien et Scapin (cf. Figure 15). Ainsi, les dimensions comportementales liées aux EVs ont été prises en compte dans cette nouvelle classification, complétant un critère déjà existant. Deux nouveaux critères viennent parachever les critères ergonomiques classiques : groupement/distinction par le comportement et signifiante des comportements. La classification propre aux EVs compte 8 critères principaux et 20 critères élémentaires (notés par une \*) qui sont triés par « ordre hypothétique basé sur une stratégie potentielle d'inspection ». Le comportement est un concept ajouté à cette adaptation des critères ergonomiques aux EV 3D afin de prendre en compte les comportements « réactifs » liés aux objets manipulés en 3D de l'environnement ou « autonomes » (e.g. comportement des avatars).

1	Compatibilité *
2.	Guidage
2.1	Lisibilité *
2.2	Incitation *
2.3	Groupement/Distinction entre items
2.3.1	Groupement/Distinction par la localisation *
2.3.2	Groupement/Distinction par le format *
2.3.3	Groupement/Distinction par le comportement *
2.4	Feedback immédiat *
3	Contrôle explicite
3.1	Actions explicites *
3.2	Contrôle utilisateur *
4	Signifiante des codes, dénominations et comportements *
5	Charge de travail
5.1	Charge physique *
5.2	Brièveté
5.2.1	Actions minimales *
5.2.2	Concision *
5.3	Densité informationnelle *
6	Adaptabilité
6.1	Prise en compte de l'expérience de l'utilisateur *
6.2	Flexibilité *
7	Homogénéité/Cohérence *
8	Gestion des erreurs
8.1	Protection contre les erreurs *
8.2	Qualité des messages d'erreur *
8.3	Correction des erreurs *

Figure 15 : Critères ergonomiques adaptés aux EVs

### III.1.3 Bilan

Outre ces études menées en RA et VE, des recommandations d'évaluation de l'utilisabilité des systèmes ont été présentées par (Gabbard, 2001) en les classant selon :

- Les utilisateurs (EV / RA) et les tâches utilisateur ;
- Le modèle virtuel ;
- Les mécanismes d'entrée de l'interface utilisateur (EV / RA) ;
- Les composants de présentation de l'interface utilisateur (EV / RA).

Des recommandations concernant les tâches de sélection et de manipulation d'objet sont ainsi proposées et sont par exemple, pour la sélection, de proposer de hauts taux d'images par seconde et une faible latence pour assister les utilisateurs dans l'acquisition de la cible en 3D. (Ware & Balakrishnan, 1994) ou encore de fournir une description précise de la localisation et de l'orientation des objets graphiques et des textes. (Wickens & Baker, 1995). Pour la manipulation, il est recommandé de supporter l'interaction à deux mains, et pour mettre en œuvre l'interaction à deux mains, d'assigner à la main dominante des manipulations plus précises que pour la main non dominante. (Guiard, 1987) (Hauptman, 1989).

De telles recommandations peuvent s'avérer utiles aussi bien en phase de conception que pour l'évaluation des systèmes. Ces recommandations s'adressent aussi bien aux EVs qu'à la

RA : il semble donc que la conception des systèmes quel que soit l'environnement (EV ou RA) est assez proche.

Si nous établissons un bilan des méthodes classiques d'évaluation de l'utilisabilité adaptées aux interactions avancées, nous obtenons le Tableau 3.

Méthodes classiques d'évaluation de l'utilisabilité	Méthodes d'évaluation de l'utilisabilité adaptées aux techniques d'interaction avancées
<b>Acquisition de connaissances sur les utilisateurs et leurs activités</b>	
<b>Recueil de données</b>	D'après les analyses de Dünser et celles de Gabbard, Hix et Bowman, plusieurs méthodes sont utilisées et apparemment adaptées aux interactions avancées, telles que les questionnaires (questionnaire d'utilisabilité de (Kalawski, 1999)), les observations, les interviews.
<b>Méthodes de modélisation</b>	L'adaptation de modèles tels que K-MAD aux préoccupations des interactions avancées a fait l'objet de recherche par (Charfi, Scapin, & Dubois, 2008)
<b>Evaluations des interactions utilisateur</b>	
<b>Méthodes basées sur la connaissance et sur les modèles</b>	Le travail de Bach et Scapin sur les critères ergonomiques en EV 3D ainsi que les différentes recommandations montrent qu'un travail a été mené sur ce type de méthode. Par ailleurs, un travail sur le cognitive walkthrough a été réalisé par (Sutcliffe & Kaur, 2000) ainsi que sur l'évaluation heuristique en 2004 par (Sutcliffe & Gault, 2004) dans des contextes 3D.
<b>Méthodes empiriques</b>	Des études, notamment celles de Bach et Scapin et celles de Gabbard, Hix et Bowman, montrent que la question de l'adaptation des méthodes classiques aux interactions avancées a été posée et que des éléments de réponse ont été proposés. (Tromp, Steed, & Wilson, 2003) ont également effectué un travail sur les tests utilisateur en EV en 2003.
<b>Méthodes collaboratives</b>	L'adaptation des Focus-Groups aux interactions avancées a fait partie des sujets de recherche de (Bortolaso, Bach, & Dubois, 2011).

Tableau 3 : Méthodes d'évaluation classiques adaptées aux interactions avancées

D'après ce tableau, nous pouvons conclure qu'un grand nombre de méthodes classiques ont fait l'objet de recherche pour les adapter aux interactions avancées. Seules les évaluations avec des bancs d'essai de Bowman et Hodges font référence aux tâches de sélection et de manipulation de façon spécifique. La loi de Fitts est une méthode applicable à la tâche de sélection dans le cas d'un pointage et cette méthode n'a pas été explorée de façon aussi approfondie que d'autres types de méthode d'évaluation, comme l'indique la Figure 12. Pourtant, la tâche de sélection basée sur un pointage constitue une tâche élémentaire de bas niveau réalisée dans les systèmes interactifs et elle n'est pas mentionnée dans les méthodes d'évaluation alors que les modèles prédictifs produisent des prédictions



quantitatives a priori de performance à un stade avancé du processus de développement comparé au prototypage et au test utilisateur. Ils permettent ainsi de faire des analyses à différents niveaux d'approximation pour que les prédictions soient appropriées à la situation de conception et puissent être obtenues avec peu d'effort.

Nous allons désormais nous attacher à synthétiser les méthodes d'évaluation de la tâche de pointage et à savoir si elles ont fait l'objet d'adaptation aux techniques d'interaction avancées.

## III.2 Méthodes d'évaluation de la tâche de pointage

---

D'après les différentes expérimentations relevées dans la littérature, nous pouvons remarquer que celles-ci sont réalisées dans de multiples contextes. Toutefois, deux types d'approche ont été distingués concernant les évaluations en environnement complexe : des approches structurées se basant sur des normes ou des cadres précis d'une part, et des approches ad-hoc menées de façon empirique d'autre part. La norme 9241-9 est couramment utilisée dans les approches structurées pour évaluer, entre autres, la tâche de pointage ; par ailleurs, cette norme commence à être adaptée à la 3D dans certains travaux. Pour les approches ad-hoc, il s'agit avant tout de tester et de comparer des techniques d'interaction ayant au moins 3 degrés de liberté (DL). Les différents aspects de la performance de ce type de techniques d'interaction sont étudiés par ce type d'approche. Récemment, quelques études se sont intéressées à étudier la performance de techniques d'interaction dans un environnement complexe où elles sont évaluées en 2D et 3D. Cependant, nous montrerons que ces études n'apportent pas de solutions concrètes et unifiées pour l'évaluation de techniques d'interaction où 2D et 3D sont combinées.

### III.2.1 Evaluation classique de la tâche de pointage

#### III.2.1.1 Loi de Fitts et ses extensions

La loi de Fitts (Fitts, 1954) a été initialement conçue pour prédire le temps mis par un utilisateur pour atteindre une cible en 1D. La formulation couramment utilisée est la suivante:

$$MT = a + b * ID \text{ avec } ID = \log_2\left(\frac{D}{W} + 1\right) \quad (1)$$

où  $a$  et  $b$  sont des constantes dépendantes du contexte d'interaction et sont déterminées de façon empirique.  $W$  correspond à la taille de la cible et  $D$  est la distance à parcourir pour atteindre la cible souhaitée. Le terme logarithmique est l'indice de difficulté (ID) mesuré en bits.

Suite à cette première loi, des propositions de modèle ont été faites pour étendre cette formule à 2 ou 3 dimensions. Ainsi, MacKenzie et Buxton (MacKenzie & Buxton, 1992) ont proposé deux équations différentes pour le calcul de l'ID en 2 dimensions, et notamment l'équation suivante pour prendre en compte les différences potentielles entre hauteur et largeur d'une même cible :

$$ID = \log_2\left(\frac{D}{\min(W, H)} + 1\right) \quad (2)$$

Mais, Zhai et Accot (Zhai, Accot, & Woltjer, 2004) ont montré par la suite certaines limitations à ces modèles, telles que le manque de prise en compte de la contrainte de direction compte tenu de la différence possible entre les valeurs de la hauteur et de la largeur des cibles, et ont eux-mêmes proposé un modèle pour la 2D.

Certaines adaptations de la loi de Fitts ont également été proposées pour la 3D, comme le modèle de Ware et Lowther (Ware & Lowther, 1997) qui ont étendu le modèle 2D défini par MacKenzie et Buxton (dans ce modèle  $W$  est la taille de la cible,  $H$  la hauteur et  $D$  la profondeur).

$$ID = \log_2 \left( \frac{D}{\min(W, H, D)} + 1 \right) \quad (3)$$

Cependant, ce modèle souffre des mêmes problèmes que ceux afférents au modèle de référence et d'après nos connaissances, il n'a pas été validé dans une expérience qui manipule explicitement les 3 dimensions de la cible. Par ailleurs, dans le cas d'utilisation d'une sphère en tant que cible, ce modèle reste similaire à la loi de Fitts classique. Un autre modèle proposé est celui de Grossman et Balakrishnan (Grossman & Balakrishnan, 2004) dont l'étude porte sur les mouvements physiques de l'utilisateur dans le plan XZ pour un affichage volumétrique 3D. Ce modèle a ainsi été validé pour un affichage volumétrique et non un Environnement Virtuel 3D. De plus, les mouvements étaient contraints sur l'axe (X, Z) avec ( $Y=0$ ), ce qui revient à faire de la 2D car tous les axes 3D n'ont donc pas été évalués.

Jusqu'à présent, les modèles alternatifs à celui de Fitts n'ont pas permis de proposer un modèle validé ou ne sont pas assez robustes pour prédire le pointage en EV 3D. Le modèle classique est ainsi utilisé quelles que soient les dimensions.

#### III.2.1.2 Evaluation du débit d'une technique

Le débit (nommé throughput ou TP dans la littérature anglo-saxonne) a été introduit par la norme ISO 9241-9 (ISO 9241-9, 2000) pour comparer la performance de différents dispositifs de pointage dans un contexte donné. Il s'agit d'une mesure globale basée sur le modèle de Fitts, et plus précisément sur les Indices de Difficultés effectifs mesurés lors de la conduite d'une expérimentation conforme à la loi de Fitts. Le débit est mesuré en bits par seconde et la formule pour le calculer est :

$$TP = IDE / MT \text{ avec } IDE = \log_2 (De / We + 1) \quad (4)$$

$$We = 4.1333.SD \quad (5)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (6)$$

où  $MT$  est le temps moyen de mouvement effectué par les utilisateurs pour réaliser une tâche d'Index de Difficulté effectif (IDE). Ces termes représentent la performance effectivement réalisée par l'utilisateur plutôt que ce qu'il est censé faire en théorie. Ainsi  $De$  est la longueur effective entre deux cibles parcourues par les utilisateurs durant l'évaluation et  $We$  est la taille effective calculée en fonction de  $SD$  qui est la distribution des points de validation de l'utilisateur (cf. Figure 16).

Le TP est proche de l'Index de Performance (IP) (MacKenzie, 1992), qui correspond à l'inverse de la pente de la droite de régression calculée dans une étude conforme à la loi de Fitts, soit  $IP = ID/MT$ . La différence majeure est toutefois que le TP n'est pas influencé par le

traditionnel rapport entre vitesse et précision, contrairement à l'IP. En effet, le TP prend en compte un ajustement de la taille des cibles en fonction de la distribution des points de validation de l'utilisateur, lorsque le taux d'erreur est supérieur à 4% : ce sont alors les distances effectives ( $D_e$  dans la relation [4]) et les largeurs effectives ( $W_e$ ) qui sont prises en compte dans le calcul du TP. Le TP intègre donc automatiquement des corrections qui par effet de bord lissent les problèmes liés à la vitesse et à la précision. Toutefois, aucune mesure de débit n'est actuellement disponible pour des interactions 3D en EV 3D.

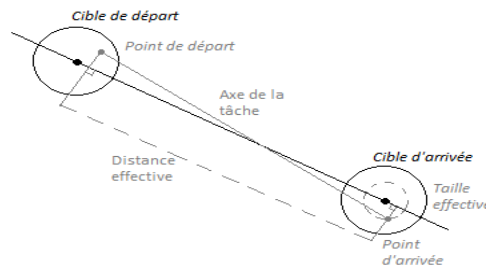


Figure 16: Illustration de la distance effective mesurée d'après le point de départ et le point d'arrivée de la tâche de pointage et de la taille effective (Teather et al., 2009).

### III.2.1.3 Norme ISO 9241-9

La norme ISO 9241-9 (ISO 9241-9, 2000) intitulée « Exigences ergonomiques pour travail de bureau avec terminaux à écrans de visualisation (TEV), Partie 9 : Exigences relatives aux dispositifs d'entrée autres que les claviers », fournit des exigences et des recommandations pour la conception et l'évaluation de dispositifs tels que souris, manettes, joysticks.

Les 8 articles et les 4 annexes de la norme présentent les différents concepts liés à l'évaluation des dispositifs. Les 2 premiers articles présentent le contexte de mise en œuvre de la norme avec le domaine d'application et les références normatives. Un des articles fournit les définitions (Article 3.) de notions telles que le pointage, le feedback, le matériel, la mesure du débit, la posture ou encore les indicateurs d'utilisabilité. Parmi ces définitions, nous soulignons les deux définitions suivantes, particulièrement importantes pour la compréhension du cadre que nous proposons dans la suite :

- le pointage (Article 3. Partie 1.4) est « une opération effectuée dans une interface graphique utilisateur au cours de laquelle le dispositif d'entrée est utilisé pour déplacer une petite représentation graphique (un pointeur, par exemple) vers un point spécifique de l'écran »
- la mesure du débit - aussi appelé throughput ou TP - (Article 3. Partie 4.11) correspond à la « mesure de la vitesse de transfert des informations lorsqu'un utilisateur commande un pointeur à l'écran à l'aide d'un dispositif d'entrée »

La norme introduit ensuite :

- des principes directeurs ergonomiques (Article 4.), tels que l'opérabilité (Article 4. Partie 2), qui décrit les conditions d'exécution rendant la technique d'interaction utilisable (comme la cohérence ou encore l'efficacité), ou la maniabilité (Article 4. Partie 3), qui définit les aptitudes de la technique à répondre aux attentes des utilisateurs (comme la réactivité ou l'accès aux commandes),
- des critères de performance (Article 5.), qui permettent de caractériser l'utilisabilité de la technique selon l'objectif et la tâche auxquels la technique doit répondre,
- des recommandations de conception (Article 6.) générales (Article 6. Partie 1) – comme la conception des boutons, la facilité de préhension ou le feedback – puis celles liées aux caractéristiques des dispositifs d'entrée (Article 6. Partie 2) – souris, manettes, etc.
- des conditions et des conventions de mesurage (Article 7.) indiquant la méthode à utiliser pour obtenir les mesures nécessaires à l'évaluation des exigences présentées dans l'article précédent, ainsi que la conformité et le respect de ces exigences (Article 8.).

Les éléments déterminants pour la mise en place d'un protocole expérimental se situent dans les annexes. Dans son annexe A, la norme présente des critères de sélection d'un dispositif d'entrée ainsi que les méthodes de mesure et d'analyse de l'utilisabilité (Annexe A). Des éléments tels que l'environnement (Annexe A. Partie 3.2), l'équipement requis (Annexe A. Partie 3.7) ou encore les procédures d'essai (Annexe A. Partie 3.8) sont ainsi présentés dans cette annexe afin d'aider à monter le protocole expérimental.

L'annexe B introduit les éléments de calculs nécessaires pour mesurer l'efficacité et l'efficacité d'un dispositif d'entrée et notamment : largeur de cible effective ( $W_e$ ), indice de difficulté (ID), indice effectif de difficulté (IDe) et précision des tâches (Annexe B. Partie 5). Ces différents calculs sont nécessaires afin de déterminer le débit (TP) d'une technique (cf. III.2.1.2). Ces différents calculs sont déterminés en fonction de la direction du mouvement qui détermine l'axe de la tâche : par exemple, selon l'axe x en 1D. L'axe de la tâche correspond au mouvement optimal allant d'une cible de départ jusqu'à une cible d'arrivée. Cette annexe définit également un ensemble d'essais (Annexe B.6), pour lesquels des opérations et un mode opératoire à suivre sont présentés afin d'évaluer chaque tâche : par exemple, l'essai de frappe multidirectionnel (Annexe B. Partie 6.2.2) correspond à une tâche de pointage, en s'approchant des consignes et procédures d'une évaluation Fitts, et concerne notre adaptation.

L'annexe C présente les principes de l'étude qualitative (Annexe C). Elle est basée sur un questionnaire pour évaluer le confort de la technique et sur une échelle pour graduer l'effort requis lors de la tâche. Le questionnaire sur le confort peut être utilisé de façon individuelle ou comparative entre des techniques. Ce questionnaire comprend deux parties évaluées sur une échelle de Likert en 5 ou 7 points, selon le questionnaire sélectionné : des indices

généraux pour mesurer la perception qu'ont les utilisateurs de certaines caractéristiques des techniques (vitesse, précision par exemple), puis des indices de fatigue pour mesurer la fatigue ressentie par les utilisateurs en fonction des parties de leur corps. Toutefois, le questionnaire de confort ne contient pas d'items concernant la satisfaction de l'utilisateur, ni l'apprentissage. L'échelle permettant de graduer l'effort s'appuie sur l'échelle de Borg (Annexe C.4), mais celle-ci est rarement proposée aux utilisateurs lors des évaluations présentées dans la littérature.

Cette norme a déjà été appliquée à différents cas d'études, dont quelques-uns un peu « exotiques » comme l'évaluation des manettes de jeux (Natapov, Castellucci, & MacKenzie, 2009) (MacArthur, Castellucci, & MacKenzie, 2009) ou encore d'un eye-tracker (Zhang & MacKenzie, 2007). Cependant, ces exigences sont davantage destinées à des dispositifs à 2 degrés de liberté et les tâches élémentaires ne concernent que des espaces 1D et 2D. La norme ne nous apporte donc pas de recommandations pour évaluer et comparer des techniques d'interaction à au moins 3 degrés de liberté ou situées dans un environnement 3D. Toutefois, certaines tentatives d'adaptation de la norme ISO à un environnement 3D ont été proposées.

#### ***III.2.1.4 Proposition d'adaptation de la norme ISO 9241-9 à un environnement 3D***

Des études récentes (Teather, Pavlovyh, Stuerzlinger, & MacKenzie, 2009) (Teather & Stuerzlinger, 2011) traitent de l'évaluation de la tâche de pointage basée sur la norme ISO 9241-9 dans un EV 3D. Dans une première étude (Teather, Pavlovyh, Stuerzlinger, & MacKenzie, 2009), la représentation utilisée est une scène 3D où les cibles sont des cercles 2D placés sur des cylindres 3D. Les utilisateurs ont comme instruction de pointer le sommet du cylindre pour ainsi sélectionner la cible circulaire (cf. Figure 17 - droite). Dans une seconde étude (Teather & Stuerzlinger, 2011), les cibles sont des sphères 3D disposées sur un cercle support 2D, positionné dans un plan vertical (cf. Figure 17 - gauche). Dans les deux cas, la représentation des cibles ne place pas vraiment l'utilisateur dans un contexte assimilable à de la 3D : sélectionner une cible résulte donc en une combinaison de pointage en 2D sur un plan en utilisant une technique de lancer de rayon pour atteindre la profondeur appropriée. Dans la majorité des cas, les interactions avec le dispositif sont ainsi limitées au plan (X, Y). La profondeur n'est pas réalisée avec un degré de liberté spécifique mais est le résultat d'un calcul logiciel (assez proche de la 2.5D, puisque l'interaction avec la scène 3D se réalise principalement avec 2 degrés de liberté). Enfin, pour ces deux études, les utilisateurs étaient placés dans des environnements immersifs (CAVE – environnement immersif de réalité virtuelle où une scène 3D est projetée sur les murs d'une pièce cubique - ou fish tank – image stéréoscopique d'une scène 3D visualisée sur un écran utilisant une projection perspective couplée à la position de la tête de l'utilisateur) et n'interagissaient donc pas avec des environnements virtuels de « bureau ».



Figure 17. Environnements de test des études de Teather et al. : Interaction sur un plan vertical (à gauche) et sur un plan horizontal (à droite)

Une étude récente (Ha & Woo, 2010) évalue la manipulation d'objet 3D en utilisant les techniques de main virtuelle. La tâche de manipulation se divise en une sélection suivie d'une translation ou d'une rotation de l'objet 3D. Pour sélectionner l'objet 3D, l'utilisateur doit pointer l'objet puis le positionner sur une position cible idéale déterminée par calcul. Pour calculer cette position, les auteurs se sont basés sur la norme ISO 9241-9 en adaptant la mesure de la largeur effective ( $W_e$ ). Cependant, il s'agit d'une évaluation située dans un environnement de Réalité Augmentée Tangible, où l'interaction a lieu dans le monde physique, au sein duquel sont ajoutées des informations numériques. Il ne s'agit donc pas d'une interaction avec un EV 3D à proprement parlé. Ce travail illustre donc l'intérêt de baser une évaluation sur la norme ISO mais les résultats ne peuvent pas être comparés avec des évaluations conduites dans un EV immersif comme ceux de Teather.

Au-delà de ces propositions, nous n'avons pas connaissance d'autres études basées sur le standard et réalisées dans un EV 3D non-immersif qui impliquent des techniques d'interaction avec 3 degrés de liberté (DL) ou plus. Ainsi les résultats fournis par les approches structurées ne présentent pas encore de références réutilisables. Des résultats plus concrets ont par contre été mesurés à travers des études empiriques. La section suivante résume des évaluations menées au sein d'Environnements Virtuels 3D de manière ad-hoc, i.e. qui n'ont pas été définies d'après la norme.

### III.2.2 Méthodes d'évaluation ad-hoc

#### III.2.2.1 Evaluation de techniques d'interaction en environnements virtuels 3D

Parmi les études existantes relatives à l'évaluation des techniques d'interaction à au moins 3 degrés de liberté, nous avons porté notre attention sur trois exemples représentatifs: (1) la technique Airmouse (Ortega & Nigay, 2009), (2) une étude menée par (Bérard, et al., 2009), et (3) une étude réalisée par (Zhai, 1993).

Ces études diffèrent en termes de tâches et de paramètres (cf. Figure 18). En effet, les études (1) et (2) proposent la manipulation de seulement 3 axes pour les translations alors que l'étude (3) utilise les 6 axes afin de réaliser les translations et les rotations. L'étude (1) évalue une tâche de pointage: le déplacement d'une petite sphère dans un espace sphérique

plus grand. L'étude (2) évalue une tâche de placement: le déplacement d'un cube aussi proche que possible d'une cible représentée par un cube avec une taille plus petite. L'étude (3) évalue une tâche de positionnement: manipuler un tétraèdre de façon à le positionner et l'orienter dans un autre tétraèdre cible de même taille. Pour chaque étude, les utilisateurs ont pour instruction de déplacer un curseur ou un objet aussi rapidement que possible à un endroit précis.

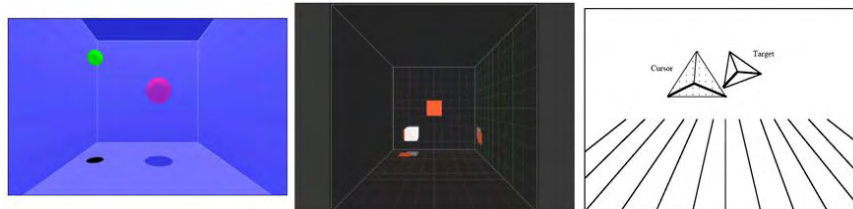


Figure 18. Environnements d'évaluation des études (1) Translation d'une sphère de petite taille dans une cible plus grande, (2) Translation d'un cube le plus proche possible d'un autre cube et (3) Positionnement et alignement d'un tétraèdre dans un tétraèdre cible de même taille.

Même si toutes ces expériences se concentrent sur des résultats quantitatifs, en particulier les temps de performance, chacune s'appuie sur différentes variables. Les études (2) et (3) définissent un taux d'erreur. Les études (1) et (2) utilisent la notion d'indice de difficultés, telle que définie dans la loi de Fitts pour modifier les conditions de la tâche. Seule l'étude (1) fait correspondre indices de difficultés et temps de réalisation de la tâche ; cependant, les paramètres plus classiques  $a$  et  $b$  de l'analyse de la loi de Fitts ne sont pas étudiés. En outre, les études (1) et (3) envisagent des mesures qualitatives telles que la fatigue, mais l'étude (2) ne définit pas de mesures qualitatives. Toutefois, l'évaluation de la fatigue n'est pas similaire dans les deux études. Dans aucune de ces études, il n'est fait cas du débit ; seule l'étude (1) se base sur une des tâches présentées dans la norme 9241-9 pour réaliser les évaluations, pourtant le débit n'est pas calculé pour les techniques testées.

Ces études montrent un manque de formalisation dans l'évaluation des techniques d'interaction 3D et soulignent les limites qui ont été mises en avant (cf. Tableau 4) : nombre de degrés de liberté considérés, tâche évaluée, et méthode utilisée. Par ailleurs, les mesures analysées ne sont pas identiques et il n'existe aucune mesure globale pour comparer facilement ces techniques d'interaction.



	Degrés de liberté	Tâche	Résultats quantitatifs	Résultats qualitatifs	Résultats présents dans la norme ISO 9241-9
<b>Etude 1</b>	3 axes pour les translations	Tâche de pointage	Temps, notion d'ID et correspondance entre ID et temps	Fatigue, performances perçues, classification des préférences	Temps, Fatigue
<b>Etude 2</b>	3 axes pour les translations	Tâche de placement	Temps, taux d'erreur, notion d'ID		
<b>Etude 3</b>	6 axes pour les translations et les rotations	Tâche de positionnement	Temps, taux d'erreur (par type de rotation)	Fatigue	Temps, Fatigue

Tableau 4 : Caractéristiques des différentes évaluations

### III.2.2.2 Evaluations menées dans des environnements 2D et 3D

Des travaux actuels ont commencé à s'intéresser à l'évaluation de la tâche de pointage pour une même technique d'interaction dans des environnements de types de donnée différents. Ces études sont précurseurs pour de nouvelles évaluations à mener dans des environnements complexes tels que les systèmes à multi-vues.

Dans la section précédente, nous avons présenté l'étude de (Ortega & Nigay, 2009) dans laquelle, la tâche de pointage a été évaluée dans un EV 3D afin de comparer la technique d'interaction qu'ils ont conçue avec des techniques d'interaction 3D plus communes. Cette évaluation a fait suite à une première évaluation de leur technique d'interaction réalisée en 2D. Pour ce faire, la norme ISO 9241-9 a été utilisée en tant que référence pour proposer un protocole d'évaluation de la tâche de pointage en 2D (cf. Figure 19). Malgré l'utilisation de ce référentiel pour l'évaluation en 2D, nous constatons que deux protocoles différents ont été mis en place pour évaluer la tâche de pointage en 2D puis en EV 3D. Par ailleurs, la procédure d'utilisation de la technique d'interaction était différente entre les deux protocoles d'expérimentation et la tâche évaluée n'était pas similaire, puisque pour la partie 2D, l'utilisateur devait faire une pression sur le clavier avant et après la réalisation de la tâche, ce qui n'était pas le cas en 3D. Une autre différence entre les deux protocoles a été notée : les formules utilisées pour calculer la difficulté de la tâche ne sont pas identiques, et le nombre d'IDs considéré n'est pas similaire entre les deux protocoles. De plus, la technique conçue par leur soin n'a pas été comparée avec les mêmes techniques en 2D et en 3D. Il n'est donc pas possible de lier les deux expérimentations car les deux protocoles présentent de nombreuses différences, et ainsi de conclure clairement sur les performances de la technique en 2D et en 3D pour une tâche de pointage pouvant être réalisée en continu. Il n'est pas non plus possible de tirer des conclusions sur une utilisation de cette technique d'interaction dans un environnement mêlant 2D et 3D.

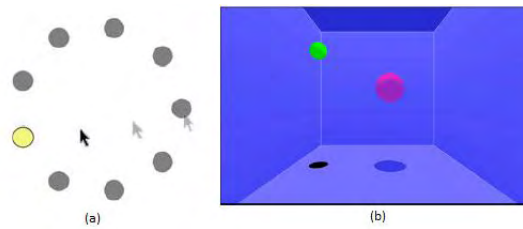


Figure 19 : Environnements d'expérimentation pour la partie 2D (a) et pour la partie 3D (b)

Deux autres études (Kouroupetroglou, et al., 2011) (Pino, Tzemis, Ioannou, & Kouroupetroglou, 2013) ont été réalisées pour évaluer la tâche de pointage en 2D et en EV 3D, en prenant la norme ISO 9241-9 comme référence (cf. Figure 20). De même que pour l'étude précédente, celles-ci ont été réalisées en deux temps avec deux protocoles d'expérimentation distincts. Pour ces études, le nombre de cibles à pointer, les IDs mesurés et le nombre de blocs sont différents. Toutefois, les deux mêmes techniques d'interaction sont comparées en 2D et en 3D. Pour ces études, les courbes de régression et les coefficients de corrélation ont été définis ainsi que les paramètres a et b de la loi de Fitts. Pour réaliser cette étude, un ensemble de 8 variables dépendantes issues de (MacKenzie, Kauppinen, & Silfverberg, 2001) ont été ajoutées à la norme ISO :

- Missed Clicks (MCL): nombre de validations où le curseur est en dehors de la cible.
- Target Re-Entries (TRE): nombre de fois où le curseur est entré et sorti de la cible avant de valider la sélection.
- Task Axis Crossings (TAC): nombre de fois où le curseur traverse l'axe de la tâche.
- Movement Direction Changes (MDC): nombre de changements de direction du mouvement au cours de la réalisation de la tâche.
- Orthogonal Direction Changes (ODC): nombre de changements de direction orthogonale.
- Movement Variability (MV) in pixels: variabilité du mouvement constaté en fonction de l'axe de la tâche.
- Movement Error (ME) in pixels: déviation moyenne constaté lors du mouvement par rapport à l'axe de la tâche pour indiquer si le curseur s'éloigne de l'axe de la tâche.
- Movement Offset (MO) in pixels: écart moyen constaté lors du mouvement par rapport à l'axe de la tâche pour indiquer si le curseur a tendance à se trouver sur la droite ou la gauche de l'axe de la tâche.

Pour l'évaluation de Kouroupetroglou, seules 3 d'entre elles ont été mesurées pour la 2D et la 3D ; pour l'évaluation de Pino, une nouvelle variable a été introduite de façon à mesurer la distance parcourue entre la cible de départ et celle d'arrivée et seules 2 variables n'ont pas été calculées en 3D. Pour ces études, il s'avère également difficile de déterminer le comportement et les performances de la technique d'interaction pour une tâche de pointage hétérogène 2D/3D réalisée en continu.



Figure 20 : Environnements d'expérimentation pour la partie 2D (a) et pour la partie 3D (b)

Un manque d'unification entre ces deux études est à remarquer étant donné que les protocoles mis en œuvre ne sont pas similaires, notamment pour le calcul des IDs et les variables mesurées, mais également l'EV 3D dans lequel réaliser la tâche de pointage. Toutefois, il est à noter que dans les deux études, des cibles sphériques ont été utilisées pour la 3D ainsi qu'un curseur sphérique.

Les problèmes soulevés par ce type d'approche sont de plusieurs ordres. En effet, les performances de la tâche de pointage ont été étudiées selon des protocoles différents pour la 2D et la 3D. Il n'existe ainsi pas d'étude globale des performances pour la réalisation de la tâche dans un environnement mêlant 2D et 3D puisque cette étude est limitée à celle d'une tâche de pointage en 2 dimensions puis à celle de la tâche de pointage en 3 dimensions sans prendre en considération l'impact du passage d'une dimension à l'autre. Pour les expérimentations présentes dans la littérature, aucune donnée n'a donc été recueillie sur la combinaison des tâches 2D/3D proches dans le temps, ni sur la stratégie que l'utilisateur a pu mettre en place pour passer d'une dimension à une autre.

Par ailleurs, d'un point de vue de l'interaction de l'utilisateur, la discontinuité, présente dans l'espace d'interaction et induite par la combinaison des tâches en 2D et en 3D, n'a pas été étudiée et aucune information ou recommandation n'a pu être apportée pour concevoir des techniques d'interaction répondant à ce type de tâche. De plus, la mise en œuvre de la technique d'interaction dans une tâche 2D/3D peut poser problème et aucune solution n'a été proposée pour passer d'un plan en 2D sans prise en compte de la profondeur ( $z=0$ ) à un plan 3D où la profondeur est à considérer.

Enfin, les IDs utilisés pour ces expérimentations sont de même nature pour chaque dimension. Il est ainsi pertinent de se demander si les performances d'une tâche 2D sont égales, inférieures ou supérieures à celles réalisées lors d'une tâche 2D hétérogène. La même question peut se poser pour une tâche réalisée en 3D. Il est également pertinent de se demander si les performances de la tâche hétérogène 2D/3D sont équivalentes à la simple addition des performances de la tâche 2D et celles de la tâche 3D ou si d'autres facteurs entrent en jeu et ont un impact sur les performances de l'utilisateur lorsqu'il réalise une tâche de pointage hétérogène 2D/3D.

Outre ces travaux, une étude récente (Karnik, Grossman, & Subramanian, 2013) a été menée dans un environnement mêlant des vues 2D et 3D, toutefois, celle-ci ne porte pas sur la tâche de pointage mais sur une tâche de rotation. Cette tâche est issue du test de

Shepard-Metzler sur la rotation mentale (SMT) afin de tester la capacité des utilisateurs à effectuer des rotations mentales sur des objets 3D. Il est cependant intéressant d'y faire référence puisque l'évaluation concerne une tâche réalisée en séquence dans deux dimensions différentes. Le contexte de l'évaluation est un système partagé par plusieurs dispositifs d'affichage (MDE – Multi-Display Environment) : dans ce cas précis, deux dispositifs sont utilisés, l'un affiche les données en 2D et l'autre celles en 3D. L'objectif de l'étude est ainsi de connaître l'effet du changement répétitif entre deux affichages ayant des types différents (2D vs 3D) lors de la réalisation d'une tâche où le contenu est partagé par ces deux affichages. Trois conditions ont été étudiées : la première condition comprend un dispositif d'affichage 2D combiné à un autre dispositif 2D qui supporte la correction de la perspective ; la seconde condition implique un dispositif d'affichage 2D et un dispositif stéréoscopique 3D ; la troisième condition comprend un dispositif d'affichage 2D et un dispositif volumétrique 3D. Comme pour la tâche de pointage, les utilisateurs ont reçu comme instruction de réaliser la tâche le plus rapidement et le plus précisément possible. Deux niveaux de difficulté ont été définis afin d'évaluer la tâche de rotation : un niveau facile et un autre difficile. De plus, les variables dépendantes suivantes ont été analysées : le nombre de changements entre les deux dispositifs d'affichage, la précision (qui n'est pas un taux d'erreur mais une variable binaire), le temps total passé à réaliser la tâche, le temps passé sur la vue en 2D et le temps passé sur la vue en 3D. Trois types de questionnaire ont été proposés aux utilisateurs : un questionnaire pour vérifier l'apparition de symptômes liés à l'utilisation d'un dispositif stéréoscopique, un questionnaire inspiré d'un questionnaire NASA TLX sur l'effort cognitif et physique par exemple, un dernier questionnaire pour évaluer la fatigue des utilisateurs et leur préférence quant aux trois conditions testées.

Même si cette étude ne porte pas directement sur la tâche de pointage, nous nous rendons compte que des variables similaires ont été employées : difficulté de la tâche, temps mis pour réaliser la tâche, précision. Des questionnaires ont également permis d'évaluer le confort et la préférence des conditions testées comme cela peut être le cas dans la norme ISO 9241-9. Cette étude nous indique donc la pertinence de certains composants d'une méthode d'évaluation à intégrer dans un cadre structuré d'évaluation.

#### ***III.2.2.3 Evaluations menées pour la tâche de pointage sur des cibles 3D dynamiques***

De récents travaux abordent désormais la problématique de pointer des objets dynamiques dans un EV 3D afin d'évaluer des techniques d'interaction afin de répondre à des problématiques nouvelles.

L'étude de (Ortega, 2013) a pour objectif d'évaluer une technique de pointage sur des cibles dynamiques dans un environnement dense suivant un protocole basé sur celui classiquement utilisé pour la tâche de pointage. La consigne est similaire à une tâche de pointage classique, étant donné que les utilisateurs doivent sélectionner la cible dynamique le plus rapidement et le plus précisément possible. Cependant, le protocole a été adapté afin de prendre en compte de nouvelles considérations, qui sont un environnement dense et des

cibles dynamiques. Le nombre de cibles est fixé à 100 et la scène 3D est composée d'un cube de taille fixe dans lequel sont comprises les cibles (cf Figure 21). Celles-ci sont des sphères de taille équivalente alors que le curseur est représenté par une croix 3D.

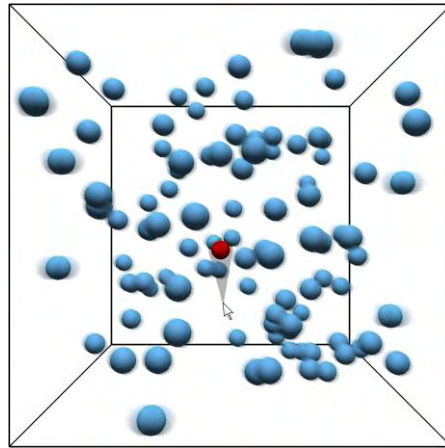


Figure 21: Scène 3D utilisée lors de l'évaluation de la tâche de pointage sur cible dynamique dans un EV 3D dense

La difficulté de la tâche est considérée comme étant liée à la vitesse de déplacement des cibles et non à l'ID comme dans une évaluation classique. Les différents essais sont ainsi répartis selon 5 valeurs de vitesse de déplacement des cibles et les variables dépendantes sont analysées en fonction de ces valeurs. Les deux variables dépendantes mesurées dans cette évaluation sont le temps moyen de réalisation de la tâche et le taux d'erreur.

Une autre étude a également été menée sur des cibles dynamiques dans un EV 3D (Casallas, Oliver, Kelly, Merienne, & Garbaya, 2013). Cette évaluation est menée selon un protocole basé sur celui classiquement utilisé pour la tâche de pointage. L'objectif de cette étude est de déterminer s'il est possible de prédire les cibles dynamiques sélectionnées par les utilisateurs d'après la position de l'utilisateur ainsi que la position et la taille des cibles. Les utilisateurs doivent ainsi sélectionner des cibles de tailles différentes classées dans un tableau horizontal et volant vers eux sur l'axe z (cf Figure 22). Les utilisateurs ont pour instruction de pointer les cibles en étendant leur bras afin de les toucher. L'évaluation est divisée en deux blocs : lors du premier bloc, la taille des cibles et leur position sont considérées en tant que variables indépendantes, tandis que dans le deuxième bloc, les variables indépendantes sont la taille des cibles et leur position dans l'espace (gauche, milieu, droite). Des indices de difficulté ont été définis afin de faire varier les conditions de l'expérimentation en fonction de la distance entre les cibles, de la distance entre l'utilisateur et la cible et du diamètre des cibles.



Figure 22: Configuration utilisée lors de l'évaluation de la tâche de pointage dans un EV 3D

Le taux d'erreur est analysé dans cette étude, mais pas le temps mis pour atteindre la cible. Des arbres de décision résultent également des tests utilisateur et ont permis d'analyser les résultats de l'étude et de déduire que la taille de la cible sélectionnée est une mesure prédictive tout aussi satisfaisante que le calcul des IDs de la loi de Fitts. Mais ils n'ont pas réussi à détecter une stratégie globale définie par les utilisateurs afin d'optimiser la sélection des cibles.

La principale différence entre les deux études présentées dans cette section est le fait que dans l'étude d'Ortega, l'utilisation de la 3D semble être un composant fort étant donné qu'il n'y a pas un effet « d'annulation » de l'axe z comme cela est noté dans l'étude de Casallas. Ces deux études varient également dans la définition du protocole et de la difficulté de la tâche. Les variables indépendantes et dépendantes considérées sont également différentes, seule la précision est une variable commune. Il est ainsi pertinent de remarquer que pour ces deux études, il n'est pas possible de déterminer un cadre structurant commun sur lequel s'appuyer afin de mener une évaluation de performance et de satisfaction de la tâche de pointage sur des cibles dynamiques.

### III.2.3 Bilan

Après étude des ces différentes évaluations, nous pouvons remarquer que deux types d'approche sont présentes : celles basées sur des normes, et celles qui correspondent à une approche ad-hoc.

En effet, nous avons des évaluations menées en EV 3D et en environnements 2D et 3D qui sont basées aux recommandations apportées par la norme ISO 9241-9 pour évaluer la tâche de pointage de façon structurée. Les mesures et les analyses attendues post-expérimentation sont ainsi issues de la norme et il est possible de constater que ce type d'approche peut convenir à des évaluations menées dans des contextes différents. Toutefois, les travaux traitant des évaluations en environnements 2D et 3D n'offrent pas de réponses à certains points que nous avons soulevés : protocoles différents entre évaluation en 2D et 3D, discontinuité des dimensions de l'espace d'interaction avec un passage d'un plan 2D à un plan 3D, pas de données sur les performances d'une tâche en continue sur les

deux types de donnée. Ces évaluations se révèlent appartenir à un sous-point d'une approche plus globale de la performance en environnement hétérogène mêlant 2D et 3D selon un parcours libre et réalisée de façon continue.

Quant aux évaluations menées en EV 3D, elles correspondent à une approche ad-hoc, basée sur des mesures ponctuelles, concrètes et liées au contexte considéré. Les résultats trouvés s'avèrent complexes à comparer, car les mesures sont différentes entre les évaluations tout comme la tâche évaluée. Par ailleurs, les études menées récemment sur la tâche de pointage sur des cibles dynamiques dans un EV 3D mettent en avant le manque d'homogénéité dans les protocoles utilisés, mais également le besoin fort d'évaluer la tâche de pointage en 3D. Il semble donc déterminant d'apporter un cadre structuré pour l'évaluation de la tâche de pointage en EV 3D sur des cibles statiques afin de l'adapter par la suite pour des cibles dynamiques.

Ces deux approches sont finalement complémentaires et notre objectif est donc de prendre en compte les bénéfices de l'approche structurée afin de faciliter et de standardiser la conception de telles expériences. Nous profitons également des variables et mesures proposées dans les approches ad hoc ayant des aspects pertinents pour l'expérience utilisateur. Notre travail se focalise ainsi sur une extension de la norme ISO 9241-9 pour les EV 3D, étant donné que celle-ci convient à la 2D et peut s'adapter à la 3D, d'après les différents travaux.

Dans un premier temps, nous allons proposer une unification de l'évaluation de la tâche de pointage en EV 3D pour ensuite étendre cette unification dans un contexte hétérogène qui répond à une situation d'interaction présente dans des systèmes complexes tels que ceux de GVS.

### III.3 Bibliographie

---

- AFNOR. Ergonomie de l'interaction homme-système - Méthodes d'utilisabilité pour la conception centrée sur l'opérateur humain. (1994) ISO/TR 16982:2002. Paris : AFNOR, 42p.
- Bach, C., & Scapin, D. (2004). Obstacles and perspectives for evaluating mixed reality systems usability. *Workshop MIXER "Exploring the design and engineering of MR system", IUI-CADUI 2004.*
- Bach, C., & Scapin, D. (2005). *Critères ergonomiques pour les interactions homme-Environnements Virtuels: définitions, justifications et exemples.* Rocquencourt: INRIA.
- Bérard, F., Ip, J., Benovoy, M., El-Shimy, D., Blum, J., & Cooperstock, J. (2009). Did "Minority report" get it wrong ? Superiority of the mouse over 3D input in a 3D placement task. *INTERACT'09.*
- Bortolaso, C., Bach, C., & Dubois, E. (2011). MACS: A combination of a formal mixed interaction model with an informal creative session. *EICS'11*, (pp. 63-72).
- Bowman, D., & Hodges, L. (1999, February). Formalizing the design, evaluation, and application of interaction techniques for immersive Virtual Environments. *The Journal of Visual Languages and Computing*, 10(1), 37-53.
- Bowman, D., Gabbard, J., & Hix, D. (2002). A survey of usability evaluation in Virtual Environments: Classification and comparison of methods. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11(4), 404-424.
- Casallas, J., Oliver, J., Kelly, J., Merienne, F., & Garbaya, S. (2013). Towards a model for predicting intention in 3D moving-target selection tasks. *EPCE'13*, (pp. 13-22).
- Charfi, S., Scapin, D., & Dubois, E. (2008). Identification et prise en compte de propriétés ergonomiques pour la modélisation et la conception de SIM. *IHM'08*, (pp. 55-62).
- Dünser, A., Grasset, R., & Billinghamurst, M. (2008). A survey of evaluation techniques used in augmented reality studies. *ACM SIGGRAPH'08*, (pp. 1-27).
- Fitts, P. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of experimental psychology*, 383-391.
- Gabbard, J. (2001). *Researching usability design and evaluation guidelines for Augmented Reality systems.* Récupéré sur [http://www.sv.vt.edu/classes/ESM4714/Student\\_Proj/class00/gabbard/index.html](http://www.sv.vt.edu/classes/ESM4714/Student_Proj/class00/gabbard/index.html)
- Gabbard, J., Hix, D., & Swan, E. (1999). User centered design and evaluation of Virtual Environments. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19(6), 51-59.



- Grossman, T., & Balakrishnan, R. (2004). Pointing at trivariate targets in 3D environments. *CHI'04*, (pp. 447-454).
- Guiard, Y. (1987). Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action: The action kinematic chain as a model. *The Journal of Motor Behavior*, 486-517.
- Ha, T., & Woo, W. (2010). An empirical evaluation of virtual hand techniques for 3D object manipulation in a tangible augmented reality environment. *3DUI'10*, (pp. 91-98).
- Hauptman, A. (1989). Speech and gestures for graphic image manipulation. *CHI'89*, (pp. 241-245).
- Hix, D., & Hartson, H. (1993). *Developing user interfaces: Ensuring usability through product & process*.
- Kalawski, R. (1999). VRUSE: A computerised diagnostic tool for usability evaluation of virtual/synthetic environment systems. *Applied ergonomics*, 30(1), 11-25.
- Karnik, A., Grossman, T., & Subramanian, S. (2013). Comparison of user performance in mixed 2D-3D multi-display environments. *INTERACT'13*, (pp. 260-277).
- Kontio, J., Lethola, L., Bragge, J., & Box, P. (2004). Using the focus group method in software engineering: Obtaining practitioner and user experiences. *International Symposium on empirical software engineering*, (pp. 271-280).
- Kouroupetroglou, G., Pino, A., Blampakakis, A., Chalastanis, D., Golematis, V., Ioannou, N., & Koutsoumpas, I. (2011). Performance evaluation of gesture-based 2D and 3D pointing tasks. *9th International Gesture workshop*.
- MacKenzie, I. (1992). Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, 7, 91-139.
- MacKenzie, I., & Buxton, W. (1992). Extending Fitts' law to two-dimensional tasks. *CHI'92*, (pp. 219-226).
- MacKenzie, I., Kauppinen, T., & Silfverberg, M. (2001). Accuracy measures for evaluating computer pointing devices. *CHI'01*, (pp. 9-16).
- Nielsen, J., & Marck, R. (1994). Executive summary. *Usability inspection methods*, 1-23.
- Ortega, M. (2013). Hook: Heuristics for selecting 3D moving objects in dense target environments. *3DUI'13*, (pp. 119-122).
- Ortega, M., & Nigay, L. (2009). AirMouse: Finger Gesture for 2D and 3D interaction. *INTERACT'09*, (pp. 214-227).

- Pino, A., Tzemis, E., Ioannou, N., & Kouroupetroglou, G. (2013). Using Kinect for 2D and 3D pointing tasks: performance evaluation. *HCI'13*, (pp. 358-367).
- Polson, P., Lewis, C., Rieman, J., & Wharton, C. (1992). Cognitive walkthroughs: A method for theory-based evaluation of user interfaces. *International journal of man-machine studies*, 741-773.
- Scapin, D., Law, E., & Bevan, N. (2008). *Fract final report MAUSE COST 294 WG 1: Critical review and analysis of individual UEMs*. COST-294 Project MAUSE.
- Scriven, M. (1967). The methodology of evaluation. *Perspectives of curriculum evaluation*, 39-83.
- Sutcliffe, A., & Gault, B. (2004). The ISRE method for analyzing system requirements with virtual prototypes. *Systems engineering*, 7(2), 123-143.
- Sutcliffe, A., & Kaur, K. (2000). Evaluating the usability of virtual reality user interfaces. *Behaviour and Information Technology*, 19(6), 415-426.
- Teather, R., & Stuerzlinger, W. (2011). Pointing at 3D targets in a stereo head-tracked virtual environment. *3DUI'11*.
- Teather, R., Pavlovych, A., Stuerzlinger, W., & MacKenzie, I. (2009). Effects of tracking technology, latency and spatial jitter on object movement. *3DUI'09*, (pp. 43-50).
- Tromp, J., Steed, A., & Wilson, J. (2003). Systematic usability evaluation and design issues for collaborative Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 241-267.
- Ware, C., & Balakrishnan, R. (1994). Reaching for objects in VR displays: Lag and frame rate. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 1(4), 331-356.
- Ware, C., & Lowther, K. (1997). Selection using a one-eyed cursor in a fish tank VR environment. *ACM trans. Comput.-Hum. Interact*, 309-322.
- Wickens, C., & Baker, P. (1995). Cognitive issues in Virtual Reality. *Virtual Environments and Advanced Interface Design*, 13, 516-541.
- Wilson, C. (2006). Brainstorming pitfalls and best practices. *Interactions*, 13(5), 50-63.
- Zhai, S. (1993). Investigation of feel for 6 DOF inputs: isometric and elastic rate control for manipulation in 3D environments. *The Human Factors and Ergonomics Society 37th Annual Meeting*.
- Zhai, S., Accot, J., & Woltjer, R. (2004). Human actions laws in electronic virtual worlds: an empirical study of path steering performance in VR. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13(2), 113-127.



## IV Adaptation D'un Standard A Un Contexte Hétérogène

IV.1 Unification de l'évaluation de la tâche de pointage en Environnement Virtuel 3D .....	70
IV.1.1 Introduction .....	70
IV.1.2 Adaptation de la norme ISO 9241-9 à la tâche de pointage en 3D .....	71
IV.1.2.1 Adaptation du standard d'un point de vue performance .....	71
IV.1.2.2 Adaptation de la norme pour les aspects qualitatifs .....	74
IV.1.2.3 Instrumentation .....	76
IV.1.2.4 Synthèse .....	78
IV.1.3 Utilisation concrète de l'adaptation à la norme et résultats de l'évaluation .....	79
IV.1.3.1 Cas d'étude : conception de tests statiques pour avion .....	79
IV.1.3.2 Hypothèses .....	81
IV.1.3.3 Participants .....	81
IV.1.3.4 Apparatus .....	81
IV.1.3.5 Procédure .....	82
IV.1.3.6 Conception de l'évaluation.....	83
IV.1.4 Mesures quantitatives .....	83
IV.1.4.1 Temps de mouvement et paramètres de Fitts .....	83
IV.1.4.2 Taux d'erreur .....	86
IV.1.4.3 Ratio d'inefficience .....	86
IV.1.4.4 Débit.....	86
IV.1.5 Mesures qualitatives .....	87
IV.1.5.1 Evaluation du confort.....	87
IV.1.5.2 Satisfaction des utilisateurs .....	87
IV.1.5.3 Préférences des utilisateurs .....	88
IV.1.6 Conclusion .....	89
IV.2 Adaptation de la norme ISO 9241-9 à la tâche de pointage en 2D/3D .....	91
IV.2.1 Introduction.....	91
IV.2.2 Méthodes de mesure des variables .....	93
IV.2.2.1 Niveau d'analyse.....	93
IV.2.2.2 Zone de passage.....	95
IV.2.2.3 Calcul de la Distance Effective (De) et de la Distance Utilisateur (Du).....	96

IV.2.2.4	Calcul du ratio d'inefficience effective .....	97
IV.2.2.5	Calcul de l'axe de la tâche .....	98
IV.2.2.6	Calcul des ID .....	98
IV.2.3	Adaptation du standard d'un point de vue performance .....	99
IV.2.3.1	Tâche .....	99
IV.2.3.2	Cibles .....	99
IV.2.3.3	Variables .....	100
IV.2.4	Adaptation de la norme pour les aspects qualitatifs .....	116
IV.2.4.1	Représentation en 2D/3D et indices 3D .....	116
IV.2.4.2	Confort et satisfaction .....	117
IV.2.5	Instrumentation .....	118
IV.2.6	Synthèse .....	119
IV.2.7	Présentation du cas d'étude et du protocole d'expérimentation .....	121
IV.2.7.1	Cas d'étude : conception de tests statiques pour avion .....	121
IV.2.7.2	Hypothèses .....	122
IV.2.7.3	Participants .....	123
IV.2.7.4	Apparatus .....	123
IV.2.7.5	Procédure .....	125
IV.2.7.6	Utilisation des techniques .....	125
IV.2.8	Conclusion .....	126
IV.3	Bibliographie .....	128

## **IV.1 Unification de l'évaluation de la tâche de pointage en Environnement Virtuel 3D**

---

### **IV.1.1 Introduction**

Les expérimentations menées dans le contexte d'EV 3D visent essentiellement l'étude de la performance des dispositifs utilisés. De plus, ces expérimentations ont pour objectif de comprendre l'adéquation des techniques d'interaction proposées à une ou plusieurs des tâches d'interaction 3D bien établies : sélection, manipulation ou navigation (Bowman D. , 1999). Enfin, pour réaliser ces tâches, les solutions d'interaction envisageables se multiplient, notamment du fait de l'émergence de nouvelles technologies telles que les interactions tangibles et les systèmes d'interaction mixtes (SIM). Cette multiplication des technologies couplée à un manque de cadre pour mener les évaluations conduisent à réaliser des expérimentations peu reproductibles et à recueillir des résultats complexes à exploiter. En effet, de nombreux paramètres sont pris en compte et combinés au sein de chaque expérimentation (degrés de liberté, tâches, techniques d'interaction), obérant ainsi la compréhension, la capitalisation et la réutilisation des données collectées et les résultats déduits.

Notre contribution pour la conciliation des aspects performance et satisfaction dans l'évaluation des techniques d'interaction pour les EV 3D a pour but, d'une part, de dépasser les approches expérimentales ad hoc et mal maîtrisées et, d'autre part, de construire une approche ciblée, structurée, guidée par une méthodologie établie. A ces fins, nous proposons un cadre d'évaluation des techniques d'interaction pour la tâche élémentaire de pointage en EV 3D, où les 3 axes (x, y, z) seront considérées dans l'évaluation de la tâche de pointage. Ce cadre constitue une approche composite, reproductible, combinant des aspects quantitatifs (i.e. la performance, la robustesse et la précision) et des aspects qualitatifs (i.e. la satisfaction, la facilité d'apprentissage et le confort). Pour y parvenir, nous proposons une adaptation du protocole de la norme ISO 9241-9. Initialement dédiée au pointage en 1D ou 2D, cette norme combine des mesures quantitatives et qualitatives. Notre adaptation a pour objectif d'étendre son applicabilité aux environnements 3D et à toutes techniques d'interaction en mesurant simultanément la performance et la satisfaction utilisateur.

Dans une première partie, nous décrivons et justifions les adaptations requises dans les différentes parties du protocole. Nous présentons également un outil logiciel utilisé pour conduire les évaluations de la tâche de pointage en 3D. Enfin, pour montrer l'intérêt de notre cadre, nous présentons une instance de notre adaptation de la norme en détaillant une expérimentation, conduite conformément à cette adaptation. Cette expérimentation, pour laquelle nous proposons une analyse des résultats obtenus au moyen de notre outil, a pour objectif de comparer et d'évaluer des techniques d'interaction pour le pointage en EV 3D.

### IV.1.2 Adaptation de la norme ISO 9241-9 à la tâche de pointage en 3D

Parmi les types de tests couverts par la norme (cf.III.2.1.3), nous avons porté notre intérêt sur la tâche de frappe multidirectionnelle étant donné que nous avons l'intention d'évaluer la tâche de pointage. Le mouvement est multidirectionnel vu que nous considérons les mouvements de pointage dans toutes les directions (x, y, z). Nous détaillons dans cette section, l'adaptation de 5 dimensions importantes extraites du standard initial : 3 dimensions quantitatives, qui sont 1) tâche, 2) cibles, 3) variables, puis 2 dimensions qualitatives, qui sont 4) représentation et 5) confort et satisfaction. Pour chaque dimension, nous présentons et justifions l'extension que nous avons apportée afin d'adapter le standard à un contexte de pointage en 3D. Ensuite, nous présentons les éléments de l'instrumentation que nous proposons comme support à la mise en œuvre de notre adaptation de la norme.

#### IV.1.2.1 Adaptation du standard d'un point de vue performance

Trois aspects majeurs de la norme structurent l'évaluation quantitative : tâche, cibles et variables.

##### IV.1.2.1.1 Tâche

Dans la norme ISO, la tâche consiste à pointer une cible fixe le plus rapidement et le plus précisément possible (ISO 9241-9 - Annexe B.3). La tâche de pointage prend fin lorsque l'utilisateur confirme l'acquisition de la cible en pressant sur un bouton ou une touche. Si le curseur est à l'intérieur de la cible de destination quand l'utilisateur confirme l'acquisition, la tâche de pointage est réussie. Si le curseur est à l'extérieur de la cible, la validation lève une erreur. Dans tous les cas, appuyer sur une touche ou un bouton est la fin de la tâche courante et marque le début de la tâche de pointage suivante. La difficulté de la tâche varie selon les différents indices de difficulté (cf. (1)). La taille des cibles et la distance entre les cibles sont modifiées lors de l'expérimentation.

Dans notre adaptation, nous avons conservé l'instruction donnée aux utilisateurs sur la tâche, l'existence d'une cible source et de destination, ainsi que le besoin de confirmation de la sélection. L'adaptation concerne tout d'abord la validation. Par analogie à la tâche 2D, nous avons conservé l'idée que la cible peut être validée dès qu'un pixel du pointeur est en contact avec la cible. Par conséquent, le curseur étant représenté par une sphère, son volume n'a pas besoin d'être complètement à l'intérieur de la cible pour considérer que la validation est réussie : un contact entre la cible et le curseur est suffisant (cf. Figure 23). En absence de contact, la validation lève une erreur. Nous ne forçons donc pas l'inclusion totale du curseur dans la cible pour valider la sélection de la cible. Cette solution n'apporte pas de biais particulier à la tâche proposée car la taille du curseur est prise en compte dans la difficulté de la tâche en plus de la taille de la cible. De plus, elle contourne la contrainte que constituerait le besoin d'inclure le pointeur dans la cible pour valider la sélection.

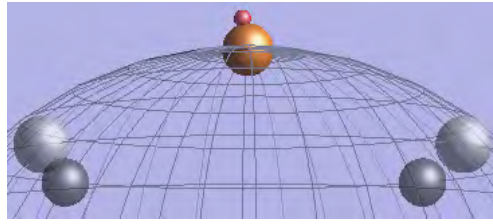


Figure 23. Exemple d'un contact entre le curseur et la cible

#### IV.1.2.1.2 Cibles

Même si le standard ne recommande pas explicitement une forme de cibles, les cibles sous forme de cercle sont les plus utilisées dans les évaluations de la littérature, étant donné qu'un cercle n'a qu'une seule et même taille quel que soit le point d'entrée du curseur dans la cible. Dans notre adaptation en 3D, les cibles sont devenues des sphères pour conserver une seule mesure pour la taille quel que soit le mouvement effectué en 3D : la taille des cibles correspondra donc au diamètre des sphères.

La norme ISO donne en revanche des recommandations sur la disposition des cibles et leur position : en 2D, les cibles sont équitablement placées sur la circonférence d'un cercle support (ISO 9241-9 - B.6.2.2). De plus, la place des cibles sur le cercle doit être définie de façon à ce que chaque cible ait une cible symétrique par rapport au centre du cercle support (cf. Figure 24). Cela permet d'assurer une distance toujours identique entre deux cibles et que cette distance soit égale au diamètre du cercle support (ISO 9241-9 - B.6.2.2).

Dans notre adaptation, la recommandation sur la disposition des cibles a été revue de manière à prendre en compte la 3D : le cercle support est remplacé par une sphère support. Les cibles sont toujours équitablement disposées sur la circonférence de la sphère support. Mais leur position est définie de façon à ce que chaque cible ait un symétrique par rapport au centre de la sphère support. La distance entre deux cibles symétriques est toujours égale au diamètre de la sphère support (cf. Figure 24).

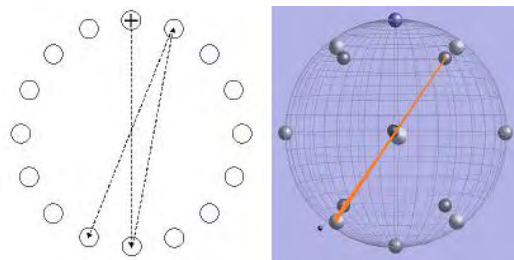


Figure 24. Disposition des cibles pour une tâche de pointage réalisée en 2D (à gauche) et en 3D (à droite)



IV.1.2.1.3 Variables

La norme ISO recommande différentes variables indépendantes et dépendantes (ISO 9241-9 - B.5). Dans le standard, les variables indépendantes inhérentes à ce type d'expérimentation sont les techniques en entrée, la taille des cibles, la distance entre les cibles et par conséquent les indices de difficulté (ID) qui en résultent. Les variables dépendantes citées dans la norme ISO incluent le débit de la technique et le temps moyen de pointage.

Ces différentes variables sont conservées dans notre adaptation, mais celle-ci a tout d'abord un effet sur le calcul de l'axe de la tâche pris en compte lors de la tâche de pointage et qui considère les mouvements de l'utilisateur durant la tâche. Cet axe de la tâche est mesuré sur les 3 dimensions (x, y, z) et est notamment utilisé pour mesurer le débit. Il est représenté par la droite passant par le point de départ et le point d'arrivée de la tâche de pointage. Cet axe a ainsi été adapté de façon à prendre en compte les 3 dimensions (x, y, z) du mouvement à réaliser. Il sert en particulier à calculer la largeur de la cible effective et à déterminer la distance effective entre la cible de départ et la cible d'arrivée.

Notre adaptation nécessite également une révision du mode de calcul des ID car le curseur a désormais un volume. Ce calcul, qui inclut la taille du curseur, est illustré par la formule suivante :

$$ID = \log_2(D/W_{cible} + W_{curseur} + 1)$$

Le calcul des ID effectifs (IDe) est donc également modifié et dépend des coordonnées du point effectivement atteint par le centre du curseur lors de la validation de la cible par l'utilisateur. La taille effective est calculée d'après la distribution des différents points 3D de validation de l'utilisateur.

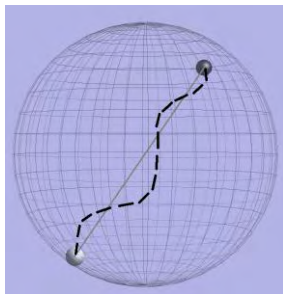
$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2}{n - 1}}$$

La distance effective correspond à la distance euclidienne 3D mesurée le long de l'axe de la tâche entre le point de validation de l'utilisateur et le point de destination de validation de l'utilisateur.

$$De = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(x_{Endi} - x_{Starti})^2 + (y_{Endi} - y_{Starti})^2 + (z_{Endi} - z_{Starti})^2}}{n}$$

Les tailles et distances effectives, utilisées pour calculer le TP, sont mesurées par une moyenne des essais pour une condition donnée.

A ces variables proposées par le standard, notre adaptation ajoute deux variables dépendantes supplémentaires : le taux d'erreur et le ratio d'inefficience. La première variable ajoutée, le taux d'erreur, est nécessaire car il s'agit d'une variable dépendante très souvent utilisée dans les approches ad-hoc et elle peut permettre d'expliquer et de compléter la mesure du débit. La seconde variable, le ratio d'inefficience, a été défini par (Zhai & Milgram, 1998) et indique la coordination des utilisateurs lors de l'exécution de la tâche en 3D en comparant la longueur parcourue par l'utilisateur et la distance optimale : plus le résultat est proche de 0, meilleure est la coordination (cf. Figure 25). Ce type de mesure est assez habituel pour évaluer les techniques à 6 degrés de liberté et le ratio peut montrer des différences allant jusqu'à 2 ou 3 fois la distance parcourue par les utilisateurs (Zhai & Milgram, 1998). Selon (Masliah, 1999), ce ratio complète le taux d'erreur, un des aspects de la performance utilisateur et fournit une analyse de la qualité de la performance en 3D dans le but de mieux la comprendre.



$$\text{Ratio d'inefficience} = \frac{(\text{longueur de l'utilisateur} - \text{longueur optimale})}{\text{longueur optimale}}$$

Figure 25. Exemple de coordination au cours d'une tâche de pointage

#### IV.1.2.2 Adaptation de la norme pour les aspects qualitatifs

Deux éléments de la norme structurent l'évaluation qualitative : la représentation et les indices 3D d'une part, le confort et la satisfaction d'autre part.

##### IV.1.2.2.1 Représentation et indices 3D

La norme ISO ne recommande aucun élément spécifique en ce qui concerne la représentation. Malgré cela, le pointeur est communément représenté par une croix. Dans notre adaptation, la forme du pointeur a été modifiée car une croix ou un point ne sont pas assez visibles dans un EV 3D, une représentation ayant du volume est donc recommandée. Le pointeur est ainsi représenté par une sphère de couleur rouge, ce qui reste cohérent avec la représentation des cibles. La forme sphérique du curseur répond à une autre contrainte importante : en effet, cette forme permet de faire en sorte que le point de collision entre le curseur et la cible capturé soit toujours le plus proche de la cible à pointer quel que soit le mouvement réalisé en 3D. Le centre du curseur et le centre de la cible sont à même distance l'un de l'autre en cas de collision, ce qui ne serait possible avec un cube étant donné que tous les points du cube ne se situent pas à la même distance du centre. Le diamètre choisi pour le curseur est d'environ 10px dans notre cas et représente ainsi environ 70% de la plus petite cible à atteindre, ceci afin que le curseur reste visible quelle que soit sa position dans l'environnement 3D.

Notre adaptation à un EV 3D fait face au problème traditionnel de la perception de la profondeur en 3D. Du fait de l'environnement non-immersif et au manque de solutions logicielles et matérielles efficaces, les utilisateurs ne sont pas capables de ressentir correctement la profondeur des objets numériques, rendant alors la modélisation de la tâche de pointage en 3D relativement difficile. Pour ces raisons, certains indices visuels 3D ont été définis et sont recommandés pour pallier la difficulté de perception de la profondeur. Tout d'abord, l'effet de perspective fait apparaître une variation des tailles des sphères : les sphères positionnées à l'arrière semblent être plus petites mais cet effet n'est que relatif au rendu et s'applique également au pointeur. En plus de cet effet de perspective, nous nous appuyons sur la transparence des sphères cible, comme (Zhai, Buxton, & Milgram, 1994) avait pu le tester dans des environnements 3D. La transparence appliquée aux sphères cible renforce l'effet de profondeur en réduisant l'occlusion avec les autres sphères ; elle permet en outre aux utilisateurs de distinguer le curseur derrière les cibles. Combinée avec cette transparence, notre adaptation de la norme recommande l'utilisation d'un dégradé de couleurs pour souligner l'effet de profondeur : les couleurs tirant vers le gris sont situées dans le fond et les couleurs plus lumineuses sont à l'avant car elles tendent à sembler plus proches (Kaiser, 2011). A ces indices, notre adaptation préconise pour le rendu de la sphère support, l'utilisation d'un fil de fer transparent. Ces recommandations sont issues de phases de conception itératives réalisées avec la participation d'experts 3D.

Par ailleurs, les ombres sont communément utilisées dans les scènes 3D, pourtant notre adaptation n'encourage pas l'utilisation d'ombres pour éviter de surcharger l'environnement. En effet, (Hubona, Wheeler, Shirah, & Brandt, 1999) ont montré que les performances des utilisateurs pour une tâche de positionnement diminuent lorsque le nombre des ombres ainsi que la complexité de la scène sont importants.

Ces 4 indices (perspective, dégradé de couleurs, transparence et structure en fil de fer) prônés par notre adaptation permettent de constituer une scène de référence pour l'évaluation de techniques d'interaction pour les tâches de pointage en 3D. Utiliser cette scène de référence évitera l'insertion de biais d'un point de vue de la perception de la profondeur, biais qui pourraient compromettre les résultats des évaluations en EV 3D.

#### *IV.1.2.2.2 Confort et satisfaction*

La norme ISO recommande deux échelles d'évaluation pour évaluer le confort des techniques d'interaction (ISO 9241-9 – Annexe C) : un questionnaire sur le confort pour mesurer le confort et l'utilisabilité des techniques ainsi qu'une échelle d'effort pour estimer l'effort perçu par les utilisateurs lors de la tâche.

Dans notre adaptation, nous avons renforcé l'analyse du confort et de l'utilisabilité du questionnaire de confort en ajoutant aux deux échelles déjà présentes le questionnaire SUS (System Usability Scale) (Brooke, 2006) qui couvre en plus la satisfaction utilisateur et l'apprentissage. En effet, le questionnaire initial sur le confort ne traite pas des aspects de

l'utilisabilité, tels que la satisfaction utilisateur, l'apprentissage et la préférence utilisateur. Le questionnaire SUS permet d'évaluer l'utilisabilité d'un système, c'est-à-dire qu'il permet de mesurer l'efficacité (savoir comment le but a été atteint), l'efficacités (savoir si le résultat prévu a été atteint) du système et la satisfaction de l'utilisateur. Epruvé depuis plusieurs années et normalisé, ce questionnaire permet de recueillir rapidement l'avis des participants puisqu'il ne comprend que 10 items. De plus, il mène au calcul d'un score global d'utilisabilité pour chaque technique compris entre 0 et 100, utile pour comparer facilement différentes techniques évaluées dans un même contexte.

Nous avons également enrichi l'analyse de l'aspect satisfaction en insérant l'utilisation d'items du SUMI. Le questionnaire SUMI (Software Usability Measurement Inventory) permet d'évaluer la qualité d'un système du point de vue de l'utilisateur. Il comprend un ensemble de 50 items permettant de mesurer l'efficacité, l'influence, la capacité d'aide, la contrôlabilité ainsi que l'apprentissage d'un système. Nous avons sélectionné 6 items parmi les 50 de façon à compléter les questionnaires précédents et à qualifier de façon plus précise les dimensions évaluées. En effet, des items sur la frustration ou la stimulation ont été ajoutés afin de recueillir le ressenti des utilisateurs et de caractériser plus finement la technique.

Enfin, nous avons complété cet aspect qualitatif en demandant aux utilisateurs les trois points les plus positifs et les trois points les plus négatifs pour chaque technique d'interaction 3D. Recueillir les avis des utilisateurs sur la technique a pour objectif de déterminer les caractéristiques de la technique qui ont le plus marqué les utilisateurs et qui pourront expliquer et compléter leurs réponses aux questionnaires.

Cette adaptation constitue donc un support pour guider la définition d'un protocole d'évaluation. Pour aider les expérimentateurs à mettre en œuvre cette adaptation, nous avons développé un outil dont nous présentons ses principales caractéristiques dans la section suivante.

#### ***IV.1.2.3 Instrumentation***

Pour accompagner notre adaptation de cette norme, nous proposons un outil logiciel support au déploiement du protocole, à la réalisation des tâches de pointage décrites dans l'adaptation et à l'enregistrement des traces d'interaction au cours de ces tâches, nécessaires pour les calculs des différentes mesures recommandées. Il constitue un environnement logiciel de référence pour mener les expérimentations basées sur notre adaptation de la norme en outillant de façon concrète le protocole, i.e. en appliquant et respectant les recommandations de la norme et les adaptations apportées pour la 3D. Cet outil logiciel rend possible le paramétrage de la taille des cibles, la distance entre ces cibles, le nombre de cibles et le control-gain. L'utilisation de cet outil logiciel garantit donc une mise en œuvre identique de la norme et de ces adaptations, d'un utilisateur à un autre et surtout d'une étude portant sur un ensemble de techniques d'interaction à une autre : les mesures, la scène 3D, les questionnaires et les résultats calculés seront les mêmes, et

toujours obtenus de la même façon. L'outil logiciel est composé d'un environnement 3D et d'un panneau de configuration. Le logiciel graphique 3D est écrit en C++ en utilisant la toolkit OSG. Le panneau de configuration est écrit en C#, et afin de proposer un outil logiciel évolutif, les composants de l'outil logiciel communiquent via un bus logiciel appelé Ivy.

Ce panneau de configuration est nécessaire à la configuration et au pilotage de l'exécution d'une expérimentation. En effet, La tâche de pointage est composée par un certain nombre de cibles que l'expérimentateur peut gérer : les cibles peuvent être placées à une longitude et une latitude spécifiques. De plus, un bloc est composé par une série de tâches de pointage, qui ont le même ID : l'expérimentateur doit toutefois configurer la taille de la cible (largeur) et la taille du support (distance) pour définir l'ID du bloc. Au lancement de l'expérimentation, ce panneau permet de définir l'ordre de passage des techniques ainsi que l'emplacement des fichiers de traces.

Au cours de l'expérimentation avec ce logiciel, exécuter la tâche sur un bloc revient à un processus en trois étapes: 1) la tâche de pointage commence au moment où le participant choisit la sphère de départ, qui est colorée en bleu (cf. Figure 26), sans commettre d'erreur. 2) Cette action met ensuite en évidence la sphère de destination qui est symétrique et colorée en jaune. 3) La tâche se termine lorsque le participant choisit la sphère de destination, même si une erreur est commise. La sphère cible devient orange lorsque le curseur et la cible sont en contact (cf. Figure 26). Durant la tâche, l'outil logiciel enregistre des données temporelles, telles que le début et la fin de chaque tâche de pointage, la validation de la sélection et le temps d'exécution. Il enregistre également la position 3D du curseur et les erreurs lorsque la validation a été réalisée sans contact entre le curseur et la cible. Tous les événements de l'expérimentation sont datés et enregistrés dans format XML.

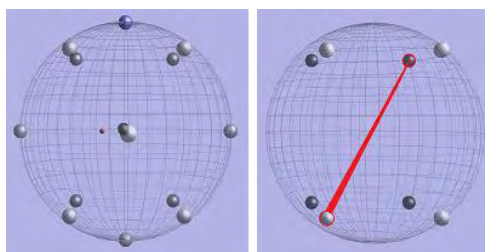


Figure 26. Illustration de l'instrumentation : disposition des cibles sur le support et illustration de la profondeur entre les cibles dans la scène 3D

#### IV.1.2.4 Synthèse

Notre adaptation est générique et propose un protocole structuré pour conduire des évaluations de la tâche de pointage 3D. Nous proposons ainsi une évaluation composite mêlant des aspects de performance et de satisfaction utilisateur. Dans le Tableau 5 sont synthétisés les ajouts et modifications que nous avons apportés à la norme de façon à proposer cette évaluation composite. Par ailleurs, nos différentes mesures couvrent l'ensemble des 6 critères définis par (Zhai, 1998) pour caractériser l'utilisabilité d'une technique d'entrée 3D : vitesse, précision, fatigue, persistance du dispositif et son acquisition, coordination et enfin, facilité d'apprentissage. Ainsi, dans notre adaptation, les critères de vitesse et précision sont mesurés par le débit ; la fatigue mais aussi la persistance et l'acquisition sont évaluées par le questionnaire sur le confort de la norme ISO ainsi que par les entretiens semi-directifs. La coordination est mesurée avec le ratio d'inefficience que nous avons ajouté dans notre adaptation et qui utilise les distances effectives. Pour mesurer la facilité d'apprentissage, nous avons ajouté le score global d'utilisabilité et la satisfaction des utilisateurs mesurés grâce au questionnaire SUS.

Norme			Etat
Sections 1 à 8			Original
Annexe A			Original
Annexe B			<b>Modifié</b>
<b>Annexe B.5.2</b>			
<i>Critères</i>	<i>Mesures</i>	<i>Variables dépendantes</i>	
Efficience	Rapidité	Moyenne des temps	Original
Efficacité	Précision	Taux d'erreur	Ajouté
	Coordination de l'utilisateur	Ratio d'inefficience	Ajouté
Performance	Mesure globale	Throughput/débit	Modifié
<b>Annexe B.6.2.2</b>			
<i>Rendu</i>			
Forme des cibles			Modifié
Forme du curseur			Modifié
Arrangement des cibles			Original
Indices 3D	Transparence		Ajouté
	Dégradé de couleur		Ajouté
	Support sous forme de fil de fer		Ajouté
Annexe C			<b>Modifié</b>
<i>Critères</i>	<i>Mesures</i>	<i>Variables dépendantes</i>	
Confort	Echelle de confort	Questionnaire de confort de la norme ISO 9241-9	Original
Satisfaction utilisateur	Mesure globale	SUS	Ajouté
	Echelle de satisfaction utilisateur	Items du SUMI	Ajouté

Tableau 5. Synthèse de notre adaptation à la norme 9241-9 pour le pointage en EV 3D

Ces différents points d'adaptation et d'ajout constituent une réponse aux limites que nous avons relevées dans l'état de l'art (cf. III.2.2.1) concernant les études ad-hoc : le nombre de degrés de liberté considérés est clairement établis et contrôlé, nous proposons de n'utiliser

que 3 degrés de liberté puisque ce nombre est suffisant pour réaliser la tâche de pointage ; la tâche est définie et stable, les mesures identifiées se complètent et répondent aussi bien à des exigences de performance que de satisfaction utilisateur. La méthode d'évaluation ainsi que son protocole de mise en place sont cernés pour partie par les amendements faits dans la norme et pour partie grâce au logiciel de conduite de l'expérimentation que nous proposons et qui rend possible l'uniformisation du protocole (préoccupations liées au rendu notamment incluses dans une scène 3D pouvant servir de scène 3D de référence). Notre adaptation a également pour but de proposer un lien entre l'interaction physique et les données numériques en présentant des interactions avec 3 degrés de liberté et une scène 3D à réaliser avec des techniques d'interaction avancée. Ainsi, l'adaptation de la norme 9241-9 a pour objectif d'apporter une unification de l'évaluation de techniques d'interaction en EV 3D.

Pour montrer concrètement l'utilisation de ces recommandations, nous présentons le cas d'étude sur lequel nous nous sommes basés puis le protocole d'évaluation de deux techniques d'interaction, étudiées pour ce cas d'étude. Enfin, nous analyserons et discuterons les résultats de cette évaluation.

#### **IV.1.3 Utilisation concrète de l'adaptation à la norme et résultats de l'évaluation**

Le cas d'étude considéré dans cette partie est issu d'un contexte industriel, porté par la société GVS – Toulouse, centrée sur le développement d'applications expertes pour le monitoring d'activités et de systèmes de données complexes. Après l'avoir introduit, nous présentons le protocole d'expérimentation détaillée et nous reportons les résultats quantitatifs et qualitatifs de cette évaluation, menée selon l'adaptation de la norme et avec le support de l'instrumentation présentée précédemment.

##### ***IV.1.3.1 Cas d'étude : conception de tests statiques pour avion***

Notre étude de cas est basée sur une application réelle qui permet de concevoir et gérer des campagnes d'essais statiques pour l'aéronautique (cf. Figure 27). Les concepteurs ont à manipuler et positionner des capteurs sur une maquette numérique 3D de l'avion. Cette maquette numérique 3D représente un avion réel, y compris en ce qui concerne les dimensions et le volume. Les interactions avec ces modèles permettent aux utilisateurs d'effectuer des tâches en 3D comme s'ils manipulaient l'appareil réel. Les utilisateurs peuvent appliquer de la transparence sur des parties de la maquette numérique pour interagir plus facilement avec des éléments de la structure 3D normalement cachés: des techniques comme le ray-casting ne sont donc pas envisageables étant donné la complexité de la maquette numérique, et sa structure multicouche. Ainsi par exemple, l'illustration dans la Figure 27 de la mesure de la distance entre un hublot (A) de la carlingue et un élément placé au milieu sous le cockpit (B). La transparence ne suffit pas pour accéder à ces deux points car au niveau du point A une grande quantité de points candidats existent : la carlingue extérieure, etc.

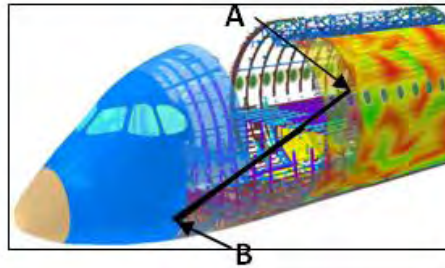


Figure 27. Illustration de la mesure de la distance entre deux points dans une maquette numérique dans l'application EasySensorManager

Les éléments d'adaptation de la norme sont présents dans ce cas d'étude sous les formes suivantes :

- Tâche : La tâche de pointage réalisée en 3D est régulièrement effectuée par les utilisateurs pour placer ou manipuler des capteurs dans un avion 3D. Les concepteurs doivent fréquemment sélectionner de façon successive deux éléments dans la maquette numérique pour mesurer une distance par exemple : cela correspond à la tâche de sélection décrite dans la norme entre deux points de l'avion qui sont positionnés à des profondeurs différentes dans la maquette (cf. Figure 27 - points A and B).
- Cibles : Les cibles sont typiquement des éléments de la structure de l'avion (par exemple, les extrémités des ailes) ou des capteurs. Les concepteurs peuvent sélectionner des capteurs positionnés à l'intérieur ou à l'extérieur de la surface de la carlingue d'un avion. Le volume de ces éléments et la distance entre eux est variable et ainsi ces variations correspondent à différentes difficultés de la tâche (ID) de la norme.
- Variables : Les concepteurs doivent positionner de façon précise un grand nombre de capteurs pour un même test ; un faible temps de mouvement ou un faible taux d'erreur sont donc importants pour réduire le temps de la tâche.
- Représentation et indices 3D : Pour aider à percevoir la 3D dans la maquette qui s'avère complexe et pour éviter de biaiser sa compréhension, aucun élément de décoration, tel que des ombres, n'est ajouté à la maquette numérique. Les objets sont alors représentés par des couleurs différentes et des transparences différentes pour mettre en avant les différentes profondeurs présentes dans la maquette numérique. Ceci est lié à ce qui est proposé comme recommandation dans notre adaptation.
- Confort et satisfaction : Le positionnement des capteurs est une activité journalière pour les concepteurs et ils peuvent passer de longues heures à réaliser cette activité : il est en effet important qu'ils se sentent confortables et satisfaits de la technique utilisée. Le score SUS et l'échelle de confort aideront à répondre à ce cas d'utilisation.



#### **IV.1.3.2 Hypothèses**

L'objectif principal de l'évaluation la tâche de pointage en EV 3D est de comparer deux techniques d'interaction en vue d'une utilisation dans notre cas d'étude. Dans un premier temps, nous allons étudier l'applicabilité de la loi de Fitts dans un tel contexte afin d'évaluer l'efficacité de chaque technique : notre première hypothèse (H<sub>1</sub>) est que la loi de Fitts s'applique toujours dans un environnement 3D et avec des formes d'interaction avancée.

Dans un second temps, nous allons déterminer la meilleure technique pour réaliser la tâche en termes de performance et de satisfaction utilisateur. Pour évaluer la rapidité et la précision des techniques, notre deuxième hypothèse (H<sub>2</sub>) est que la technique isotonique est plus performante que la technique isométrique et a une meilleure mesure de débit. Pour formuler cette hypothèse, nous nous basons sur des études menées d'après la norme ISO 9241-9 sur des techniques d'interaction, où les techniques isotoniques ont eu de meilleures performances (Soukoreff & MacKenzie, 2004).

Nous avons aussi formulé comme hypothèse que les utilisateurs préfèrent interagir dans un EV 3D avec une technique isotonique (H<sub>3</sub>) étant donné que l'interaction semble plus usuelle qu'avec une technique isométrique.

Pour mener à bien cette expérimentation, nous nous sommes appuyés sur l'outil logiciel proposé (cf. IV.1.2.3) et rendant possible la conduite d'évaluations selon le protocole d'expérimentation qui met en œuvre notre adaptation de la norme.

#### **IV.1.3.3 Participants**

Quatorze utilisateurs non payés (3 femmes et 11 hommes) ont été recrutés pour participer à cette étude et pour tester les deux techniques. Mais nous n'avons analysé les résultats seulement pour 13 utilisateurs, vu que les logs pour un utilisateur étaient aberrants et inutilisables. Les participants avaient entre 22 et 39 ans (moyenne: 27,5, SD: 5,26). Utilisateurs réguliers d'ordinateur, ils n'étaient pas familiers avec nos techniques d'interaction 3D. Ils ont utilisé leur main dominante (12 droitiers et 1 gaucher).

#### **IV.1.3.4 Apparatus**

L'expérience a été menée en utilisant un ordinateur portable HP EliteBook 6930p portable avec Windows 7 et un écran LCD avec une résolution de 1920 \* 1080. Le processeur de l'ordinateur était un 2,4 GHz Intel Core Duo CPU avec 4Go de RAM et la carte graphique une ATI Mobility Radeon HD 3450 256Mo.

Deux techniques ont été conçues et mises en œuvre pour soutenir cette activité et déterminer celle qui s'avère la mieux adaptée (cf. Figure 28). Concrètement, la première technique est une technique isotonique basée sur une manipulation d'objet dans un espace physique 3D afin de déplacer le pointeur numérique dans la scène 3D. La position de l'objet dans l'espace physique est captée par la technique et correspond à la position du pointeur dans l'environnement 3D. Cette technique est basée ainsi sur un mode de contrôle de position et utilise la technologie du *Polhemus Patriot*. Les utilisateurs manipulent la

technique en positionnant leur bras dans un espace physique qui a été calibré. La seconde technique est une technique plus classique basée sur la force de l'utilisateur captée pour déplacer le pointeur numérique. La force d'entrée est transformée en vitesse pour modifier la position du pointeur dans l'environnement 3D. Cette technique est basée ainsi sur un mode de contrôle de vitesse et correspond à un contrôleur isométrique utilisant un *SpaceNavigator*. Les utilisateurs manipulent le joystick du contrôleur, qui se trouve posé sur une table.



Figure 28. Posture des utilisateurs manipulant les deux techniques d'interaction qui sont le SpaceNavigator, dispositif isométrique (gauche) vs. le Polhemus Patriot, dispositif isotonique (droite).

Une pré-expérience a été menée afin de déterminer les paramètres optimaux pour les deux modes de contrôle, et notamment un control-gain de 0.45 qui correspond au coefficient permettant de déplacer le curseur à l'écran en fonction du déplacement réalisé avec la technique d'interaction dans le monde physique. Les utilisateurs ont visualisé les données sur un écran LCD indépendant et non avec celui de l'ordinateur portable, servant à configurer l'expérimentation.

#### **IV.1.3.5 Procédure**

Au début de l'expérimentation, chaque participant remplissait un formulaire de consentement éclairé et un questionnaire démographique. Les participants s'asseyaient ensuite devant le bureau où étaient disposés l'écran LCD et les deux techniques d'interaction. Les instructions, conformes à celles spécifiées dans l'adaptation à la norme (cf. IV.1.2.1.1), étaient données aux utilisateurs et ils pouvaient s'exercer pendant 15 min avant le début de l'évaluation. Comme mentionné dans la partie « tâche » de l'adaptation (cf. IV.1.2.1.1), la tâche de pointage débutait lorsque les participants sélectionnaient la sphère de départ. La tâche se terminait lorsque les participants sélectionnaient la sphère de destination. Les participants pouvaient se reposer à tout moment entre deux tâches de pointage. Lorsque toutes les tâches de pointage étaient réalisées avec la première technique, ils remplissaient une échelle pour évaluer le confort de la technique ainsi qu'un questionnaire de satisfaction pour évaluer l'utilisabilité de la technique, afin de se conformer à la partie « confort et satisfaction » de notre adaptation de la norme (cf. IV.1.2.2.2). Les participants suivaient la même procédure pour la seconde technique. A la fin de l'expérimentation, ils remplissaient un questionnaire de comparaison des deux techniques.

Des entretiens complémentaires, comme recommandés dans notre adaptation, étaient menés afin de recueillir les préférences des utilisateurs et d'identifier les trois points les plus positifs et les trois points les plus négatifs de chaque technique.

#### **IV.1.3.6 Conception de l'évaluation**

Comme recommandé dans la section IV.1.2.1.3 de notre adaptation de la norme, différents ID sont spécifiés. Dans notre évaluation, les ID ont été définis comme une combinaison de la largeur de la cible (taille du curseur + taille de la cible = 25px, 40px, 55px) et de la distance à parcourir pour atteindre une cible (distance = 150x, 450px, 750px). Les 9 ID résultant étaient compris entre 1.898 et 4.954. La distance utilisée pour réaliser le calcul des ID correspond à une distance euclidienne mesurée en 3D. Dans cette instance de la norme adaptée, le nombre de cibles à pointer a été fixé à 14 cibles : 6 cibles ont été disposées sur les extrémités des axes (x, y, z) et 8 en longitude et latitude  $\pi/4$  (cf. Figure 26). Les participants ont été divisés en deux groupes et chaque groupe a testé les techniques dans un ordre contrebalancé. Un test pour une technique était composé de 9 blocs, à savoir des combinaisons de toutes les largeurs et distances ; et chaque bloc consistait en 14 tâches de pointage. Toutes les tâches d'un bloc avaient le même indice de difficulté: la taille de la cible et la distance à parcourir sont restées similaires pour toutes les tâches d'un bloc. Chaque bloc correspondait donc à un des indices de difficulté défini. L'ordre des blocs était contrebalancé par un carré latin.

Au final, nous avons recueilli 3276 temps de pointage étant donné que nous avons 13 participants \* 2 techniques \* 9 blocs \* 14 sélections de cibles. Par ailleurs, les événements comme le temps, l'erreur et la position courante du pointeur ont été enregistrés pendant la réalisation de la tâche par les utilisateurs.

#### **IV.1.4 Mesures quantitatives**

Basées sur les données enregistrées lors de l'évaluation, nous avons analysé les résultats en utilisant des statistiques descriptives et inférentielles (i.e. ANOVA).

##### **IV.1.4.1 Temps de mouvement et paramètres de Fitts**

La norme ISO inclut le temps moyen de mouvement en tant que variable dépendante se basant sur la loi de Fitts.

Nous avons donc tout d'abord analysé le temps moyen requis pour sélectionner la cible : la mesure du temps moyen pour la technique isométrique isométrique (*SpaceNavigator*) est de 10681ms et pour la technique isotonique (*Patriot*) est de 6265ms. Ces temps sont assez proches de ceux trouvés dans l'étude de (Froehlich, Hochstrate, Skuk, & Huckauf, 2006). L'analyse montre une différence significative entre les deux techniques ( $F_{(1,12)} = 179.05, p < 0.0001$ ). Le *Patriot* permet ainsi aux utilisateurs de réaliser la tâche de pointage significativement plus rapidement que le *SpaceNavigator*. Nous pensons que cette efficacité plus élevée de la technique isotonique en comparaison de la technique

isométrique est due à son utilisation plus usuelle et aux mouvements du bras moins contraints.

En plus du temps moyen global, nous avons analysé les mouvements des utilisateurs afin de mieux comprendre l'impact de la 3D sur les résultats de cette expérience. Nous avons étudié l'impact des mouvements réalisés dans une dimension le long d'un seul axe (mouvements simples) et ceux réalisés en 3 dimensions (mouvements complexes) afin de prendre en compte des cas qui puissent plus contraignants et avec plusieurs types de trajectoire. Une première analyse montre une différence significative entre les mouvements en termes de temps ( $F_{(1,12)} = 13.67, p < 0.001$ ) et de distance ( $F_{(1,12)} = 16.91, p < 0.0001$ ) quelle que soit la technique. Les utilisateurs effectuent la tâche plus rapidement et avec une plus petite longueur lors de la réalisation des mouvements simples que lors de la réalisation des mouvements complexes. Cela signifie que les utilisateurs ont moins de difficulté à manipuler le pointeur lors des mouvements simples que lors des mouvements complexes. Une deuxième analyse, centrée sur les mouvements simples, montre une différence significative entre les deux techniques en termes de temps ( $F_{(1,12)} = 56.74, p < 0.0001$ ) et de distance ( $F_{(1,12)} = 4.81, p < 0,05$ ). Concernant les mouvements complexes, une différence significative existe également entre les deux techniques pour le temps ( $F_{(1,12)} = 123.86, p < 0.0001$ ) et pour la distance ( $F_{(1,12)} = 47.68, p < 0,0001$ ). Dans les deux cas, il ressort également que le *Patriot* permet aux utilisateurs d'effectuer la tâche plus rapidement (6001ms contre 9505ms pour les mouvements simples et 6464ms contre 11563ms pour les mouvements complexes respectivement pour le *Patriot* et pour le *SpaceNavigator*) et avec une plus petite longueur (944px contre 1043px pour les mouvements simples et 983px contre 1250px pour les mouvements complexes respectivement pour le *Patriot* et pour le *SpaceNavigator*) pour les deux types de mouvements. Ces résultats confirment les meilleures performances de la technique isotonique.

Une deuxième partie de l'analyse consiste à calculer le temps moyen requis pour réaliser la tâche pour un certain ID. Dans la Figure 29, l'axe X et l'axe Y représentent respectivement les indices de difficulté (ID) et la moyenne des temps mesurés (en millisecondes) pour chaque ID, tout utilisateur confondu. Conformément au protocole d'analyse menée dans des expérimentations Fitts, ces valeurs sont données pour les 9 ID de l'expérimentation. Les droites solides et en pointillés sont les droites de régression obtenues respectivement pour la technique isométrique ( $MT = 5267.8 \times ID - 7543.4$  avec  $R^2 = 0.8632$ ) et pour la technique isotonique ( $MT = 2973.1 \times ID - 4019.7$  avec  $R^2 = 0.8163$ ). Nous remarquons que le temps moyen s'accroît plus rapidement pour la technique isométrique quand l'ID augmente : une interprétation nous conduit à conclure que cette technique n'est pas adaptée aux situations les plus difficiles (petites cibles, longues distances). Cette analyse met également en évidence un problème : la corrélation entre l'ID et le temps moyen est assez faible pour les deux techniques ( $R^2 < 0.9$ ). Nous observons aussi que la tâche de pointage pour les ID comprenant une distance élevée (3.87, 4.3 et 4.954) est plus difficile à réaliser pour les deux techniques, qui ne semblent donc pas adaptées à ce type de situation d'interaction.

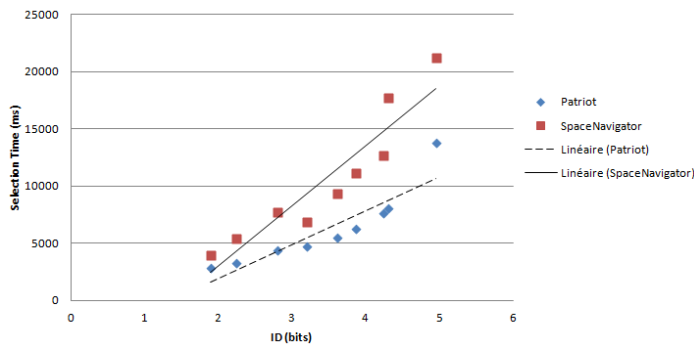


Figure 29. Régression linéaire MT vs ID

Le graphique révèle enfin que le temps moyen de mouvement est au-dessus de la droite de régression pour 3 ID (4.143, 4.7 et 5.672), ID pour lesquels la distance entre deux cibles est égale à 750px (la plus grande distance). En utilisant la méthode réalisée dans (Raynal, Gauffre, Bach, Schmitt, & Dubois, 2010), nous avons calculé une seconde équation de régression sans ces 3 ID (cf. Figure 30). Ce second calcul contribue à augmenter la corrélation. Les nouvelles équations de régression sont ( $MT = 3392 \times ID - 2500.7$  avec  $R^2 = 0.9244$ ) pour la technique isométrique et ( $MT = 1917.9 \times ID - 1044$  avec  $R^2 = 0.9559$ ) pour la technique isotonique. Nous remarquons que la corrélation est plus élevée pour les deux techniques sans la distance la plus élevée.

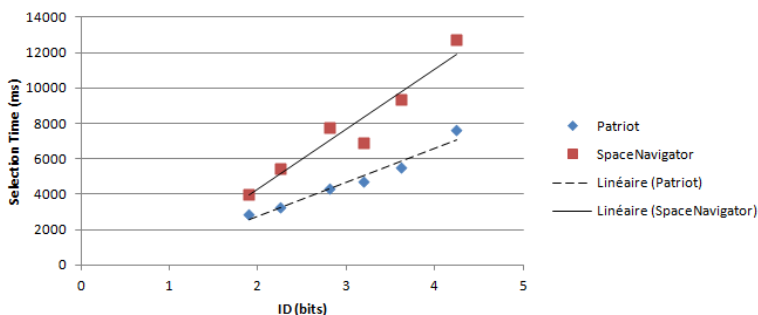


Figure 30. Régression linéaire MT vs ID sans les cibles situées à une distance de 750px. Il reste donc 6 IDs obtenus (1.89, 2.24, 2.8, 3.19, 3.61, 4.24) par la combinaison des tailles (25,40 et 55) et des distances (150 et 450)

Dans les deux cas (avec ou sans la distance de 750px), le profil des droites de régression est similaire : la droite de la technique isométrique est au-dessus de celle de la technique isotonique et s'accroît plus rapidement. Cette tendance confirme l'efficacité de la technique isotonique au regard de la technique isométrique en fonction des ID testés.

Notre première hypothèse (H1) est ainsi confirmée par cette analyse et notamment par les coefficients de corrélation proches de 0.95 : la loi de Fitts peut s'appliquer aux environnements 3D et aux techniques d'interaction avancée, même si le paramètre a est négatif. Ceci peut être expliqué par une activité musculaire incontrôlable pour l'utilisateur au début ou à la fin du mouvement de la tâche. De plus, le coefficient assez élevé de la pente (le paramètre b) compense ou « annule » le paramètre a négatif selon (MacKenzie,

1992). Le paramètre b de la technique isotonique est plus faible que celui de la technique isométrique ; ainsi le *Patriot* semble être moins sensible à la difficulté de la tâche à réaliser que le *SpaceNavigator*. Nous pensons que la manipulation séparée de chaque degré de liberté est plus simple avec la technique isotonique (*Patriot*) et que cela explique cette différence.

Nous pouvons également noter que les paramètres a et b obtenus pour nos équations varient fortement d'une technique à l'autre et fournissent ainsi un moyen clair et uniforme pour les différencier et les comparer.

#### **IV.1.4.2 Taux d'erreur**

Notre adaptation de la norme propose également la mesure du taux d'erreur en tant que variable dépendante. Nous avons donc analysé le taux d'erreur pour les deux techniques afin de mesurer la réussite de la tâche de pointage et l'efficacité de ces techniques. Le taux d'erreur mesuré pour la technique isométrique est plus faible que celui de la technique isotonique (4,4% vs 7,6%). L'analyse montre une différence significative entre ces techniques ( $F_{(1,12)} = 20.77, p < 0.005$ ). La technique isométrique permet aux utilisateurs de réaliser de petits mouvements pour sélectionner les cibles avec précision et permet également de maintenir une position neutre contrairement à la technique isotonique, pour laquelle les utilisateurs ont des difficultés à garder le pointeur en contact avec les cibles ; ces raisons peuvent expliquer la plus grande précision de cette technique isométrique. Ainsi, la technique isométrique est moins sujette aux erreurs que la technique isotonique.

#### **IV.1.4.3 Ratio d'inefficience**

Pour affiner l'étude de la performance, notre adaptation de la norme recommande de considérer le ratio d'inefficience. Le calcul du ratio d'inefficience pour les deux techniques révèle que le ratio d'inefficience de la technique isotonique (1,06) est inférieur à celui de la technique isométrique (1,56). Cela signifie que les trajectoires réalisées avec la technique isotonique sont 106% plus longues que la distance optimale et celles obtenues avec la technique isométrique sont 156% plus longues que la distance optimale. L'analyse montre une différence significative entre ces techniques ( $F_{(1,12)} = 218,75, p < 0.0001$ ). Nous en déduisons que la technique isotonique supporte une meilleure coordination que la technique isométrique.

#### **IV.1.4.4 Débit**

Parmi les variables dépendantes identifiées dans la norme (cf. III.2.1.3), le débit est une mesure de performance globale qui permet de comparer facilement deux techniques. Nous avons ainsi calculé le débit pour chaque technique d'interaction en utilisant les tailles des cibles et distances effectives, qui correspondent respectivement aux tailles ajustées des cibles en fonction des sélections des utilisateurs (largeur effective – We) et aux distances réalisées au cours de la tâche par les utilisateurs (distance effective – De). Ce calcul utilise une base par participant et par bloc afin de proposer le « débit général ». Les débits pour la technique isotonique et pour la technique isométrique sont respectivement de 2.1bps et

1.6gbps. L'effet majeur de la technique de pointage sur le débit est statistiquement significative ( $F_{(1,12)} = 5.76$ ,  $p < 0.05$ ). Étant donné la signification du débit, c'est-à-dire le taux de transfert d'informations lors de la tâche, nous en déduisons que la technique isotonique est plus performante que la technique isométrique. Cela renforce nos résultats précédemment détaillés (4.2.1) et confirme notre deuxième hypothèse (H2) sur la plus grande efficacité de la technique isotonique.

#### IV.1.5 Mesures qualitatives

Notre approche composite inclut également des aspects qualitatifs pour l'évaluation de ces techniques d'interaction. Pour l'analyse des résultats qualitatifs, nous avons utilisé des statistiques non-paramétriques (i.e. test de Mann and Whitney, test du signe), plus adaptées pour ce type de données.

##### IV.1.5.1 Evaluation du confort

Comme recommandé dans la partie confort et satisfaction du standard (cf. IV.1.2.2.2), les participants ont complété un questionnaire sur le confort, qui inclut deux types d'indices : des indices généraux et des indices sur la fatigue.

Selon la procédure décrite dans la section IV.1.3.5, les participants ont complété, dans une première phase, un questionnaire après avoir testé la première technique afin d'évaluer le confort de cette technique. Ce questionnaire est basé sur une échelle de Likert à 5 niveaux allant de « très négatif » (1) à « très positif » (5). Les résultats de ce premier questionnaire n'ont pas montré de différence significative selon un test de Mann and Whitney pour tous les indices, hormis pour la fatigue du bras. L'indice de fatigue du bras révèle une différence significative marginale ( $p=0.091$ ) : la technique isotonique semble plus fatigante pour le bras que technique isométrique. Le score moyen pour tous les indices de la première phase est 3,41 pour la technique isométrique et 3,54 pour la technique isotonique : ce résultat montre que les utilisateurs ont tendance à avoir un meilleur ressenti sur le confort pour la technique isotonique (*Patriot*).

Après avoir testé la seconde technique dans une seconde phase, les participants ont rempli une échelle pour comparer les deux techniques et ainsi déterminer si la dernière technique testée est pire, identique ou meilleure que la première d'après les mêmes indices. Nous avons noté qu'aucun effet d'apprentissage n'affecte l'analyse de ces questionnaires car les techniques ont été testées dans un ordre contrebalancé. Un test du signe, utilisé pour comparer des échantillons appariés, ne montre aucune différence significative ( $|Z|=-0.28$ ,  $p>0.5$ ) entre les deux techniques. Mais les résultats montrent que la technique isotonique tend à entraîner plus de fatigue pour le bras et l'épaule que la technique isométrique.

##### IV.1.5.2 Satisfaction des utilisateurs

L'adaptation de la norme recommande d'analyser l'utilisabilité des techniques avec un questionnaire SUS en plus du questionnaire sur le confort. Nous avons calculé un score SUS pour mesurer la facilité d'utilisation de chaque technique. Le score de la technique

isométrique (52,5) est marginal à un faible niveau alors que le score de la technique isotonique (76,3) est acceptable, d'après l'échelle définie dans (Bangor, Kortum, & Miller, 2008) et présentée par la Figure 31. Ceci montre que l'utilisabilité des techniques peut être améliorée, même si l'utilisabilité de la technique isotonique (*Patriot*) est bonne. Les deux scores SUS permettent d'établir que l'utilisabilité actuelle des techniques n'ont pas compromis leur utilisation lors des tâches de pointage.

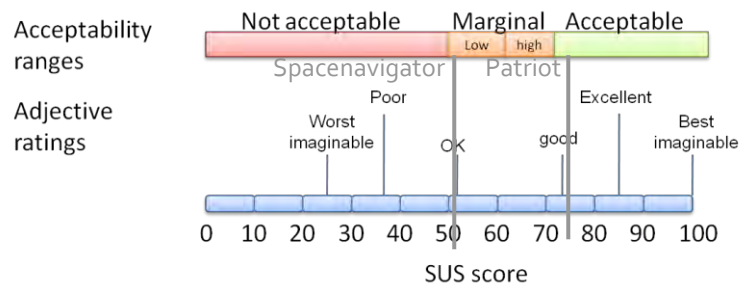


Figure 31: Echelle définie dans (Bangor, Kortum, & Miller, 2008) afin de déterminer le classement et l'applicabilité générale donnée par le score SUS

Comme suggéré par l'adaptation, des éléments du questionnaire SUMI ont également été soumis aux utilisateurs. Leurs réponses aux items du questionnaire SUMI soulignent que la technique isotonique est perçue comme plus stimulante et moins frustrante que la technique isométrique.

#### IV.1.5.3 Préférences des utilisateurs

Comme proposé dans l'adaptation du standard, nous avons utilisé des entretiens pour affiner l'analyse de la préférence des utilisateurs : les réponses des utilisateurs sont d'ordinaire des indicateurs fiables en ce qui concerne les développements possibles permettant d'atteindre un meilleur niveau d'utilisabilité.

En ce qui concerne la technique isométrique (basée sur le *SpaceNavigator*), les 3 points les plus positifs les plus fréquemment cités sont : un bon esthétisme du dispositif, la possibilité de réaliser des mouvements en 3D et la facilité d'utilisation. Les 3 points les plus négatifs les plus fréquemment cités sont : une association inappropriée entre les interactions en entrée et en sortie, en particulier pour les interactions en profondeur ; les difficultés à n'utiliser qu'un seul axe durant la tâche et enfin, son fonctionnement général. Concernant la technique isotonique (basée sur le *Patriot*), les 3 points les plus positifs les plus fréquemment cités sont : la facilité d'utilisation, la possibilité de réaliser des mouvements en 3D et la facilité de trouver des repères dans l'espace. Les 3 points les plus négatifs les plus fréquemment cités sont : la fatigue entraînée durant la tâche par la technique, le faible design du dispositif et le fait de garder le bras levé durant la tâche.

Ces résultats mettent en évidence deux différences majeures à propos de ces points : (1) la technique isométrique est principalement perçue comme « attrayante » et la technique isotonique comme « intuitive » ; (2) le point le plus négatif pour la technique isométrique est que les utilisateurs n'ont pas bien perçu la profondeur alors qu'ils ont pu trouver des repères



dans l'espace avec la technique isotonique pour se déplacer facilement en 3D. Même si le *Patriot* semble être plus « intuitif », les utilisateurs ont ressenti plus de fatigue du bras avec cette technique qu'avec le *SpaceNavigator*, il serait donc pertinent d'envisager de porter un nouvel intérêt sur son design et son utilisation. Par ailleurs, les utilisateurs n'ont fait aucun commentaire négatif sur la représentation et les indices 3D suggérés dans notre adaptation de la norme (cf. IV.1.2.2.1).

Concernant les préférences utilisateur, 85% des utilisateurs ont aimé interagir avec la technique isotonique et 77% d'entre eux ont estimé que cette technique était plus utilisable que la technique isométrique. Cette évaluation confirme donc notre 3<sup>ème</sup> hypothèse (H3). En effet, ils sont 69% à estimer que la technique isométrique est plus contraignante en termes de liberté de mouvement.

Pour conclure sur cette expérimentation comparative de nos deux techniques d'interaction pour une tâche de pointage en 3D, la mise en place de cette évaluation composite a permis de prendre en considération des aspects de performance et de satisfaction. L'objectif recherché est bien entendu de proposer une technique qui réponde au mieux aux différents besoins des utilisateurs : rapidité, précision, facilité d'apprentissage, satisfaction et confort. L'intérêt de recueillir différentes mesures couvrant ces besoins est donc de déterminer la technique la plus adaptée à la tâche évaluée aussi bien en termes de performance que de satisfaction utilisateur. La prise en compte de ces besoins est nécessaire pour un cas d'étude comme celui que nous avons présenté car les tâches sont répétitives et quotidiennes. D'après nos résultats, la technique isotonique pourrait ainsi être recommandée car elle est plus rapide, permet une meilleure coordination et a été préférée par les utilisateurs. Il resterait alors à proposer une solution pour limiter la fatigue ressentie par les utilisateurs.

#### IV.1.6 Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté une adaptation de la norme ISO 9241-9, qui propose un protocole structuré pour mener l'évaluation de techniques d'interaction pour une tâche de pointage en EV 3D.

L'adaptation de la norme comprend trois aspects principaux d'enrichissement qui tentent de répondre à ce besoin d'évaluer des caractéristiques particulières. Le premier aspect est l'ensemble des variables de l'expérience, qui est enrichi par une mesure de coordination afin de mieux comprendre les mouvements des utilisateurs en 3D et l'analyse explicite de la précision. Le deuxième aspect est l'ajustement de la tâche et des cibles pour s'adapter à des contextes de pointage en EV 3D : les formes, les arrangements, les représentations et les indices 3D sont proposés afin d'aider les utilisateurs à mieux percevoir la profondeur. Le rendu possède bien une perspective mettant en avant la profondeur des objets 3D et proposant ainsi un vrai rendu 3D. Le troisième aspect est l'ajout du questionnaire SUS au questionnaire sur le confort afin de permettre une comparaison facile entre les techniques en termes d'utilisabilité ; il fournit également une mesure globale, similaire au débit, mais

liés à la satisfaction et non à la performance. En marge de ces modifications majeures, des adaptations relatives au calcul du débit (throughput), de l'axe de la tâche et des distances ont été explicitées pour répondre aux contraintes apportées par le contexte 3D. Outre l'extension de cette norme et donc de la description du protocole d'évaluation, un outil logiciel a été proposé : il vise à instrumenter et à supporter l'exécution de l'expérimentation conformément à l'adaptation de la norme. Il consiste en un environnement virtuel 3D, dans lequel la tâche de pointage est effectuée en 3D, et un panneau de configuration conçu de manière à gérer les différents paramètres (par exemple, la largeur ou la distance des cibles), et à configurer l'enregistrement des traces. Cet environnement de mise en œuvre de l'adaptation de la norme permet de tendre vers une uniformisation de la réalisation du protocole décrit dans l'adaptation de la norme.

Pour illustrer l'utilisation et l'applicabilité de cette adaptation, nous nous sommes inspirés d'une tâche industrielle: la manipulation de capteurs sur une maquette 3D pour une campagne d'essais. D'après les résultats de l'expérience, la technique isotonique (*Patriot*) est plus efficace, plus utilisable et permet aux utilisateurs d'effectuer une tâche de façon plus coordonnée que la technique isométrique (*SpaceNavigator*) : en particulier, la moyenne des temps, les scores de débit et du SUS ainsi que le ratio d'inefficience sont meilleurs pour la technique isotonique. Par ailleurs, les entretiens montrent que les utilisateurs préfèrent utiliser la technique isotonique pour déplacer le pointeur car la manipulation semble plus naturelle. Cependant, cette technique peut être moins confortable à utiliser pour le bras ou l'épaule puisqu'elle a tendance à provoquer plus de fatigue que la technique isométrique.

Les résultats de ce type d'expérimentation ne sont pas toujours évidents à généraliser car ils correspondent à un contexte précis et à une situation donnée. Toutefois, les résultats de l'expérimentation montrent l'intérêt de proposer des techniques d'interaction avancée dans un milieu industriel répondant à un contexte et à une situation proches de ceux de l'expérimentation. Il est possible d'en déduire qu'interagir dans un EV 3D avec des techniques différentes de celles qui sont actuellement commercialisées s'avèrent des solutions d'interaction envisageables dans le cadre d'une tâche de pointage ou d'une tâche possédant des caractéristiques similaires.

Nous allons présenter dans la section suivante l'évolution de cette adaptation à la 3D à un environnement encore plus proche des systèmes à multi-vues. Ces systèmes sont complexes et agrègent des données de différents types autour d'un même concept. Le besoin d'unifier l'évaluation de la tâche de pointage dans ce type d'environnement est prépondérant car les caractéristiques de la tâche à considérer sont complexes.

## IV.2 Adaptation de la norme ISO 9241-9 à la tâche de pointage en 2D/3D

---

### IV.2.1 Introduction

L'intérêt d'évaluer la tâche de pointage hétérogène en 2D/3D s'avère de plus en plus primordial pour répondre aux besoins d'évaluation de systèmes complexes en émergence. Ces systèmes présentent un ensemble de données de types différents autour d'un même concept. Dans la continuité du travail d'unification de méthodes d'évaluation réalisé précédemment, l'évaluation de cette tâche de pointage s'avère intéressante car il s'agit d'une tâche d'interaction communément réalisée dans les systèmes interactifs. Dans le contexte spécifique d'hétérogénéité, nous avons établi que la tâche de pointage évaluée a comme principales caractéristiques d'hétérogénéité : les types de donnée, la séquence de la tâche et le découpage de la tâche.

La première caractéristique d'une tâche hétérogène est d'être composée par des types de donnée différents. Si on considère la taxonomie des types de donnée proposée par (Shneiderman, 1996) comme référence, nous pouvons prendre en compte 7 types de donnée dont 1D, 2D, 3D, réseau, etc. L'hétérogénéité dans la tâche de pointage vient donc de la possibilité à pouvoir pointer au moins deux types de donnée pour réaliser la tâche.

La deuxième caractéristique d'une tâche hétérogène est de posséder une séquence dans la tâche. La séquence décrit ainsi l'ordre dans lesquels les types de donnée sont pointés. Ils peuvent ainsi être pointés toujours dans le même ordre ou de façon alternée. Cela marque le fait que la tâche de pointage est réalisée de façon continue entre les types de donnée concernés.

La dernière caractéristique d'une tâche hétérogène est le découpage de la tâche en phases initiale et finale, afin d'affiner la caractéristique de séquence. Cela signifie que la tâche de pointage réalisée en séquence entre deux types de donnée est considérée comme possédant une phase initiale avec le 1<sup>er</sup> type de donnée à pointer et une phase finale avec le 2<sup>ème</sup> type de donnée à pointer. Les deux phases sont distinguées par un passage par la frontière entre les deux types de donnée, ce qui correspond à une zone de passage.

D'après ces caractéristiques, il est possible d'instancier un certain nombre de contextes différents de mise en œuvre de la tâche de pointage hétérogène. Dans notre cas, nous instancions la tâche de pointage de façon à pointer des cibles en 2D et en 3D en continu. Les deux types de donnée pourront aussi bien appartenir à la phase initiale qu'à la phase finale, mais pas aux deux phases pour la même tâche de pointage.

Pour parvenir à réaliser l'évaluation de la tâche de pointage hétérogène en 2D/3D, nous proposons de faire évoluer le protocole de la norme ISO 9241-9 adapté à la 3D. L'intérêt est ainsi de combiner des mesures quantitatives et qualitatives pour une tâche de pointage dans un contexte d'hétérogénéité. L'évaluation des performances et de la satisfaction de techniques d'interaction est alors possible pour une tâche de pointage en 2D/3D. La compréhension de la

stratégie de l'utilisateur est également une part importante de cette expérimentation en étudiant les mouvements réalisés par l'utilisateur, leur coordination et leur optimisation. Ce type d'expérimentation menée en contexte hétérogène est une préoccupation récente et peu de données forment un cadre de référence permettant de comprendre la stratégie que l'utilisateur peut mettre en place dans un tel contexte. Il est donc utile de se préoccuper de ce type de mesures.

Dans une première partie, nous décrivons et justifions les adaptations requises dans les différentes parties du protocole. Nous présentons également un outil logiciel utilisé pour conduire les évaluations de la tâche de pointage en contexte hétérogène. Enfin, pour montrer l'intérêt de notre cadre, nous présentons une instance de notre adaptation de la norme en détaillant une le protocole d'expérimentation, à conduire conformément à cette adaptation. L'objectif de l'expérimentation est de déterminer si une technique d'interaction peut répondre à des besoins en performance et en satisfaction pour la réalisation d'une tâche de pointage hétérogène 2D/3D.

Suite à l'adaptation de la norme ISO 9241-9 à la tâche de pointage en EV 3D, nous apportons une évolution complémentaire de façon à la faire progresser et qu'elle convienne à un environnement dans lequel plusieurs types de données sont combinés pour mener à bien la réalisation d'une tâche de pointage. La tâche de frappe multidirectionnelle est alors réalisée de façon à lier deux types de données différents, comme cela est possible dans des systèmes complexes à multi-vues. Le mouvement est multidirectionnel en considérant les mouvements de pointage dans les directions (x, y) pour les données 2D et dans les directions (x, y, z) pour les données 3D. L'intérêt de l'expérimentation est de pouvoir analyser les résultats en fonction des principales caractéristiques de la tâche qui sont les types de données, la séquence de la tâche (ordre des types pour décrire la tâche) et le découpage de la tâche (affinement de la séquence en phases initiale et finale). Pour mieux appréhender les résultats et comprendre de quelle façon ils répondent aux caractéristiques d'un environnement hétérogène, des méthodes spécifiques d'analyse sont mises en place afin de s'assurer que les différents aspects des caractéristiques sont couverts. Nous allons expliquer dans la section suivante les méthodes générales d'analyse des variables.

## IV.2.2 Méthodes de mesure des variables

Dans cette adaptation de la norme pour l'évaluation de la tâche de pointage en situation d'hétérogénéité 2D/3D, plusieurs méthodes de mesure nécessitent une adaptation. Nous les détaillons ci-après.

### IV.2.2.1 Niveau d'analyse

Nous avons décrit la tâche de pointage hétérogène comme comportant 3 caractéristiques principales que nous avons instanciées de la manière suivante pour les besoins de notre expérimentation : utilisation des types de donnée 2D et 3D, séquence des types de donnée en alternant 2D et 3D puis découpage de la tâche en phases initiale et finale de telle façon à avoir chaque type de donnée pour les deux phases (cf. IV.2.1). Notre adaptation recommande de réaliser les analyses des mesures sur deux niveaux afin de déterminer l'impact de ces caractéristiques de la tâche sur les performances des utilisateurs :

- Un niveau global qui prend en compte les deux phases de la réalisation de la tâche, soit la phase initiale effectuée dans un 1<sup>er</sup> type de donnée et une phase finale dans le 2<sup>nd</sup> type de donnée, et permet ainsi d'évaluer la technique d'interaction dans un environnement concret et complexe mêlant 2D et 3D,
- Un niveau détaillé qui décompose les analyses des mesures en fonction de la phase de la réalisation de la tâche et du type de donnée de celle-ci. Ce niveau a pour objectif de déterminer l'impact du découpage ou de la séquence sur la tâche. Il donne une indication pour chaque type de donnée impliqué et peut ainsi amener à privilégier une technique d'interaction plutôt qu'une autre si un type de donnée est majoritaire lors de la réalisation de la tâche.

Dans notre cas, nous avons donc 2 cas de figure :

1. une phase initiale en 2D (qu'on appellera 2D start dans la suite du document) suivie par une phase finale en 3D (qu'on appellera 3D end dans la suite du document).
2. une phase initiale en 3D (qu'on appellera 3D start dans la suite du document) suivie par une phase finale en 2D (qu'on appellera 2D end dans la suite du document) (cf. Figure 32).

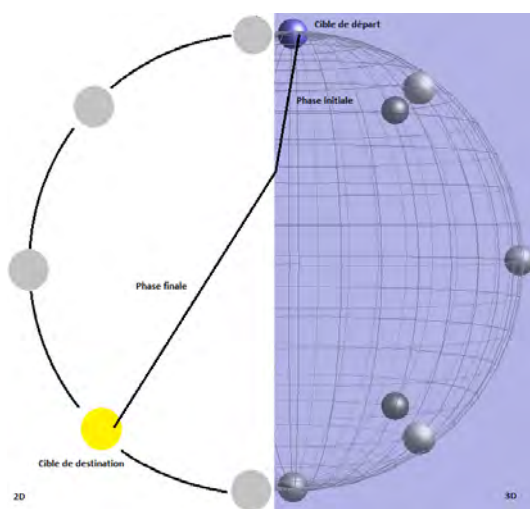


Figure 32 : Illustration des phases initiale et finale

On rappelle que l'une des caractéristiques des tâches de pointage hétérogène visée par cette adaptation de la norme est le découpage de la réalisation de la tâche hétérogène de pointage en une phase initiale portant sur un type de données et une phase finale portant sur un autre type de données. La première analyse du niveau détaillé 2 a pour objectif de déterminer l'impact de ce découpage sur la réalisation de la tâche et ce pour chaque type de donnée. Cette analyse vise donc à étudier les variations éventuelles du comportement de l'utilisateur face à un des types de données utilisés dans chacune des phases de réalisation de la tâche. Concrètement, elle permet de comparer les deux phases (initiale et finale) pour un même type de donnée et de savoir si les résultats d'une phase initiale portant sur de la 2D sont différents de ceux d'une phase finale portant également sur de la 2D. Il en est de même pour la 3D. L'analyse permet donc de déterminer si le type de données utilisé dans la première phase a un impact sur la réalisation de la tâche avec le type de données utilisé dans la seconde phase.

On rappelle également que l'une des caractéristiques des tâches de pointage hétérogène visée par cette adaptation de la norme est la séquence de mise en œuvre des différents types de données au cours de la réalisation de la tâche hétérogène de pointage. La deuxième analyse du niveau détaillé 2 a pour objectif de déterminer l'impact de la séquence sur la réalisation de la tâche. Cette analyse vise donc à étudier les variations éventuelles du comportement de l'utilisateur face à différents enchainements des types de données induit par les tâches. Concrètement, elle permet de comparer les résultats obtenus en phase initiale pour les deux types de donnée : ainsi il sera possible d'évaluer si les résultats obtenus pour une phase initiale sont différents pour les deux types de donnée. Le même type d'analyse est réalisé pour la phase finale.

La troisième analyse du niveau détaillé 2 a pour objectif de déterminer l'impact du découpage sur la réalisation de la tâche pour chaque séquence proposée. Cette analyse tient compte de l'importance de la séquence dans le découpage de la tâche. Elle vise donc à étudier si le comportement de l'utilisateur évolue au cours de chaque phase d'une même séquence, impliquant par exemple une phase initiale réalisée en 2D avec une phase finale réalisée en

3D (ou l'inverse). Concrètement l'analyse a pour but de déterminer s'il existe des différences de comportement entre les deux phases d'une même séquence, et par exemple de déterminer si plus de temps est requis dans une phase finale 3D que dans la phase initiale 2D correspondantes.

Le tableau ci-dessous (cf. Tableau 6) résume les analyses à réaliser en fonction des différents niveaux présentés précédemment :

Niveau d'analyse	Type d'analyse	But de l'analyse	Caractéristique de l'hétérogénéité de la tâche touchée par l'analyse
<b>Niveau global</b>	Globale	Déterminer la performance et la satisfaction globale	
<b>Niveau détaillé 1</b>	2D versus 3D	Déterminer l'impact du type de donnée sur la réalisation de la tâche globale	Types de donnée
<b>Niveau détaillé 2</b>	2D start versus 2D end et 3D start versus 3D end	Déterminer l'impact du découpage sur la réalisation de la tâche pour chaque type de donnée	Tâche en séquence
	2D start versus 3D start et 2D end versus 3D end	Déterminer l'impact de la séquence sur la réalisation de la tâche	Tâche en séquence
	2D start versus 3D end et 2D end versus 3D start	Déterminer l'impact du découpage sur la réalisation de la tâche pour chaque type de séquence	Tâche en séquence

Tableau 6 : Synthèse des analyses en fonction des caractéristiques de la tâche

#### IV.2.2.2 Zone de passage

Entre les deux phases, le curseur traverse la frontière séparant les deux types de donnée et ceci correspond un point de passage 3D. Ce point de passage peut révéler une stratégie empruntée par l'utilisateur : un point de passage par le milieu du support, ce qui montre que l'utilisateur ne privilégie pas un type de donnée en particulier ; un point de passage qui privilégie la 2D car l'utilisateur parcourt davantage de distance en 2D ; un point de passage qui privilégie la 3D car l'utilisateur parcourt davantage de distance en 3D (cf. Figure 33). La position 3D du curseur correspond à la position 3D de la technique. Cette position 3D est ainsi connue, même lorsque le curseur se situe dans le type de donnée 2D. Cela est rendu possible par l'utilisation de techniques d'interaction comportant au moins 3 degrés de liberté.

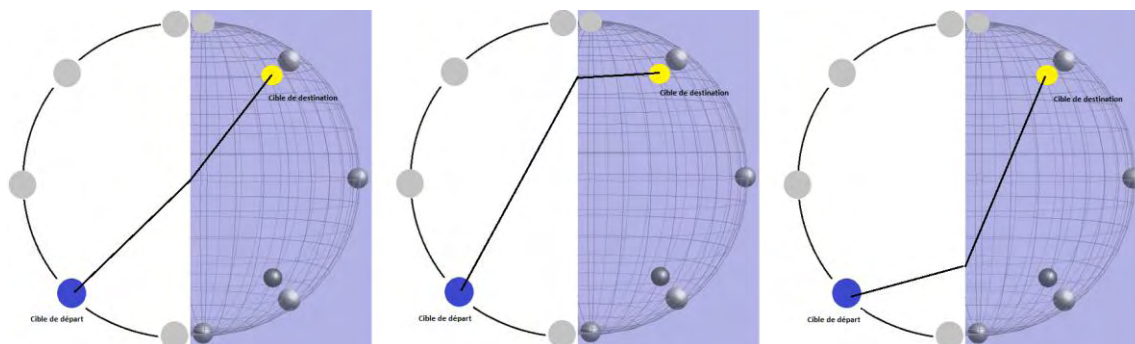


Figure 33 : Illustration de 3 types de point de passage (par le milieu, en privilégiant la 2D, en privilégiant la 3D)

Les différents points de passage des tâches de pointage sont situés dans une zone de passage qui englobe l'ensemble des points de passage 3D enregistrés au cours de l'expérimentation pour un bloc (cf. Figure 34).

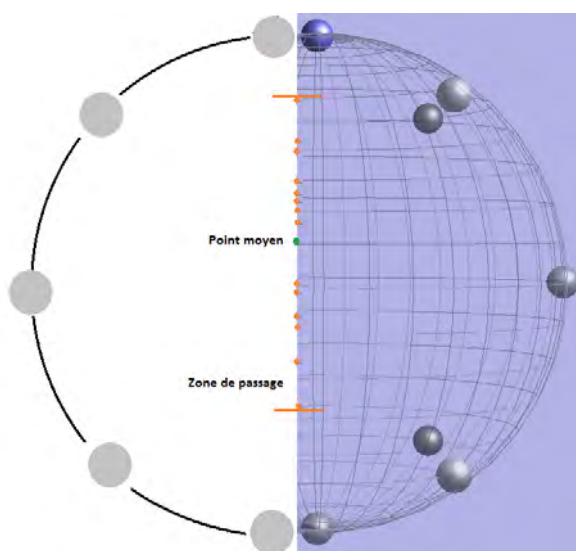


Figure 34 : Illustration d'une zone de passage pour un bloc avec la possibilité de mesurer un point moyen de passage

#### IV.2.2.3 Calcul de la Distance Effective ( $D_e$ ) et de la Distance Utilisateur ( $D_u$ )

Les différentes positions 3D du curseur, qui sont récupérées au cours de la tâche, sont utiles pour calculer les distances effectives ( $D_e$ ) et les distances de l'utilisateur ( $D_u$ ) (cf. Figure 35). La distance effective correspond à la distance euclidienne séparant le point de départ et le point de validation de la cible par l'utilisateur au cours d'une tâche de pointage. Il est possible de calculer cette distance sur chaque type de donnée en prenant en compte la zone de passage du curseur. La distance effective pour une phase initiale ( $D_{e\ start}$ ) est calculée entre la cible de départ et la zone de passage, considérée comme le point d'arrivée de la phase ; la distance effective pour une phase finale ( $D_{e\ end}$ ) est calculée entre la zone de passage, considérée comme le point de départ de la phase, et la cible d'arrivée. La distance effective globale est alors la somme de ces deux sous-distances effectives ( $D_e = D_{e\ start} + D_{e\ end}$ ). En mesurant la distance effective de cette manière, il est possible d'établir un ratio entre la distance effective mesurée en 2D et celle mesurée en 3D (ratio que l'on nommera par la suite Ratio de Distances Effectives).



La distance utilisateur (Du) correspond à la distance totale parcourue par le curseur au cours de la tâche de pointage. Comme pour la mesure de la distance effective, la zone de passage est utilisée dans la mesure de la distance utilisateur afin de distinguer la distance parcourue en 2D et celle parcourue en 3D.

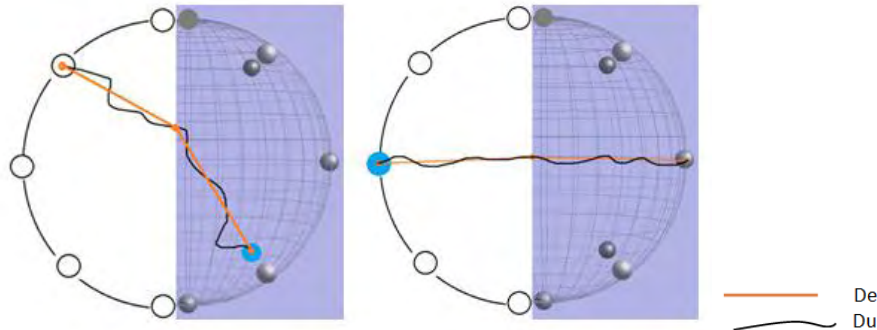


Figure 35 : Illustration de De et Du

#### IV.2.2.4 Calcul du ratio d'inefficience effective

Comme dans l'adaptation de la norme ISO à la 3D, nous avons utilisé la mesure du ratio d'inefficience, basée sur la formule de (Zhai & Milgram, 1998). Elle caractérise la coordination de l'utilisateur au cours de la tâche et elle s'appuie sur la différence existant entre la distance optimale et la distance utilisateur pour estimer la précision de l'utilisateur pour réaliser la tâche. Cependant, il n'est pas possible de mesurer de façon a priori une distance théorique optimale possible identique pour chaque utilisateur, pour 2 raisons :

1. nous ne pouvons pas anticiper le chemin parcouru par l'utilisateur. En effet, nous ne pouvons pas savoir a priori si l'utilisateur maîtrisera la profondeur du curseur dans la partie 2D de la tâche afin de faciliter la réalisation de la tâche dans la partie 3D et traversera ainsi la frontière entre les deux types de donnée avec une profondeur égale à 0. Sans connaître de façon anticipée la valeur de la profondeur pour la zone de passage, il ne nous est pas possible de connaître avant même l'expérimentation le chemin privilégié par l'utilisateur.
2. nous n'avons pas de connaissance précise du chemin le plus court à emprunter entre les deux types de donnée. En effet, il n'est pas possible de déterminer le chemin optimal car nous n'avons pas de références sur les performances obtenues pour ce type de tâche hétérogène et ainsi savoir si le chemin optimal correspond à la somme du chemin optimal réalisé en 2D et de celui réalisé en 3D. Par ailleurs, il nous est difficile de savoir si ce chemin optimal passera par le centre du support avec une profondeur égale à 0.

Toutefois, il est possible d'estimer le ratio d'inefficience en combinant les deux distances De et Du définies ci-dessus et en remplaçant la distance optimale de la formule initiale par la distance effective (De). Nous avons ainsi nommé « ratio d'inefficience effective », cette adaptation du ratio d'inefficience de Zhai.

#### IV.2.2.5 Calcul de l'axe de la tâche

Notre adaptation à la 2D/3D a aussi un effet sur le calcul de l'axe de la tâche pris en compte lors de la tâche de pointage et qui considère les mouvements de l'utilisateur durant la tâche. Cet axe de la tâche a été adapté de façon à prendre en compte les différents types de donnée. L'axe de la tâche est découpé entre les deux types de donnée et il est mesuré soit sur 2 dimensions (x, y) pour le type de donnée 2D, soit sur 3 dimensions (x, y, z) pour le type de donnée 3D. Il sert à calculer le débit et il est en particulier utilisé pour calculer la largeur de la cible effective et pour déterminer la distance effective ( $D_e$ ). L'axe de la tâche passe par les points utilisés pour calculer  $D_e$ , c'est-à-dire le point de sélection de départ et le point de sélection d'arrivée, ainsi que le point de passage entre les deux types de donnée.

L'axe de la tâche permet de caractériser les types d'ajustement réalisés par l'utilisateur pour traverser la frontière vers la 3D (cf. Figure 36). L'utilisateur peut ajuster son mouvement en Y, en modifiant la hauteur de son mouvement ; en X, en modifiant le déplacement horizontal de son mouvement ; en Z, en modifiant la profondeur de son mouvement.

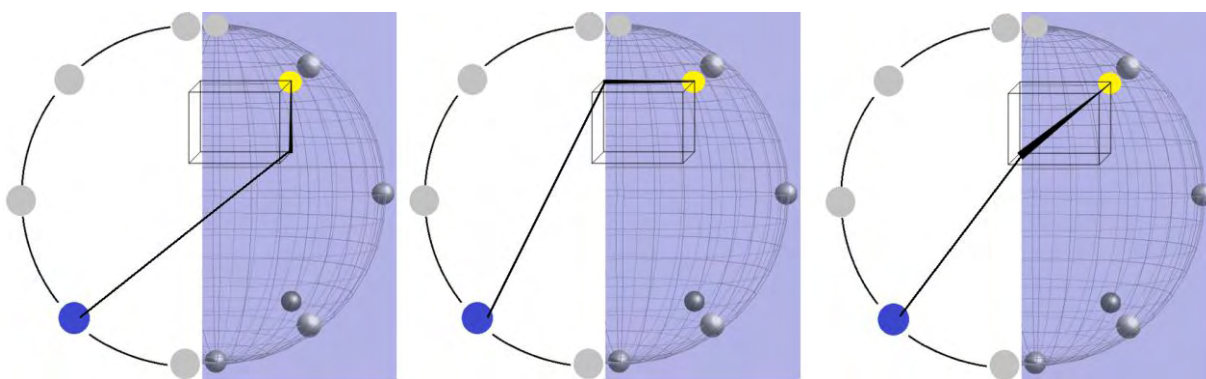


Figure 36 : Illustrations des différents types d'ajustement (en Y, en X, en Z)

#### IV.2.2.6 Calcul des ID

Un autre impact de l'adaptation 2D/3D est le mode de calcul des ID qui devient lié au type de donnée, du fait de la combinaison des deux types de donnée dans la tâche de pointage hétérogène. Pour la partie réalisée en 2D, le calcul des ID reste conforme à ce qui est proposé dans la norme ISO et pour la partie réalisée en 3D, le calcul des ID reste conforme à ce qui a été proposé dans notre adaptation à la 3D. Ils tiennent donc compte de la taille du pointeur 3D et sont donc légèrement différents des ID 2D.

$$ID_{2D} = \log_2(D/W + 1)$$

$$ID_{3D} = \log_2(D/W_{\text{ curseur}} + W_{\text{ cible}} + 1)$$

Nous détaillons dans la section suivante, l'adaptation de 5 dimensions extraites de la norme initiale et de notre adaptation à la 3D : 3 dimensions quantitatives, qui sont 1) tâche, 2) cibles, 3) variables, puis 2 dimensions qualitatives, qui sont 4) représentation et 5) confort et satisfaction. Pour chaque dimension, nous présentons et justifions l'extension que nous avons apportée afin d'adapter le standard à ce contexte de pointage. Ensuite, nous présentons les éléments de l'instrumentation que nous proposons comme support à la mise en œuvre de notre adaptation de la norme.

### **IV.2.3 Adaptation du standard d'un point de vue performance**

Trois aspects majeurs de la norme structurent l'évaluation quantitative : tâche, cibles et variables.

#### **IV.2.3.1 Tâche**

Dans notre adaptation à la 2D/3D, tout comme pour l'adaptation à la 3D, nous avons conservé l'instruction donnée aux utilisateurs sur la tâche, l'existence d'une cible source et de destination, ainsi que le besoin de confirmation de la sélection. Toutefois, des adaptations ont concerné le pointage de la cible source et celle de destination. En effet, la cible source appartient à un premier type de donnée, par exemple 2D, et la cible de destination à un deuxième type de donnée, par exemple 3D. Ainsi l'utilisateur réalise la tâche de pointage en séquence sur deux types de donnée différents. Les deux types de donnée sont aussi bien utilisés en tant que cible source qu'en tant que cible de destination, d'où le besoin de contrebalancer l'ordre des tâches.

Une autre adaptation a été apportée pour la validation. Pour la partie 2D, la validation reste similaire à la norme initiale. En effet, la validation est effective du moment que le curseur représenté par une croix d'un pixel est en contact avec la cible. Pour la partie 3D, nous avons conservé l'adaptation proposée précédemment en considérant que la cible peut être validée dès qu'un pixel du pointeur est en contact avec la cible, sans pour autant être entièrement inclus dans la cible. Pour les deux types de donnée, en absence de contact, la validation lève une erreur. En ce qui concerne la difficulté de la tâche, la solution proposée en 2D ne modifie en rien son calcul, et celle proposée en 3D n'apporte pas de biais particulier à la tâche car la taille du curseur est prise en compte dans la difficulté de la tâche en plus de la taille de la cible pour ce type de donnée, comme pour l'adaptation à la 3D. Cela signifie que pour une même taille et une même distance, les indices de difficulté ne sont pas strictement identiques entre les deux types de donnée.

#### **IV.2.3.2 Cibles**

Dans cette adaptation à la 2D/3D, nous avons conservé la représentation des cibles sous forme de cercle pour la 2D et sous forme de sphère pour la 3D. Ainsi, une seule mesure pour la taille de la cible est conservée quel que soit le type de donnée et quel que soit le mouvement réalisé : la taille des cibles correspondra donc au diamètre des cibles dans les deux cas.

Sur le même principe que la norme ISO 9241-9, la recommandation concernant la disposition des cibles et leur position a été adaptée de façon à prendre en compte les deux types de donnée.

Les cibles à pointer sont équitablement disposées sur la circonférence des supports : un support circulaire pour la partie en 2D et sphérique pour la partie en 3D. Elles sont toutes disposées à équidistance du centre du support, quel que soit le type de données, cette distance est égale au rayon de chaque support (sphère et cercle ayant le même rayon). Chaque cible conserve un symétrie par rapport au centre du support, grâce au respect d'un angle de  $45^\circ$  en partant du centre du support et séparant les cibles (cf. Figure 37).

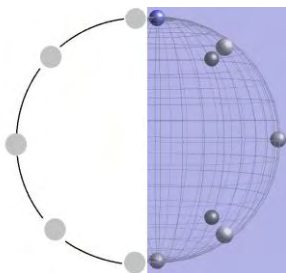


Figure 37 : Présentation de la disposition des cibles 2D et 3D sur les supports circulaire et sphérique

### IV.2.3.3 Variables

Dans cette section, nous allons présenter l'ensemble des variables indépendantes et dépendantes prises en compte dans l'expérimentation. Nous détaillons également les différents calculs établis pour mesurer les variables dépendantes.

#### IV.2.3.3.1 Liste des variables

Tout comme pour la norme ISO (ISO 9241-9 - B.5) et notre adaptation à la 3D, des variables indépendantes et dépendantes sont recommandées. Dans le standard, les variables indépendantes inhérentes à ce type d'expérimentation sont les techniques en entrée, la taille des cibles, la distance entre les cibles et par conséquent les indices de difficulté (ID) qui en résultent. Les variables dépendantes citées dans la norme ISO incluent le débit de la technique (TP) et le temps moyen de pointage. Ces variables correspondent respectivement à une **mesure globale de performance**, dans le but d'offrir un seul score récapitulatif, et à la **rapidité** d'une technique d'interaction.

Comme nous l'avons expliqué précédemment, les variables dépendantes seront analysées selon plusieurs niveaux d'analyse de façon à avoir une vue globale et détaillée de l'impact de l'hétérogénéité sur les résultats. L'analyse globale a pour objectif de comparer facilement les performances des techniques d'interaction pour la réalisation de la tâche de pointage hétérogène. L'analyse détaillée de 1<sup>er</sup> niveau a pour but de comparer l'impact global du type de donnée sur les performances des techniques d'interaction pour la réalisation de la tâche de pointage hétérogène. L'analyse détaillée de 2<sup>ème</sup> niveau a pour objectif de comparer l'impact des caractéristiques d'une tâche de pointage hétérogène (type de donnée, séquence, découpage) sur les performances des techniques d'interaction pour la réalisation de la tâche de pointage hétérogène.

Les variables dépendantes ajoutées dans notre adaptation à la 3D et que nous avons conservées dans cette nouvelle adaptation incluent le taux d'erreur et le ratio d'inefficience. Ces deux

mesures définissent l'**efficacité** d'une technique d'interaction et correspondent respectivement à la précision et à la coordination de l'utilisateur. Ces mesures sont des indicateurs pertinents pour le critère d'efficacité car :

- La précision est une mesure classique,
- la coordination de l'utilisateur permet de :
  - Niveau global : compléter la mesure de précision car les mouvements réalisés en 3D et entre plusieurs types de donnée sont complexes et la précision ne suffit pas,
  - Niveau détaillé : mesurer l'impact des caractéristiques de l'hétérogénéité de la tâche (séquence de la tâche, impact d'un type de données sur un autre, découpage en phase initiale et en phase finale) sur les mouvements réalisés avec la technique par l'utilisateur.

Dans le but de compléter les variables précédentes et de préciser l'**efficience** d'une technique d'interaction, nous recommandons en plus dans les situations 2D/3D l'utilisation de deux nouvelles variables dépendantes : la sensibilité à la difficulté de la tâche et la résistance à combiner deux types de donnée. Ces mesures sont des indicateurs pertinents pour le critère d'efficience car :

- la sensibilité à la difficulté de la tâche définit le caractère de la technique à supporter le niveau de difficulté de la tâche et est utile pour déterminer l'impact de la difficulté effective de la tâche sur sa réalisation,
- la résistance à combiner deux types de données est la capacité de la technique à être utilisée sur deux types de donnée de façon continue et permet de :
  - Niveau global : mesurer la répartition des performances réalisées dans les deux types de donnée pour la tâche de pointage hétérogène évaluée. L'intérêt de cette mesure est de comprendre le comportement de l'utilisateur face à l'hétérogénéité de la tâche et à l'interaction avec deux types de donnée. Nous allons nous intéresser par exemple à comparer les distances effectives obtenues pour les deux types de donnée et déterminer si elles sont identiques ou différentes.
  - Niveau détaillé : illustrer concrètement l'impact des caractéristiques de l'hétérogénéité de la tâche (séquence de la tâche, impact d'un type de données sur un autre, découpage en phase initiale et en phase finale) sur les mouvements réalisés avec la technique par l'utilisateur. Par exemple, nous allons comparer pour une même phase des ratios calculés à partir des distances effectives mesurées en 2D et en 3D.

L'ensemble de ces variables dépendantes et leur lien avec les critères d'efficacité et d'efficacité de l'utilisabilité sont détaillés dans le tableau ci-dessous (cf. Tableau 7):

<u>Critères</u>	<u>Mesures</u>
Performance (variables quantitatives)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesure globale de performance</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Efficience</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapidité</li> <li>• Sensibilité à la difficulté de la tâche</li> <li>• Résistance à combiner deux types de données</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Efficacité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Précision</li> <li>• Coordination de l'utilisateur</li> </ul>

Tableau 7: Liste des mesures de l'expérimentation associées aux critères

Le tableau ci-dessous (cf. Tableau 6) récapitule les variables dépendantes liées aux différentes mesures d'après les niveaux d'analyse. Nous détaillons leur calcul dans les sections suivantes.

Mesures	Variables dépendantes
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Rapidité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Global : Moyenne des temps de réalisation de la tâche (ms)</li> <li>▪ Détaillé : Temps par type de données (ms)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Sensibilité à la difficulté de la tâche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Moyenne des temps par IDe (ms)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Résistance à combiner deux types de données</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zone de passage entre les deux types de données</li> <li>▪ Ratio De 2D / De 3D (ratio de distances effectives - RDE)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Précision</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Global : Taux d'erreur</li> <li>▪ Détaillé : Taux d'erreur par type de donnée</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Coordination de l'utilisateur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ratio distance utilisateur / distance effective (ratio d'inefficience effective – RIE)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Mesure globale de performance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Global : Throughput (bits/sec)</li> <li>▪ Détaillé : TP par type de donnée</li> </ul>

Tableau 8 : Liste des variables dépendantes associées aux mesures

## IV.2.3.3.2 Mesures des variables

Dans un premier temps, nous allons décrire les variables liées au critère de l'efficacité de la technique.

Rapidité

L'objectif de cette mesure est de définir la rapidité de la réalisation de la tâche selon les caractéristiques de la tâche de pointage. Le temps global correspond au temps mesuré pour réaliser la tâche du point de départ dans un type de donnée au point de validation de l'utilisateur dans l'autre type de donnée. Le temps global correspond donc à la somme du temps réalisé en 2D avec celui réalisé en 3D.

Nous définissons deux mesures globales de temps supplémentaires :  $T_{2D}$  global est le temps global mesuré en 2D et qui correspond à la somme des temps mesurés en phase initiale ( $T_{2D}$  start), soit d'une cible de départ 2D à la zone de passage, et ceux mesurés en phase finale ( $T_{2D}$  end), soit de la zone de passage à une cible d'arrivée 2D. Le même principe est appliqué au temps global mesuré en 3D.

Niveau d'analyse	Variables dépendantes	Mesures	Calculs
Niveau global	Moyenne des temps de réalisation de la tâche (ms)	Moyenne des temps mesurée entre la sélection (release du contacteur) de la cible de départ et la sélection (pression) de la cible d'arrivée (sans le temps de recherche de la cible de destination).	$temps\ global = T_{2D} + T_{3D}$
Niveau détaillé 1	Temps par type de données (ms)	Moyenne des temps mesurée pour un type de données.	$T_{2D}\ global = T_{2D}\ start + T_{2D}\ end$ $T_{3D}\ global = T_{3D}\ start + T_{3D}\ end$

Après avoir mesuré le temps pour le 1<sup>er</sup> niveau de détail qui permet de comparer les résultats par type de donnée, il est possible de décomposer l'étude du temps en 3 formes complémentaires en vue de déterminer l'impact des caractéristiques de la tâche hétérogène sur les performances de l'utilisateur.

On rappelle que l'une des caractéristiques des tâches de pointage hétérogène visée par cette adaptation de la norme est le découpage de la réalisation de la tâche hétérogène de pointage en une phase initiale portant sur un type de données et une phase finale portant sur un autre type de données. La première analyse du niveau détaillé 2 a pour objectif de déterminer l'impact de

ce découpage sur la réalisation de la tâche et ce pour chaque type de donnée. Cette analyse vise donc à étudier les variations éventuelles du comportement de l'utilisateur face à un des types de données utilisés dans chacune des phases de réalisation de la tâche. Concrètement, elle permet de comparer les deux phases (initiale et finale) pour un même type de donnée et de savoir si le temps de la phase initiale portant sur de la 2D est différent de celui de la phase finale portant également sur de la 2D. Il en est de même pour la 3D. L'analyse permet donc de déterminer si le type de données utilisé dans la première phase a un impact sur le temps de réalisation de la tâche avec le type de données utilisé dans la seconde phase.

On rappelle également que l'une des caractéristiques des tâches de pointage hétérogène visée par cette adaptation de la norme est la séquence de mise en œuvre des différents types de données au cours de la réalisation de la tâche hétérogène de pointage. La deuxième analyse du niveau détaillé 2 a pour objectif de déterminer l'impact de la séquence sur la réalisation de la tâche. Cette analyse vise donc à étudier les variations éventuelles du comportement de l'utilisateur face à différents enchaînements des types de données induit par les tâches. Concrètement, elle permet de comparer le temps obtenu en phase initiale pour les deux types de donnée : ainsi il sera possible d'évaluer si ce temps obtenu pour une phase initiale est différent pour les deux types de donnée. Le même type d'analyse est réalisé pour la phase finale.

La troisième analyse du niveau détaillé 2 a pour objectif de déterminer l'impact du découpage sur la réalisation de la tâche pour chaque séquence proposée. Cette analyse tient compte de l'importance de la séquence dans le découpage de la tâche. Elle vise donc à étudier si le comportement de l'utilisateur évolue au cours de chaque phase d'une même séquence, impliquant par exemple une phase initiale réalisée en 2D avec une phase finale réalisée en 3D (ou l'inverse). Concrètement l'analyse a pour but de déterminer s'il existe des différences de comportement entre les deux phases d'une même séquence, et par exemple de déterminer si plus de temps est requis dans une phase finale 3D que dans la phase initiale 2D correspondantes.



Niveau d'analyse	Type d'analyse	But	Analyse des résultats
Niveau détaillé 2	2D start versus 2D end et 3D start versus 3D end	Déterminer l'impact du découpage sur la réalisation de la tâche en comparant les résultats par type de donnée en fonction de la phase	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si les mêmes différences entre la phase initiale et la phase finale en 2D et en 3D sont trouvées, alors les phases initiales ont un impact similaire sur la phase finale de la tâche et sont réalisées dans un même ordre de rapidité</li> <li>• Si les différences ne sont pas les mêmes, alors les phases initiales et finales ont un impact sur la tâche</li> </ul>
	2D start versus 3D start et 2D end versus 3D end	Comparer l'impact de la séquence sur la réalisation de la tâche de pointage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si les mêmes différences sont trouvées, alors la séquence n'a pas d'impact sur la réalisation de la tâche et la tâche a été réalisée plus rapidement dans un type de donnée que dans l'autre</li> <li>• Si les différences ne sont pas les mêmes, alors la séquence a un impact sur la réalisation de la tâche</li> </ul>
	2D start versus 3D end et 2D end versus 3D start	Comprendre l'impact du découpage sur la réalisation de la tâche en comparant les résultats des 2 phases de la tâche de pointage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si des différences entre les résultats sont les mêmes, alors les phases initiales ont un impact similaire sur la phase finale de la tâche et sont réalisées dans un même ordre de rapidité</li> <li>• Si les différences ne sont pas les mêmes, alors les phases initiales et finales ont un impact sur la tâche</li> </ul>

### Sensibilité à la tâche

L'objectif est de déterminer l'impact de l'IDe sur la réalisation de la tâche. La moyenne des temps est mesurée entre la sélection de la cible de départ et la sélection de la cible d'arrivée et ce pour chaque IDe calculé. La droite de régression et le coefficient de corrélation sont à calculer en fonction de cette moyenne des temps. Contrairement à l'étude classique de Fitts où l'ID est mis en correspondance avec la moyenne des temps réalisés lors de l'expérimentation, nous utilisons les valeurs d'IDe pour construire la droite de régression.

### Résistance à combiner deux types de données

- Zone de passage entre les deux types de données

L'objectif est de caractériser la stratégie de l'utilisateur. La profondeur étant prise en compte au cours de l'expérimentation et notamment lors du passage d'un type de donnée à l'autre, il s'avère nécessaire de calculer la hauteur et la profondeur d'une boîte englobante, en mesurant l'écart-type existant en hauteur pour Y (SDy) et en profondeur pour Z (SDz) de la zone de passage, en caractérisant la répartition des points de passage en y et en z autour de leur valeur moyenne respective.

$$SDy = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}}$$

$$SDz = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n - 1}}$$

La comparaison globale des écarts-types rend possible l'apparition de différences de stratégie utilisée pour chaque technique. Pour un 1<sup>er</sup> niveau détaillé, il s'avère intéressant de réaliser le calcul par distance théorique (puisque'elle impacte la taille de la frontière) et par ID théorique pour chaque TI, pour tous les utilisateurs et tâches confondus. Pour un niveau de détail plus fin, il est possible de comparer les zones de passage selon la séquence de la tâche de pointage afin de mesurer l'impact de celui-ci sur la zone de passage :

Niveau d'analyse	Type d'analyse	But
Niveau détaillé 2	2D start - 3D end versus 2D end - 3D start	Etudier l'impact de la séquence (2D vers 3D versus 3D vers 2D) sur la stratégie de franchissement de la frontière

- Ratio de distances effectives – RDE

L'objectif est de caractériser la stratégie de l'utilisateur et d'en déduire l'adéquation de la technique à la tâche en fonction des types de donnée. En effet, la distance effective a pour objectif de mesurer la distance euclidienne entre un point de départ et un point d'arrivée. Il est possible de calculer les distances effectives pour chaque type de donnée et de déterminer ainsi si une distance effective pour un type de donnée est égale, supérieure ou inférieure à la distance effective mesurée pour l'autre type de donnée. La variable est proposée dans notre étude pour étudier s'il existe une différence dans le comportement des utilisateurs vis-à-vis des deux types de données et savoir si la technique d'interaction les amène à privilégier un type de donnée plutôt qu'un autre, i.e. à maximiser les déplacements dans un espace plutôt qu'un autre (cf. Figure 38).

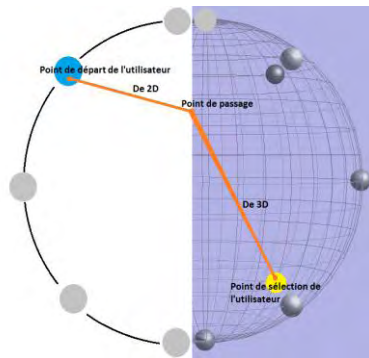


Figure 38 : Détail des différents éléments à prendre en compte dans le calcul du RDE

Pour mesurer la distance effective globale en 2D, nous considérons qu'il est nécessaire d'ajouter les distances réalisées lors de la phase initiale, soit d'une cible de départ en 2D jusqu'à la zone de passage, et lors de la phase finale, soit de la zone de passage jusqu'à la cible d'arrivée en 2D. Il en est de même pour la distance effective globale en 3D.

Niveau d'analyse	Variables dépendantes	Mesures	Calculs
Niveau global	RDE global	Calcul du RDE moyen pour chaque TI, pour tous les utilisateurs et tâches confondus pour faire apparaitre des différences globales	$RDE = De_{2D} / De_{3D}$

Les formules correspondant à la mesure de la distance effective parcourue en 2D et en 3D sont respectivement :

$$De_{2D} = De_{2D} \text{ start} + De_{2D} \text{ end}$$

$$De_{3D} = De_{3D} \text{ start} + De_{3D} \text{ end}$$

Les résultats du ratio de distances effectives peuvent être analysés de la façon suivante :

- Si  $RDE = 1$ , alors  $De_{2D} = De_{3D}$  et aucun type de donnée n'a été privilégié lors de la réalisation de la tâche. Dans ce cas, la distance effective globale mesurée en 2D et celle mesurée en 3D sont identiques et signifient que l'utilisateur a été aussi régulier dans les deux types de donnée au cours de la tâche et qu'il n'a pas essayé de favoriser son déplacement dans un type de donnée par rapport à l'autre.
- Si  $RDE > 1$ , alors  $De_{2D} > De_{3D}$  et la 2D a été privilégiée lors de la réalisation de la tâche
- Si  $RDE < 1$ , alors  $De_{2D} < De_{3D}$  et la 3D a été privilégiée lors de la réalisation de la tâche

En analysant plus finement les résultats du ratio, il est possible d'en déduire l'impact des caractéristiques de la tâche hétérogène et l'enjeu possible sur la navigation entre les deux types de séquence.

La première analyse du niveau détaillé 2 a pour objectif de déterminer l'impact du découpage sur la réalisation de la tâche pour chaque séquence proposée. Cette analyse tient compte de l'importance de la séquence dans le découpage de la tâche. Elle vise donc à étudier si le comportement de l'utilisateur évolue au cours de chaque phase d'une même séquence, impliquant par exemple une phase initiale réalisée en 2D avec une phase finale réalisée en 3D (ou l'inverse). Concrètement l'analyse a pour but de déterminer s'il existe des différences de comportement entre les deux phases d'une même séquence, et par exemple de déterminer si plus de distance est requis dans une phase finale 3D que dans la phase initiale 2D correspondantes.

On rappelle que l'une des caractéristiques des tâches de pointage hétérogène visée par cette adaptation de la norme est la séquence de mise en œuvre des différents types de données au cours de la réalisation de la tâche hétérogène de pointage. La deuxième analyse du niveau détaillé 2 a pour objectif de déterminer l'impact de la séquence sur la réalisation de la tâche. Cette analyse vise donc à étudier les variations éventuelles du comportement de l'utilisateur face à différents enchainements des types de données induit par les tâches. Concrètement, elle permet de comparer le ratio de distances effectives obtenu en phase initiale pour les deux types de donnée : ainsi il sera possible d'évaluer si ce ratio obtenu pour une phase initiale est différent pour les deux types de donnée. Le même type d'analyse est réalisé pour la phase finale.

On rappelle également que l'une des caractéristiques des tâches de pointage hétérogène visée par cette adaptation de la norme est le découpage de la réalisation de la tâche hétérogène de pointage en une phase initiale portant sur un type de données et une phase finale portant sur un autre type de données. La première analyse du niveau détaillé 2 a pour objectif de déterminer l'impact de ce découpage sur la réalisation de la tâche et ce pour chaque type de donnée. Cette analyse vise donc à étudier les variations éventuelles du comportement de l'utilisateur face à un des types de données utilisés dans chacune des phases de réalisation de la tâche. Concrètement, elle permet de comparer les deux phases (initiale et finale) pour un même type de donnée et de savoir si le ratio de distances effectives de la phase initiale portant sur de la 2D

est différent de celui de la phase finale portant également sur de la 2D. L'analyse permet donc de déterminer si le type de données utilisé dans la première phase a un impact sur le temps de réalisation de la tâche avec le type de données utilisé dans la seconde phase.

Niveau d'analyse	Type d'analyse	But	Analyse des résultats
Niveau détaillé 2	De <sub>2D</sub> end / De <sub>3D</sub> start et De <sub>2D</sub> start / De <sub>3D</sub> end	Déterminer l'impact du découpage sur la réalisation de la tâche (dans un sens puis dans l'autre, enjeu de navigation)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si les résultats sont identiques (résultats &gt; 1), alors la distance effective est supérieure en 2D et cette dimension a été privilégiée</li> <li>• Si les résultats sont différents (au moins un résultat &lt; 1), alors le découpage a un impact sur la stratégie de réalisation de la tâche</li> </ul>
	De <sub>2D</sub> end / De <sub>3D</sub> end et De <sub>2D</sub> start / De <sub>3D</sub> start (Minimiser la distance en 3D)	Comparer les phases finales et initiales en 2D et en 3D (enjeu de pointage) pour identifier si la séquence de la tâche a un impact sur le pointage et / ou sur la navigation.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si les résultats sont identiques (résultats &gt; 1), alors la distance parcourue pour chaque phase est identique et est supérieure en 2D</li> <li>• Si les résultats sont différents (au moins un résultat &lt; 1), alors les phases ont un impact sur la distance effective parcourue</li> </ul>
	De <sub>2D</sub> start / De <sub>2D</sub> end et De <sub>3D</sub> start / De <sub>3D</sub> end	Comparer la réalisation des deux phases de la tâche sur un même type de données pour identifier si le découpage de la tâche a un impact sur le pointage et / ou sur la navigation.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si les résultats sont identiques (résultats &gt; 1), alors la distance parcourue pour la phase initiale est identique à celui de la phase finale pour un même type de données et est supérieure pour la phase initiale de la tâche</li> <li>• Si les résultats sont différents (au moins un résultat &lt; 1), alors le découpage de la tâche a un impact sur la distance effective parcourue</li> </ul>

Nous allons désormais présenter les variables dépendantes liées au critère d'efficacité.

Précision

L'objectif est de déterminer le taux d'erreur commis par l'utilisateur au cours de la tâche et ainsi caractériser la précision de l'utilisateur pour la réalisation de la tâche. Il est possible de calculer le taux d'erreur global en additionnant les erreurs collectées dans les deux types de donnée. Le taux d'erreur recueilli en 2D correspond aux erreurs commises lorsque la cible à valider se situe en 2D, c'est-à-dire que la phase finale de la tâche de pointage est réalisée dans ce type de donnée. Le même principe est appliqué à la 3D.

Niveau d'analyse	Variables dépendantes	Mesures	Calculs
Niveau global	Taux d'erreur	Taux d'erreur global	nombre d'erreurs commises / nombre de tâches
Niveau détaillé 1	Taux d'erreur 2D et 3D	Taux d'erreur en fonction du type de donnée de la cible de destination à pointer	$TE_{2D} = \text{nb erreurs} / \text{nb tâches}$ où la cible de destination est en 2D $TE_{3D} = \text{nb erreurs} / \text{nb tâches}$ où la cible de destination est en 3D

Coordination de l'utilisateur

L'objectif est de caractériser l'adresse de l'utilisateur et la facilité d'utilisation de la technique d'après la structure de la tâche et en déduire la technique la plus adéquate pour réaliser la tâche. La variable du ratio d'inefficacité est proposée dans notre adaptation pour mesurer la coordination de l'utilisateur. Celle-ci est une extension du ratio d'inefficacité proposé par Zhai. Pour le calcul initial du ratio d'inefficacité, la distance optimale entre deux points est utilisée ; toutefois, nous ne pouvons connaître a priori la distance optimale et théorique pour notre analyse. Nous avons alors proposé de remplacer cette distance optimale par la distance effective réalisée par l'utilisateur.

Pour mesurer le ratio d'inefficacité effective, nous avons besoin de mesurer la distance réellement parcourue par l'utilisateur lors de l'évaluation ( $D_u$  = Distance de l'utilisateur, cf. Figure 39). Cette mesure est valable aussi bien pour l'espace 2D que pour l'espace 3D.

$$D_u = \sqrt{\sum_{i=1}^n [(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2]}$$

n=nombre de coordonnées différentes prises par le curseur pour une tâche

Il est également nécessaire de mesurer la distance effective entre la cible de départ et la cible d'arrivée en prenant en compte le passage à la frontière pris par l'utilisateur lors de l'évaluation (De = Distance effective, cf. Figure 39). Cette mesure est valable aussi bien pour l'espace 2D que pour l'espace 3D. Dans la formule suivante, le terme start correspond soit à la cible de départ pour une phase initiale, soit du point de passage à la frontière pour une phase finale, le terme end correspond soit au point de passage à la frontière pour une phase initiale, soit à la cible d'arrivée pour une phase finale.

$$De = \sqrt{\sum_{i=1}^n [(x_{end} - x_{start})^2 + (y_{end} - y_{start})^2 + (z_{end} - z_{start})^2]}$$

n = nombre de tâches de pointage

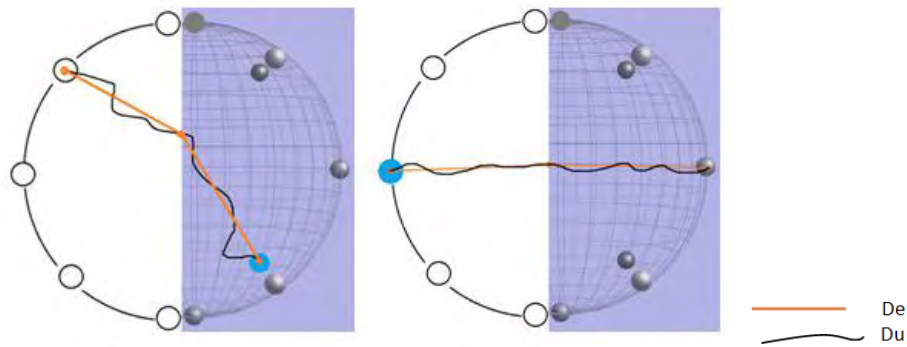


Figure 39 : Distances mesurées lors de l'expérimentation

L'intérêt de l'analyse du ratio d'inefficacité effective (RIE) est de déterminer entre autres si le RIE global est bien équivalent à l'addition du RIE réalisé en 2D et du RIE réalisé en 3D. Le RIE réalisé en 2D correspond à la somme du RIE 2D réalisé en phase initiale et celui réalisé en phase finale. Il en est de même pour la 3D.

Niveau d'analyse	Variables dépendantes	Mesures	But	Calculs
Niveau global	RIE global	Calcul de la moyenne par bloc pour chaque TI pour tous les utilisateurs et tâches confondus	Faire apparaître des différences globales entre les techniques	$RIE_{global} = \frac{Du_{globale} - De_{globale}}{De_{globale}}$ $Du_{globale} = Du_{start} + Du_{end}$ $De_{globale} = De_{start} + De_{end}$
Niveau détaillé 1	RIE <sub>2D</sub> versus RIE <sub>3D</sub>	Calcul du RIE en fonction du type de donnée	Mesurer l'impact du type de données sur la coordination de l'utilisateur lors de la réalisation de la tâche. Vérifier si le RIE global correspond à RIE <sub>2D</sub> + RIE <sub>3D</sub> ou si le RIE n'est pas équitablement réparti entre la 2D et la 3D	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si RIE<sub>2D</sub> &gt; RIE<sub>3D</sub>, alors l'utilisateur a été moins précis et coordonné en 2D qu'en 3D → A corrélérer avec la zone de passage ou RDE pour déterminer si cela est causé par la stratégie de l'utilisateur qui a privilégié la 3D plutôt que la 2D</li> <li>• Si RIE<sub>3D</sub> &gt; RIE<sub>2D</sub>, alors l'utilisateur a été moins précis et coordonné en 3D qu'en 2D → A corrélérer avec la zone de passage ou RDE pour déterminer si cela est causé par la stratégie de l'utilisateur qui a privilégié la 2D plutôt que la 3D</li> </ul>

Les résultats du ratio d'inefficience effective peuvent être analysés à un niveau plus détaillé afin de déterminer l'impact des caractéristiques de tâche hétérogène sur la réalisation de la tâche et ainsi voir si la coordination de l'utilisateur est similaire quel que soit le type de donnée et quelle que soit la phase.

La première analyse du niveau détaillé 2 a pour objectif de déterminer l'impact du découpage sur la réalisation de la tâche pour chaque séquence proposée. Cette analyse tient compte de l'importance de la séquence dans le découpage de la tâche. Elle vise donc à étudier si le



comportement de l'utilisateur évolue au cours de chaque phase d'une même séquence, impliquant par exemple une phase initiale réalisée en 2D avec une phase finale réalisée en 3D (ou l'inverse). Concrètement l'analyse a pour but de déterminer s'il existe des différences de comportement entre les deux phases d'une même séquence, et par exemple de déterminer si plus de coordination est requis dans une phase finale 3D que dans la phase initiale 2D correspondantes.

On rappelle également que l'une des caractéristiques des tâches de pointage hétérogène visée par cette adaptation de la norme est la séquence de mise en œuvre des différents types de données au cours de la réalisation de la tâche hétérogène de pointage. La deuxième analyse du niveau détaillé 2 a pour objectif de déterminer l'impact de la séquence sur la réalisation de la tâche. Cette analyse vise donc à étudier les variations éventuelles du comportement de l'utilisateur face à différents enchainements des types de données induit par les tâches. Concrètement, elle permet de comparer le ratio d'inefficience effective obtenu en phase initiale pour les deux types de donnée : ainsi il sera possible d'évaluer si ce temps obtenu pour une phase initiale est différent pour les deux types de donnée. Le même type d'analyse est réalisé pour la phase finale.

On rappelle également que l'une des caractéristiques des tâches de pointage hétérogène visée par cette adaptation de la norme est le découpage de la réalisation de la tâche hétérogène de pointage en une phase initiale portant sur un type de données et une phase finale portant sur un autre type de données. La première analyse du niveau détaillé 2 a pour objectif de déterminer l'impact de ce découpage sur la réalisation de la tâche et ce pour chaque type de donnée. Cette analyse vise donc à étudier les variations éventuelles du comportement de l'utilisateur face à un des types de données utilisés dans chacune des phases de réalisation de la tâche. Concrètement, elle permet de comparer les deux phases (initiale et finale) pour un même type de donnée et de savoir si le ratio de distance effective de la phase initiale portant sur de la 2D est différent de celui de la phase finale portant également sur de la 2D. Il en est de même pour la 3D. L'analyse permet donc de déterminer si le type de données utilisé dans la première phase a un impact sur la coordination lors de réalisation de la tâche avec le type de données utilisé dans la seconde phase.

Niveau d'analyse	Type d'analyse	But	Analyse des résultats
Niveau détaillé 2	RIE <sub>2D</sub> start versus RIE <sub>3D</sub> end et RIE <sub>2D</sub> end versus RIE <sub>3D</sub> start	Mesurer l'impact du découpage sur la réalisation de la tâche, voir si la présence de l'hétérogénéité a un effet sur la coordination en 2D et en 3D	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Si les résultats sont identiques (, alors l'utilisateur a moins d'adresse avec la technique en 2D qu'en 3D et est moins précis / coordonné pour réaliser la tâche quelle que soit la phase</li> <li>● Si les résultats sont différents, alors les phases ont un impact sur la tâche</li> </ul>
	En fonction des résultats précédents : RIE <sub>2D</sub> start versus RIE <sub>2D</sub> end et RIE <sub>3D</sub> start versus RIE <sub>3D</sub> end	Comparer les phases finales et initiales en 2D et en 3D. Mesurer l'impact du découpage sur la coordination lors de la réalisation de la tâche.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Si RIE<sub>2D</sub> start &gt; RIE<sub>2D</sub> end, alors l'utilisateur est moins coordonné en début de tâche qu'en fin de tâche : cela peut venir d'un ressenti de facilité d'utilisation de la technique après avoir fait de la 3D</li> <li>● Si RIE<sub>2D</sub> end &gt; RIE<sub>2D</sub> start, alors l'utilisateur est moins coordonné en fin de tâche qu'en début de tâche : cela peut venir d'une difficulté de passer de la 3D à la 2D avec la technique</li> <li>● Si RIE<sub>3D</sub> start &gt; RIE<sub>3D</sub> end, alors l'utilisateur est moins coordonné en début de tâche qu'en fin de tâche : cela peut venir d'un effet d'apprentissage ou d'une facilité d'utilisation acquise lors de l'utilisation de la technique en 2D</li> <li>● Si RIE<sub>3D</sub> end &gt; RIE<sub>3D</sub> start, alors l'utilisateur est moins coordonné en fin de tâche qu'en début de tâche : cela peut venir d'une difficulté de passer de la 2D à la 3D</li> </ul>
	En fonction des résultats précédents : RIE <sub>2D</sub> start versus RIE <sub>3D</sub> start et RIE <sub>2D</sub> end versus RIE <sub>3D</sub> end	Mesurer l'impact de la séquence sur la coordination de l'utilisateur lors de la réalisation de la tâche.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Si les résultats sont identiques, alors l'utilisateur a moins d'adresse avec la technique en 2D qu'en 3D et est moins précis / coordonné pour réaliser la tâche</li> <li>● Si les résultats sont différents, alors la séquence a un impact sur la tâche</li> </ul>

Mesure globale de performance

L'objectif est d'offrir un score global de performance récapitulatif, c'est-à-dire le throughput (TP) ou débit. Ce score global permet de comparer facilement les performances réalisées par plusieurs techniques d'interaction. Nous considérons que le TP global correspond à l'addition du TP réalisé en 2D et celui réalisé en 3D. Le TP global pour la 2D consiste en mesurer la performance de la technique d'interaction pour les tâches où la phase finale est réalisée en 2D, cela comprend alors la distance passée en 3D et celle passée en 2D. Il s'agit donc de la performance moyenne de la technique en 2D. Le même principe est appliqué à la 3D. Cette décomposition rend possible la comparaison des performances par type de donnée afin de déterminer si les performances sont différentes selon le type de donnée.

Niveau d'analyse	Variables dépendantes	Mesures	Calculs
Niveau global	Débit global	Throughput (bits/sec)	$TP = TP_{2D} + TP_{3D}$
Niveau détaillé 1	TP 2D et TP 3D	Calcul du TP en fonction du type de donnée	$TP_{2D} = \text{IDe}/\text{MT}$ où la cible de destination est en 2D $TP_{3D} = \text{IDe}/\text{MT}$ où la cible de destination est en 3D

Pour mesurer les ID effectifs (IDe), les coordonnées du point effectivement atteint par le centre du curseur lors de la validation de la cible par l'utilisateur est pris en compte. La taille effective est calculée d'après la distribution des différents points 3D de validation de l'utilisateur pour les cibles de destination situées en 3D et validées lors de la phase finale.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2}{n - 1}}$$

Pour les cibles de destination situées en 2D et validées lors de la phase finale, le calcul est différent puisqu'il ne prend pas en compte la profondeur.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}}$$

#### IV.2.4 Adaptation de la norme pour les aspects qualitatifs

Deux éléments de la norme structurent l'évaluation qualitative : la représentation en 2D/3D et les indices 3D d'une part, le confort et la satisfaction d'autre part.

##### IV.2.4.1 Représentation en 2D/3D et indices 3D

La représentation en 2D/3D a fait l'objet d'un certain nombre d'itérations car plusieurs solutions ont été envisagées. Nous avons tout d'abord étudié la possibilité de contraindre l'utilisateur à passer soit par une cible centrale, soit par une trajectoire centrale spécifique. Ces solutions ont été rejetées car il n'était pas question de contraindre l'utilisateur dans la réalisation de la tâche, mais également car ces solutions ne répondaient pas à nos hypothèses. En effet, contraindre le passage par une cible centrale ne permet pas de déterminer la performance d'une technique dans son utilisation en séquence entre deux types de donnée. La mise en place d'une trajectoire centrale spécifique modifie également la nature de la tâche et implique des modifications assez importantes des mesures à analyser. La solution retenue correspond à la combinaison de la tâche de pointage proposée par la norme ISO 9241-9 et à celle présentée dans notre adaptation à la norme pour la 3D. Cette solution implique qu'il n'est pas possible de prévoir de façon exacte la distance optimale et théorique entre deux cibles appartenant à deux types de donnée différents. En effet, il est complexe d'anticiper les mouvements de l'utilisateur quand il passera d'une dimension à l'autre.

Bien que la norme ISO ne recommande aucun élément spécifique en ce qui concerne la représentation, certaines recommandations ont été émises pour l'adaptation de la norme à la 3D. En effet, la forme du pointeur a été modifiée dans cette adaptation afin d'avoir un curseur volumique et est ainsi représenté par une sphère de couleur rouge. Nous avons conservé cette représentation pour la partie 3D. Toutefois, dans la norme ISO, le pointeur est communément représenté par une croix, et nous avons conservé cette représentation pour la partie 2D. Le curseur change de représentation en fonction de la zone où il se situe et sert de feedback à l'utilisateur afin de déterminer le type de donnée correspondant à la zone où le curseur se trouve.

Pour l'adaptation à la 3D, des recommandations ont été proposées afin de faire face au problème traditionnel de la perception de la profondeur en 3D (cf. IV.1.2.2.1). Des indices visuels 3D ont ainsi été mis en œuvre afin de constituer une scène de référence pour l'évaluation de techniques d'interaction pour les tâches de pointage en 3D tels que : l'effet de perspective et la variation des tailles des sphères ; la transparence des sphères cible ; l'utilisation d'un dégradé de couleurs ; et l'utilisation d'un fil de fer transparent pour le rendu de la sphère support. Pour l'adaptation à la 2D/3D, nous avons ainsi utilisé ces mêmes indices visuels 3D dans la partie contenant des données 3D. Dans la partie contenant des données 2D, nous nous sommes basés sur les représentations communément utilisées dans la littérature pour les évaluations de la tâche de pointage d'après la norme ISO.

#### **IV.2.4.2 Confort et satisfaction**

La norme ISO recommande deux échelles d'évaluation pour évaluer le confort des techniques d'interaction (ISO 9241-9 – Annexe C) : un questionnaire sur le confort pour mesurer le confort (cf. Annexes - A) et l'utilisabilité des techniques ainsi qu'une échelle d'effort pour estimer l'effort perçu par les utilisateurs lors de la tâche.

Dans notre adaptation à la 3D (cf. IV.1.2.2.2), nous avons renforcé l'analyse du confort et de l'utilisabilité du questionnaire de confort en ajoutant aux deux échelles déjà présentes le questionnaire SUS (System Usability Scale) (Brooke, 2006) qui couvre en plus la satisfaction utilisateur et l'apprentissage (cf. Annexes - B.2). Nous avons également enrichi l'analyse de l'aspect satisfaction en insérant l'utilisation d'items du SUMI. Nous avons sélectionné 6 items parmi les 50 de façon à compléter les questionnaires précédents et à qualifier de façon plus précise les dimensions évaluées (cf. Annexes - B.2). Enfin, nous avons complété cet aspect qualitatif en demandant aux utilisateurs les trois points les plus positifs et les trois points les plus négatifs pour chaque technique d'interaction 3D.

Pour notre adaptation à la 2D/3D, nous avons conservé les mêmes questionnaires pour les mêmes raisons qu'il était pertinent de les proposer à la 3D, et qu'ils ne sont pas dépendants d'un type de donnée particulier ou de la réalisation de la tâche. Cependant, nous avons ajouté des questions ouvertes pour recueillir les impressions et préférences des utilisateurs pour comparer l'utilisation des techniques et notamment par rapport au passage entre les deux types de données (niveau détaillé comme pour les variables quantitatives). Des questions telles que les difficultés induites par la technique pour passer d'un type de donnée à un autre au cours de la tâche ou la technique ayant permis de passer le plus facilement d'un type de donnée à un autre ou l'ayant le plus contraint sont ainsi recommandées. Des questions sur une possible stratégie utilisée par l'utilisateur pour passer d'un type de donnée à l'autre ou les difficultés liées à la réalisation de la tâche complètent l'interview de l'utilisateur (cf. Annexes - B.3).

Cette adaptation constitue donc un support pour guider la définition d'un protocole d'évaluation. Pour aider les expérimentateurs à mettre en œuvre cette adaptation, nous avons développé un outil dont nous présentons ses principales caractéristiques dans la section suivante.

### IV.2.5 Instrumentation

Pour accompagner notre adaptation 2D/3D de cette norme, nous proposons un outil logiciel support au déploiement du protocole, à la réalisation des tâches de pointage décrites dans l'adaptation et à l'enregistrement des traces d'interaction au cours de ces tâches, nécessaires pour les calculs des différentes mesures recommandées. Il constitue un environnement logiciel de référence pour mener les expérimentations basées sur notre adaptation de la norme en outillant de façon concrète le protocole, i.e. en appliquant et respectant les recommandations de la norme et les adaptations apportées pour la 2D/3D. Cet outil logiciel rend possible le paramétrage de la taille des cibles, la distance entre ces cibles, le nombre de cibles et le control-gain. L'utilisation de cet outil logiciel garantit donc une mise en œuvre identique de la norme et de ces adaptations, d'un utilisateur à un autre et surtout d'une étude portant sur un ensemble de techniques d'interaction à une autre : les mesures, la scène 2D/3D, les questionnaires et les résultats calculés seront les mêmes, et toujours obtenus de la même façon. L'outil logiciel est composé d'un environnement de test avec une partie 2D et un EV 3D et d'un panneau de configuration. Le logiciel graphique 3D est écrit en C++ en utilisant la toolkit OSG le framework Qt. Le panneau de configuration est écrit en C#, et afin de proposer un outil logiciel évolutif, les composants de l'outil logiciel communiquent via un bus logiciel appelé Ivy.

Ce panneau de configuration est nécessaire à la configuration et au pilotage de l'exécution d'une expérimentation. En effet, un bloc est composé par une série de tâches de pointage ayant la même taille de la cible (largeur) et la même taille du support (distance) pour définir l' $ID_{2D}$  et l' $ID_{3D}$  du bloc. Au lancement de l'expérimentation, ce panneau permet de sélectionner la technique testée et s'il s'agit d'un entraînement (cf. Figure 40).

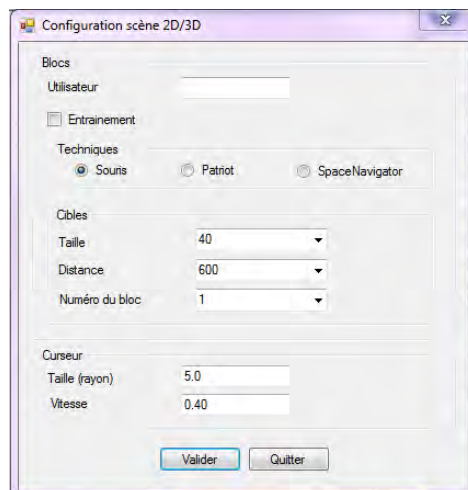


Figure 40 : Panneau de configuration de l'expérimentation en 2D/3D

Au cours de l'expérimentation avec ce logiciel, exécuter la tâche sur un bloc revient à un processus en trois étapes: 1) la tâche de pointage commence au moment où le participant choisit la cible de départ dans un type de donnée, qui est colorée en bleu (cf. Figure 41), sans commettre d'erreur. 2) Cette action met ensuite en évidence la cible de destination, située dans l'autre type de donnée et qui est symétrique et colorée en jaune. 3) La tâche se termine lorsque le participant valide le choix de la cible de destination, même si une erreur est commise. La cible devient orange lorsque le curseur et celle-ci sont en contact, quel que soit le type de donnée de la cible (cf. Figure 41). Durant la tâche, l'outil logiciel enregistre des données temporelles, telles que le début et la fin de chaque tâche de pointage, la validation de la sélection et le temps d'exécution. Il enregistre également la position du curseur, le type de donnée où il est situé, la position du curseur lors du passage d'un type de donnée à un autre et les erreurs lorsque la validation a été réalisée sans contact entre le curseur et la cible. Tous les événements de l'expérimentation sont datés et enregistrés dans format XML.

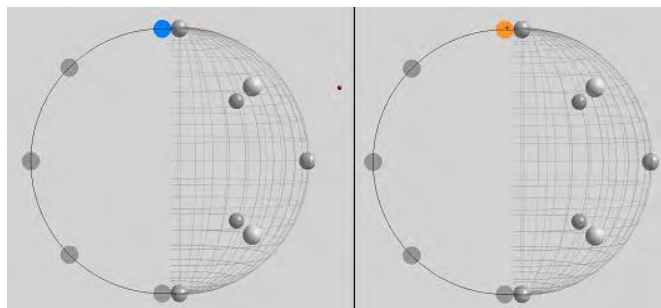


Figure 41 : Illustration de l'état de la cible de départ et d'un contact entre le curseur et une cible 2D

#### IV.2.6 Synthèse

Notre adaptation à la 2D/3D se veut générique et présente un protocole structuré pour conduire des évaluations pour la tâche de pointage hétérogène en 2D/3D. Comme pour l'adaptation à la 3D, nous avons pris comme option de proposer une évaluation composite mêlant des aspects de performance et de satisfaction utilisateur. Dans le Tableau 9 sont synthétisés les ajouts et modifications que nous avons apportés à la norme de façon à proposer cette évaluation composite.

Ces différents points d'adaptation et d'ajout constituent une réponse aux limites que nous avons relevées dans l'état de l'art (cf. III.2.2.1) concernant les études ad-hoc : le manque d'unification et d'uniformisation du protocole d'évaluation pour un contexte hétérogène, le manque de compréhension de l'impact du passage d'un type de donnée à un autre et le manque de données sur les performances en contexte hétérogène. La méthode d'évaluation ainsi que son protocole de mise en place sont cernés pour partie par les amendements faits dans la norme et pour partie grâce au logiciel de conduite de l'expérimentation que nous proposons et qui rend possible l'uniformisation du protocole. Par ailleurs, ce protocole a l'originalité de proposer l'évaluation d'une tâche 3D en contexte où les dimensions 2D et 3D sont mêlées.

Notre adaptation a également pour but d'offrir un lien entre l'interaction physique et les données numériques en présentant des interactions avec 3 degrés de liberté et une scène 3D à réaliser avec des techniques d'interaction avancée. Ainsi, l'adaptation de la norme 9241-9 a pour objectif d'apporter une unification de l'évaluation de techniques d'interaction en 2D/3D.

Norme			Etat
Sections 1 à 8			Original
Annexe A			Original
Annexe B			<b>Modifié</b>
<b>Annexe B.5.2</b>			
<i>Critères</i>	<i>Mesures</i>	<i>Variables dépendantes</i>	
Efficience	Rapidité	Moyenne des temps	Original
	Sensibilité à la tâche	Moyenne des temps par IDe	Ajouté
	Résistance à combiner deux types de données	Zone de passage moyenne entre les deux types de données	Ajouté
		Ratio De 2D / De 3D (ratio de distances effectives - RDE)	Ajouté
Efficacité	Précision	Taux d'erreur	Ajouté
	Coordination de l'utilisateur	Ratio d'inefficience	Ajouté
Performance	Mesure globale	Throughput/débit	Modifié
<b>Annexe B.6.2.2</b>			
<i>Rendu</i>			
Forme des cibles			Modifié
Forme du curseur			Modifié
Arrangement des cibles			Original
Indices 3D	Transparence		Ajouté
	Dégradé de couleur		Ajouté
	Support sous forme de fil de fer		Ajouté
Annexe C			<b>Modifié</b>
<i>Critères</i>	<i>Mesures</i>	<i>Variables dépendantes</i>	
Confort	Echelle de confort	Questionnaire de confort de la norme ISO 9241-9	Original
Satisfaction utilisateur	Mesure globale	SUS	Ajouté
	Echelle de satisfaction utilisateur	Items du SUMI	Ajouté

Tableau 9 : Synthèse de notre adaptation à la norme 9241-9 pour la tâche de pointage hétérogène 2D/3D

Pour montrer concrètement l'utilisation de ces recommandations, nous présentons le cas d'étude sur lequel nous nous sommes basés puis le protocole d'évaluation de techniques d'interaction, étudiées pour ce cas d'étude.



## IV.2.7 Présentation du cas d'étude et du protocole d'expérimentation

Le cas d'étude considéré dans cette partie est issu d'un contexte industriel, porté par la société GVS – Toulouse, centrée sur le développement d'applications expertes pour le monitoring d'activités et de systèmes de données complexes. Après l'avoir introduit, nous présentons le protocole d'expérimentation.

### IV.2.7.1 Cas d'étude : conception de tests statiques pour avion

Notre étude de cas est basée sur une application réelle qui permet de concevoir et gérer des campagnes d'essais statiques pour l'aéronautique (cf. Figure 42). Les concepteurs ont à manipuler et positionner des capteurs sur une maquette numérique 3D de l'avion. Cette maquette numérique 3D représente un avion réel, y compris en ce qui concerne les dimensions et le volume. Les interactions avec ce modèle permettent aux utilisateurs d'effectuer des tâches en 3D comme s'ils manipulaient l'appareil réel ou encore des pièces permettant d'instrumenter l'avion. Les utilisateurs peuvent sélectionner directement des éléments dans la vue 3D qui est intégrée à un système complexe plus global. Ce système agrège différentes vues complémentaires présentant des données liées à l'instrumentation de l'avion sous différentes formes de représentation. L'utilisateur peut ainsi être amené à sélectionner un élément dans une liste sous forme d'arbre (cf. Figure 42 - A), avec des déplacements du curseur en 2D, puis à pointer un élément dans la scène 3D (cf. Figure 42 - B), avec des déplacements du curseur en 3D.

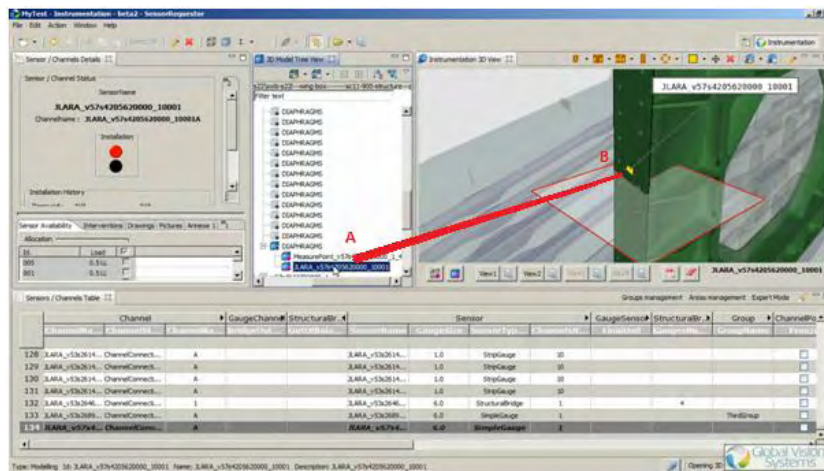


Figure 42 : Illustration d'une tâche de pointage hétérogène dans un environnement 2D/3D

Les éléments d'adaptation de la norme sont présents dans ce cas d'étude sous les formes suivantes :

- Tâche: La tâche de pointage réalisée en 3D est régulièrement effectuée par les utilisateurs pour placer ou manipuler des capteurs dans un avion 3D. Les concepteurs sont amenés à sélectionner un élément dans un espace 2D (une liste, un tableau, etc.) puis à sélectionner un autre élément dans la scène 3D. Cela correspond à la tâche de sélection décrite dans la norme entre deux points de l'avion qui sont positionnés dans des types de donnée différents et à des profondeurs différentes dans le système (cf. Figure 42 - points

A and B).

- Cibles : Les cibles sont typiquement des éléments de la structure de l'avion (par exemple, les extrémités des ailes) ou des capteurs, ou des éléments à pointer dans les autres vues (élément textuel, ligne d'un tableau, etc.). La distance entre éléments de types de donnée différents et possédants des volumes différents est variable et ces variations correspondent à différentes difficultés de la tâche (ID) de la norme.
- Variables : Les concepteurs doivent positionner de façon précise un grand nombre de capteurs pour un même test ; un faible temps de mouvement ou un faible taux d'erreur sont donc importants pour réduire le temps de la tâche.
- Représentation en 2D/3D et indices 3D : Pour aider à percevoir la 3D dans la maquette qui s'avère complexe et pour éviter de biaiser sa compréhension, aucun élément de décoration, tel que des ombres, n'est ajouté à la maquette numérique. Les objets sont alors représentés par des couleurs différentes et des transparences différentes pour mettre en avant les différentes profondeurs présentes dans la maquette numérique. Ceci est lié à ce qui est proposé comme recommandation pour les indices 3D dans notre adaptation. L'intégration de ces indices 3D dans un système regroupant différents types de donnée et notamment des données en 2D correspond à la conception de la tâche de pointage hétérogène en 2D/3D que nous avons proposée.
- Confort et satisfaction : Le positionnement des capteurs est une activité journalière pour les concepteurs et ils peuvent passer de longues heures à réaliser cette activité : il est en effet important qu'ils se sentent confortables et satisfaits de la technique utilisée. Le score SUS et l'échelle de confort aideront à répondre à ce cas d'utilisation. Les questions ouvertes sur la facilité d'utilisation ou les contraintes liées à la technique utilisée pour passer d'un type de donnée à l'autre offriront des pistes d'amélioration des techniques.

#### **IV.2.7.2 Hypothèses**

L'objectif principal de l'évaluation la tâche de pointage hétérogène 2D/3D est de comparer des techniques d'interaction en vue d'une utilisation dans notre cas d'étude.

##### **IV.2.7.2.1 Hypothèse principale**

Nous pouvons formuler comme hypothèse principale qu'une technique isotonique est meilleure qu'une technique isométrique pour réaliser une tâche de pointage en situation d'hétérogénéité 2D/3D.

##### **IV.2.7.2.2 Hypothèses opérationnelles**

Afin de préciser et compléter l'hypothèse principale, nous pouvons formuler en tant qu'hypothèses opérationnelles:

- Si les performances sont favorisées par l'utilisation de la technique isotonique, il est attendu que :

- a. la technique isotonique, comparée à la technique isométrique, minimise les efforts fournis par l'utilisateur et le temps mis dans la réalisation de la tâche de pointage avec plusieurs types de données en étant plus polyvalente. En effet, les techniques isotoniques ont de meilleures performances que les autres techniques en 2D.
  - b. la technique isotonique a une meilleure performance globale que la technique isométrique. Nous pouvons justifier cette hypothèse par des résultats de notre étude sur l'adaptation en 3D qui ont montré que la technique isotonique a de meilleures performances que la technique isométrique en 3D en ce qui concerne le temps moyen et le throughput.
  - c. la précision de la technique isotonique sera plus basse que pour la technique isométrique étant donné le tradeoff existant du rapport entre le temps et la précision. Notre précédente étude a mis en avant le tradeoff existant entre le temps et la précision, car le taux d'erreur de la technique isotonique était élevé tandis que le temps mis pour réaliser la tâche était court. Au contraire, la technique isométrique avait un taux d'erreur faible mais un temps élevé.
- Si l'utilisabilité perçue est accrue par la technique isotonique, il est attendu que :
    - a. le score de satisfaction sera plus élevé pour la technique isotonique que pour la technique isométrique. Dans notre précédente étude, la technique isotonique était la technique préférée des utilisateurs et a obtenu un score SUS plus élevé (76,3) que pour la technique isométrique (52,5). Le score de la technique isométrique est marginal à un faible niveau et proche de l'inacceptable, alors que le score de la technique isotonique est bon avec une utilisabilité acceptable.
    - b. Le score de confort sera plus élevé pour la technique isotonique que pour la technique isométrique. En effet, le score de confort de notre précédente étude était supérieur de façon marginale pour la technique isotonique que pour la technique isométrique.

#### ***IV.2.7.3 Participants***

Douze utilisateurs vont participer à notre étude et vont tester les deux périphériques. Nous nous appuyons sur la littérature pour établir que ce nombre est suffisant pour avoir des résultats significatifs sur ce type d'expérimentation. Ces utilisateurs sont des utilisateurs réguliers de l'outil informatique. Ils ne sont pas forcément familiers avec les deux périphériques proposés et ils ne sont pas experts en 3D. Ils sont âgés entre 20 et 45 ans et utilisent la main qu'ils souhaitent. Un questionnaire de recueil des profils est distribué en début de session afin de collecter les données démographiques et personnelles.

#### ***IV.2.7.4 Apparatus***

##### *IV.2.7.4.1 Hardware*

L'expérimentation est conduite en utilisant un ordinateur portable *HP EliteBook 6930p* sous le système d'exploitation Windows 7. Le processeur de l'ordinateur est un Intel Core Duo de

2.4GHz utilisant 4GB de RAM et possédant une carte graphique ATI Mobility Radeon HD 3450 de 256Mo. Un écran LCD d'une résolution de 1920\*1080 est utilisé pour mener les tests. Un bus Ivy a été mis en place pour réaliser la communication entre les différentes applications.

#### IV.2.7.4.2 Techniques de pointage

Deux techniques à 6-DOF vont être comparées à une technique 2-DOF + 1-DOF :

- Condition de contrôle

La souris est un dispositif isotonique à 2-DOF + 1-DOF pour manipuler des objets en 3D. Ce type d'interaction est actuellement proposé à l'utilisateur dans l'application de GVS. Il utilise la souris pour se déplacer en deux dimensions (x, y) puis fait rouler la molette de la souris pour se déplacer dans la 3<sup>ème</sup> dimension (z). La souris est utilisée comme condition de contrôle pour permettre de comparer les résultats des autres techniques avec ceux de la souris et pour tester si les résultats des autres conditions sont meilleurs ou plus mauvais que ceux de la situation actuelle proposée dans les applications de GVS servant de condition contrôle et ainsi de référence.

- Technique isotonique

La technique isotonique applique un position-control, de façon à faire correspondre le déplacement physique de la technique avec le déplacement numérique du curseur, qui est absolu. Cette technique est implémentée en C++ et met en œuvre un Polhemus Patriot (cf. Figure 43). Le taux de rafraichissement (update rate) est de 60Hz.

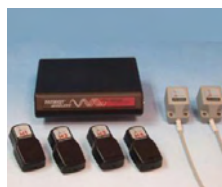


Figure 43 : Polhemus Patriot

- Technique isométrique

La technique isométrique applique un rate-control, de façon à faire correspondre la force de la technique avec la vitesse de déplacement du curseur, qui est relatif. Cette technique est implémentée en C# et met en œuvre un SpaceNavigator (cf. Figure 44). Il utilise une prise USB 1.1 ou 2.0.



Figure 44 : SpaceNavigator

- Enregistrement des données

Des événements sont recueillis dans des fichiers de log sous format XML lors du test. Les différents événements sont datés et incluent l'heure à laquelle ils ont été réalisés.

#### ***IV.2.7.5 Procédure***

En début d'expérimentation, l'utilisateur signe un accord de consentement éclairé, à cause des logs et de l'enregistrement vidéo de l'expérimentation. Les utilisateurs se placent dans l'environnement de test : ils s'assoient devant un bureau où se situent un écran d'ordinateur, un clavier et une des techniques à tester. Ils remplissent ensuite un questionnaire de recueil des profils. Le déroulement de l'expérimentation est expliqué aux utilisateurs puis les instructions leur sont données. Avant de débiter l'expérimentation, une démonstration de la tâche attendue est réalisée. Pour débiter l'expérimentation, une phase d'apprentissage de 5 minutes est proposée aux utilisateurs. Puis, les utilisateurs réalisent un premier entraînement et un premier test avec la souris, car il s'agit d'une condition de contrôle. Ils effectuent ensuite les entraînements et tests pour les autres techniques selon un ordre contrebalancé. Une pause de 2min est laissée aux utilisateurs entre chaque bloc. A la fin de chaque test, les utilisateurs remplissent un questionnaire de satisfaction et de confort aux utilisateurs. Les participants suivent la même procédure pour la technique. En fin d'expérimentation, les utilisateurs remplissent un questionnaire de satisfaction globale et un questionnaire pour comparer les trois techniques. Des entretiens sont menés avec les utilisateurs afin de recueillir les préférences des utilisateurs et les difficultés qu'ils ont pu rencontrer au cours de la réalisation de la tâche mais également d'identifier les trois points les plus positifs et les trois points les plus négatifs de chaque technique. Au final, le temps total de l'expérimentation est d'environ 2 heures, phases d'apprentissage, pauses et réponses aux questionnaires incluses.

#### ***IV.2.7.6 Utilisation des techniques***

L'espace d'interaction de l'évaluation se décompose en un espace d'interaction physique et un espace d'interaction numérique qui comprend deux dimensions : de la 2D, soit déplacement du curseur en (tx, ty) sans profondeur, et de la 3D, soit déplacement du curseur en (tx, ty, tz) avec prise en compte de la profondeur. L'interaction en 3D pose le problème de la prise en compte de la profondeur et de la conservation de cette profondeur même lors d'une tâche en 2D. Il faut ainsi considérer la différence de perspective entre 2D et 3D et le passage d'une dimension à une autre peut s'avérer un peu difficile pour l'utilisateur si cela n'est pas fluide et qu'il y a une mauvaise correspondance.

La solution retenue consiste en interagir en 2D sans se soucier de la profondeur. Toutefois, la position de l'interacteur en profondeur est prise en compte et appliquée lors du passage en 3D. L'utilisateur peut alors modifier la profondeur du pointeur lors de la tâche en 3D (cf. Tableau 10 et Figure 45).

	2D	3D
Pointeur	Interaction en 2D (x, y)	Interaction en 3D (x, y, z)
Interacteur	Prise en compte de sa position en profondeur	Prise en compte de sa position en profondeur Conservation de la profondeur pour le passage en 2D

Tableau 10 : Tableau de synthèse sur la solution retenue pour l'utilisation des techniques

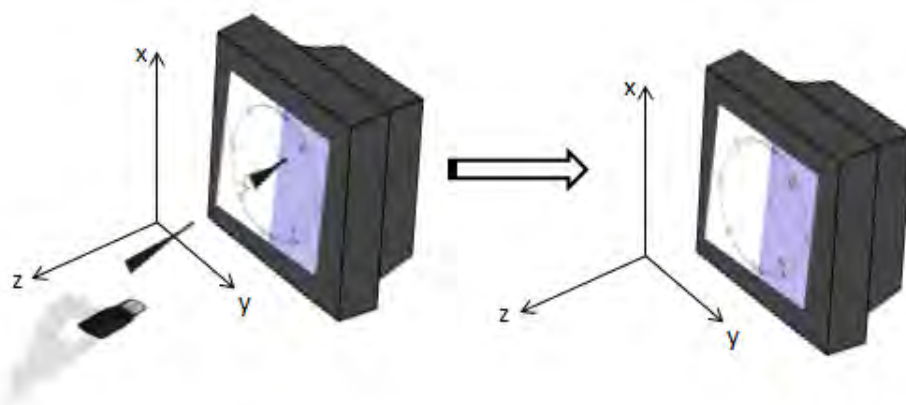


Figure 45 : Illustration de l'utilisation de la technique d'interaction

#### IV.2.8 Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté une adaptation de la norme ISO 9241-9, qui propose un protocole structuré pour mener l'évaluation de techniques d'interaction pour une tâche de pointage hétérogène en 2D/3D.

Cette adaptation de la norme reprend les principaux aspects d'enrichissement de l'adaptation de la norme à la 3D, c'est-à-dire l'ajustement des variables dépendantes, celui de la tâche et des cibles puis l'ajout du questionnaire SUS. Les différentes dimensions de la norme modifiées afin de répondre aux besoins d'un EV 3D ont connu des évolutions et de nouveaux ajustements afin d'évaluer la tâche de pointage dans un contexte d'hétérogénéité des types de donnée en séquence (cf. Tableau 11).

Des variables dépendantes ont enrichies l'évaluation de la tâche de pointage en 2D/3D de façon à mieux comprendre les performances des utilisateurs mais aussi l'utilisation des techniques pour la réalisation de la tâche.

Outre l'extension de cette norme et donc de la description du protocole d'évaluation, un outil logiciel a été proposé : il vise à instrumenter et à supporter l'exécution de l'expérimentation

conformément à l'adaptation de la norme. L'outil logiciel consiste en une scène 2D jouxtant un EV 3D, dans lesquels la tâche de pointage est respectivement effectuée en 2D et en 3D ; l'outil logiciel comprend également un panneau de configuration conçu de manière à gérer les différents paramètres de la tâche de pointage (par exemple, la largeur ou la distance des cibles). Cet environnement de mise en œuvre de l'adaptation de la norme permet de tendre vers une uniformisation de la réalisation du protocole décrit dans l'adaptation de la norme.

Norme			Adaptation 3D par rapport à la norme	Adaptation 2D/3D par rapport à l'adaptation 3D
Sections 1 à 8			Original	Original
Annexe A			Original	Original
Annexe B			<b>Modifié</b>	<b>Modifié</b>
<b>Annexe B.5.2</b>				
<i>Critères</i>	<i>Mesures</i>	<i>Variables dépendantes</i>		
Efficience	Rapidité	Moyenne des temps	Original	Original
	Sensibilité à la tâche	Moyenne des temps par IDe	-	Ajouté
	Résistance à combiner deux types de données	Zone de passage moyenne entre les deux types de données	-	Ajouté
		Ratio De 2D / De 3D (ratio de distances effectives - RDE)	-	Ajouté
Efficacité	Précision	Taux d'erreur	Ajouté	Modifié
	Coordination de l'utilisateur	Ratio d'inefficience	Ajouté	Modifié
Performance	Mesure globale	Throughput/débit	Modifié	Modifié
<b>Annexe B.6.2.2</b>				
<i>Rendu</i>				
Forme des cibles			Modifié	Conservé
Forme du curseur			Modifié	Conservé et Original
Arrangement des cibles			Original	Conservé
Indices 3D	Transparence		Ajouté	Conservé
	Dégradé de couleur		Ajouté	Conservé
	Support sous forme de fil de fer		Ajouté	Conservé
Annexe C			<b>Modifié</b>	<b>Conservé</b>
<i>Critères</i>	<i>Mesures</i>	<i>Variables dépendantes</i>		
Confort	Echelle de confort	Questionnaire de confort de la norme ISO 9241-9	Original	Conservé
Satisfaction utilisateur	Mesure globale	SUS	Ajouté	Conservé
	Echelle de satisfaction utilisateur	Items du SUMI	Ajouté	Conservé

Tableau 11 : Synthèse des évolutions apportées à l'adaptation 3D pour l'adaptation à la 2D/3D

Pour illustrer l'utilisation et l'applicabilité de cette adaptation, nous nous sommes inspirés d'une tâche industrielle: la pose de capteurs pour une campagne d'essais par le biais d'un système complexe. Dans la section suivante, nous présentons les spécifications d'un prototype de technique d'interaction répondant aux besoins du cas d'étude qui sont notamment la réalisation d'interactions en continu dans au moins deux types de donnée différents.

### IV.3 Bibliographie

---

- Bangor, A., Kortum, P.-T., & Miller, J.-T. (2008). An empirical evaluation of the System Usability Scale. *Journal of human-computer interaction*, 574-594.
- Bowman, D. (1999). *Interaction techniques for common tasks in immersive Virtual Environments: Design, evaluation, and application*. Thèse de doctorat.
- Brooke, J. (2006). SUS: a "quick and dirty" usability scale. *Usability Evaluation in Industry*.
- Froehlich, B., Hochstrate, J., Skuk, V., & Huckauf, A. (2006). The GlobeFish and the GlobeMouse: two new six degree of freedom input devices for graphics applications. *CHI'06*, (pp. 191-199).
- Hubona, G., Wheeler, P., Shirah, G., & Brandt, M. (1999). The relative contributions of stereo, lighting, and background scenes in promoting 3D depth visualization. *CHI'99*, (pp. 214-242).
- Kaiser, P. (2011). *The Joy of Visual Perception: A Web Book*. York University.
- MacKenzie, I. (1992). Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, 7, 91-139.
- Masliah, M. (1999). Récupéré sur <http://etclab.mie.utoronto.ca/people/moman/timeandspace/timeandspace.html>
- Raynal, M., Gauffre, G., Bach, C., Schmitt, B., & Dubois, E. (2010). Tactile camera vs. tangible camera: taking advantage of small physical artefacts to navigate into large data collection. *NordiCHI'10*, (pp. 373-382).
- Shneiderman, B. (1996). The Eyes Have It: A task by data type taxonomy for information visualizations. *IEEE Symposium on Visual Languages*, (pp. 336-).
- Soukoreff, R., & MacKenzie, I. (2004, December). Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research in HCI. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, 61(6), 751-789.
- Zhai, S. (1998). User performance in relation to 3D input device design. *SIGGRAPH Comput. Graph*, 32(4), 50-54.
- Zhai, S., & Milgram, P. (1998). Quantifying coordination in multiple DOF movement and its application to evaluating 6DOF input devices. *CHI'98*, (pp. 320-327).
- Zhai, S., Buxton, W., & Milgram, P. (1994). The "Silk cursor": Investigating transparency for 3D target acquisition. *CHI'94*, (pp. 459-465).





## V Prototype « Léger » Pour Manipuler Des Données Complexes

V.1 Contexte de la situation actuelle.....	131
V.1.1 Présentation de la situation actuelle .....	131
V.1.2 Description des techniques d'interaction actuellement utilisés et des tâches d'interaction courantes .....	131
V.1.3 Verrous actuels .....	131
V.2 Description de la solution proposée .....	132
V.2.1 Objectifs et intérêt de la future solution .....	132
V.2.2 Acteurs concernés.....	132
V.2.3 Fonctionnalités du système .....	133
V.2.3.1 Diagramme de cas d'utilisation .....	133
V.2.3.2 Modèle de tâche .....	134
V.3 Conception du prototype léger.....	136
V.3.1 Choix de la solution apportée .....	136
V.3.2 Contraintes techniques.....	140
V.3.3 Présentation générale de la solution.....	142
V.3.3.1 Présentation de la situation d'interaction .....	142
V.3.3.2 Caractérisation des tâches d'interaction de la vue 3D .....	143
V.3.3.3 Scénarios décrivant la mise en œuvre de la solution .....	144
V.3.4 Apport de la situation d'interaction et discussion .....	146
V.4 Discussion .....	148
V.5 Bibliographie .....	149

Après avoir présenté nos adaptations de la norme ISO 9241-9 à deux contextes particuliers, nous allons détailler la conception du prototype proposé afin de répondre aux problématiques industrielles : pouvoir interagir dans des données 2D et 3D, faciliter l'accès à ces deux types de données ainsi que simplifier la réalisation de tâches répétitives.

Dans un premier temps, nous allons présenter le contexte de la situation actuelle afin de comprendre les enjeux du prototype à concevoir. Ensuite, nous allons décrire la solution proposée de façon à déterminer les objectifs du prototype pour lequel la phase de conception est définie dans la dernière partie de ce chapitre.

## V.1 Contexte de la situation actuelle

---

### V.1.1 Présentation de la situation actuelle

Un système proposant des données complexes et hétérogènes est un système dont l'origine des données est multiple et variée et dont le type des données affichées peut être différent. En effet, un système présentera alors à l'utilisateur des données sous différentes formes, comme de la 2D ou de la 3D. Les utilisateurs ont ainsi la possibilité d'interagir avec ces différents types de données en utilisant une même technique d'interaction afin de pointer ou manipuler des éléments de ces types de données et de valider leur pointage.

### V.1.2 Description des techniques d'interaction actuellement utilisés et des tâches d'interaction courantes

L'utilisateur a la possibilité de réaliser trois principales tâches d'interaction dans la vue 3D qui sont :

- la manipulation d'objet 3D (tels que des capteurs) en les déplaçant et en les orientant sur les 3 axes,
- la navigation dans la scène 3D en déplaçant ou en orientant le point de vue de la caméra selon les 3 axes,
- la sélection d'objet 3D ou encore la sélection d'un item dans un menu contextuel sur un objet situé dans la scène 3D.

Pour effectuer ces tâches, l'utilisateur utilise actuellement une souris accompagnée d'un clavier tout en manipulant un grand nombre de raccourcis clavier.

### V.1.3 Verrous actuels

La solution actuelle ne permet pas à l'utilisateur d'utiliser de façon optimale les différents outils mis à sa disposition. L'accès aux données est ainsi difficile car le nombre de raccourcis est important et l'enchaînement des tâches est rendu complexe de part ce nombre de raccourcis mais également de part la difficulté à manipuler des objets dans des espaces avec des types de donnée différents.

## V.2 Description de la solution proposée

---

### V.2.1 Objectifs et intérêt de la future solution

D'après la vue fonctionnelle de la solution attendue (cf Figure 46), nous nous rendons compte que le prototype va davantage s'adresser aux sensors requestors qui vont interagir à l'aide d'une technique d'interaction avec l'application et l'ensemble de ses vues afin de placer des capteurs.

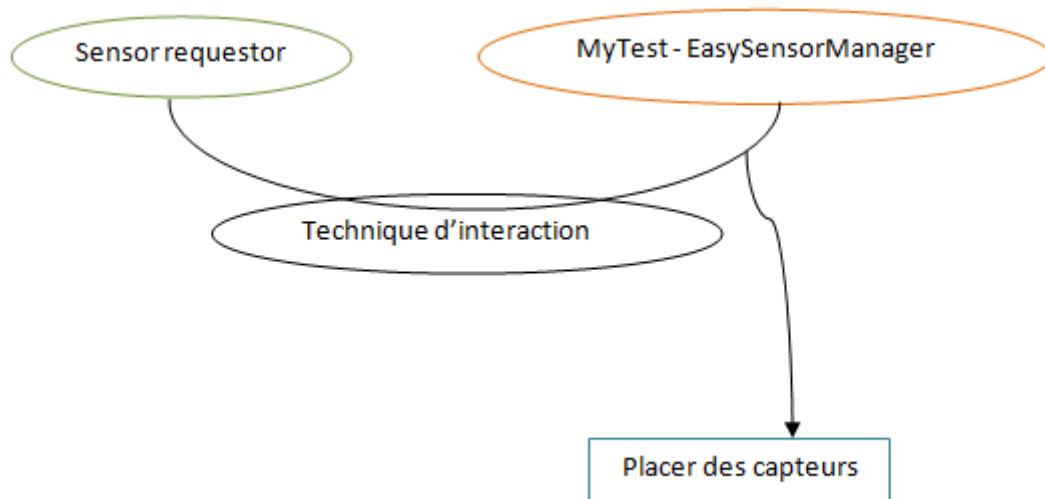


Figure 46: Vue fonctionnelle du futur prototype

L'objectif principal du prototype est ainsi de faciliter la réalisation des tâches quotidiennes des sensors requestors en simplifiant l'accès aux différents types de données ainsi que l'interaction avec ceux-ci.

Le prototype a également pour objectif d'être léger afin d'être peu encombrant et facilement transportable. Cela permettra de ne pas prendre davantage de place sur l'espace de travail des utilisateurs mais également de pouvoir utiliser la technique d'interaction lors de démonstrations.

Finalement, l'intérêt du prototype est de permettre à l'utilisateur de réaliser sa tâche en moins de temps et avec plus d'aisance, sachant qu'il doit placer un grand nombre de capteurs.

### V.2.2 Acteurs concernés

Il s'agit des utilisateurs de l'application MyTest ou EasySensorManager. Nous allons plus particulièrement nous intéresser aux sensors requestors, qui posent les capteurs sur la maquette numérique.

### V.2.3 Fonctionnalités du système

D'après l'ensemble des tâches réalisées par le sensor requestor et présentées dans la section II.2.1, nous pouvons déterminer le diagramme de cas d'utilisation (cf Figure 47) propre à cet utilisateur ainsi que le modèle de tâche correspondant.

#### V.2.3.1 Diagramme de cas d'utilisation

Le diagramme de cas d'utilisation (cf Figure 47) isole les cas d'utilisation principaux réalisés par le sensor requestor et met en avant les principales fonctionnalités du système utilisées par l'utilisateur. Il présente de façon globale l'utilisation du système par l'utilisateur et leurs interactions. L'utilisateur peut placer un capteur en naviguant dans la scène 3D et en manipulant ce capteur. Il a la possibilité d'ajouter des comment points et de les renommer ainsi que de placer des mesure tools et manipuler le capteur.

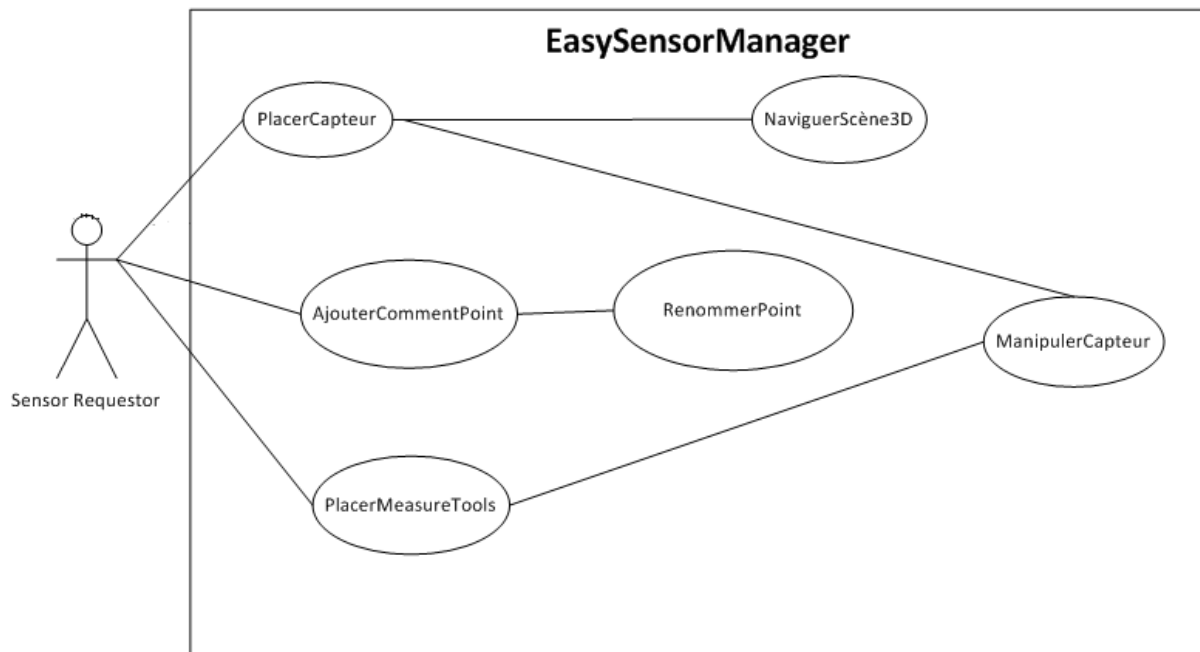
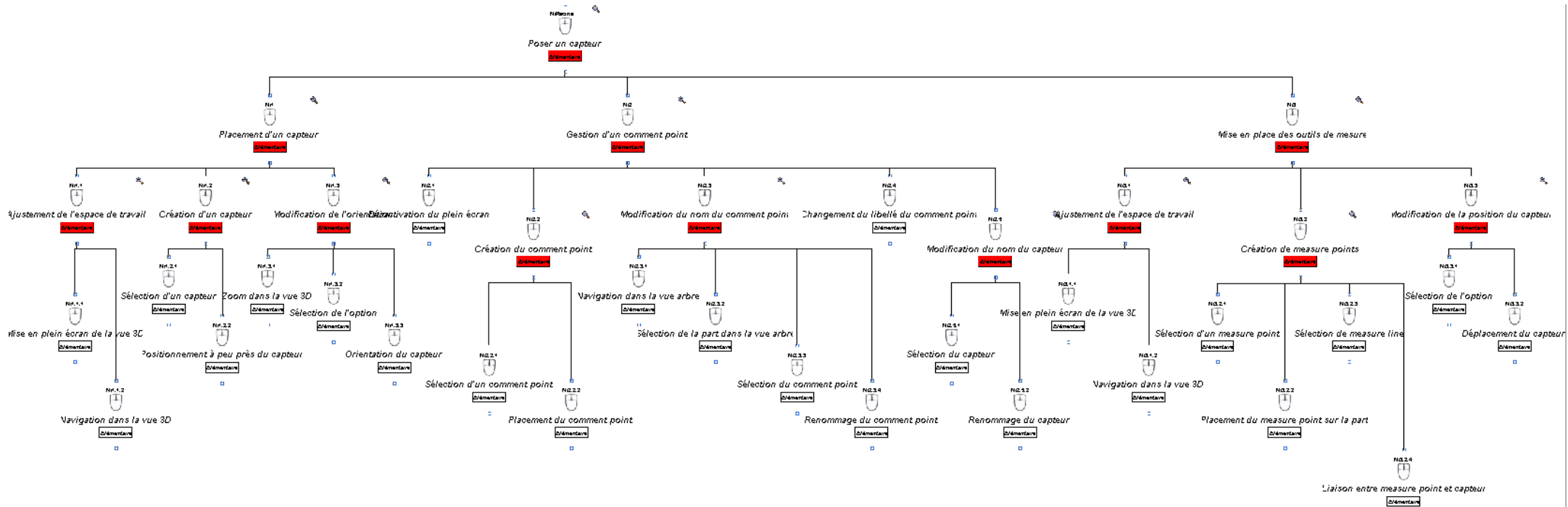


Figure 47 : Diagramme de cas d'utilisation

### V.2.3.2 Modèle de tâche

Le modèle de tâche décrit l'ensemble des interactions entre l'utilisateur et le système et met en évidence les séquences entre ces interactions. Ce modèle précise la façon dont l'utilisateur effectue les cas d'utilisation décrits dans le diagramme de cas d'utilisation vu précédemment.



Ce modèle de tâche met en évidence la similarité des certaines sous-tâches et de leur enchaînement : en effet, la sélection d'un composant comme un capteur ou un mesure point et le passage à son placement. Il est également possible de remarquer que ces sous-tâches sont réalisés dans des types de données différents puisque la sélection du composant s'effectue en 2D et le placement dans la vue 3D, d'où l'intérêt du prototype léger.

## V.3 Conception du prototype léger

---

### V.3.1 Choix de la solution à apporter

Une séance de créativité, dont la problématique était « *Comment réaliser de façon séquentielle la tâche de pointage et sélection dans 2 types de données distincts (2D et 3D) avec une même technique d'interaction ?* », a permis de recueillir un certain nombre d'idées pour la solution à apporter. La séance de créativité a duré 2 heures et a réuni 5 participants ayant des profils différents :

- 1 médiateur
- 1 expert du domaine
- 1 expert 3D
- 1 expert des systèmes avancés
- 1 expert en facteurs humains

Les instructions données aux participants étaient les suivantes :

- Pouvoir pointer et sélectionner en 2D
- Pouvoir pointer et sélectionner en 3D
- Passer de façon transparente de la 2D à la 3D
- Et réciproquement de la 3D à la 2D
- Pas de situation en mobilité → Peut être posée sur une table
- Peut être utilisée à 2 mains

La méthode MACS (Bortolaso, Bach, & Dubois, 2011) - Model Assisted Creativity Session - est une méthode de générativité pour la conception de techniques d'interaction avancées. Elle s'appuie sur le modèle ASUR et a été utilisée afin de faciliter la génération d'idées et de favoriser la créativité des participants. Au cours de la séance, chaque participant pouvait manipuler physiquement les différentes composantes du modèle ASUR qui étaient représentées sous format papier (cf Figure 48).

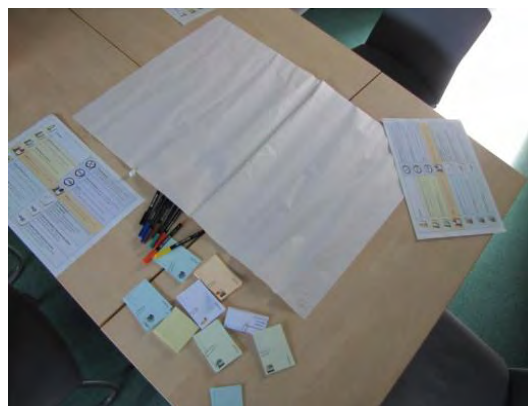


Figure 48: Mise en œuvre de la méthode MACS avec l'éditeur tangible et les légendes utilisées pour comprendre les composantes du modèle ASUR



Un ensemble de 15 solutions a été défini lors de cette séance et est synthétisé dans le mind map suivant (cf Figure 49) :

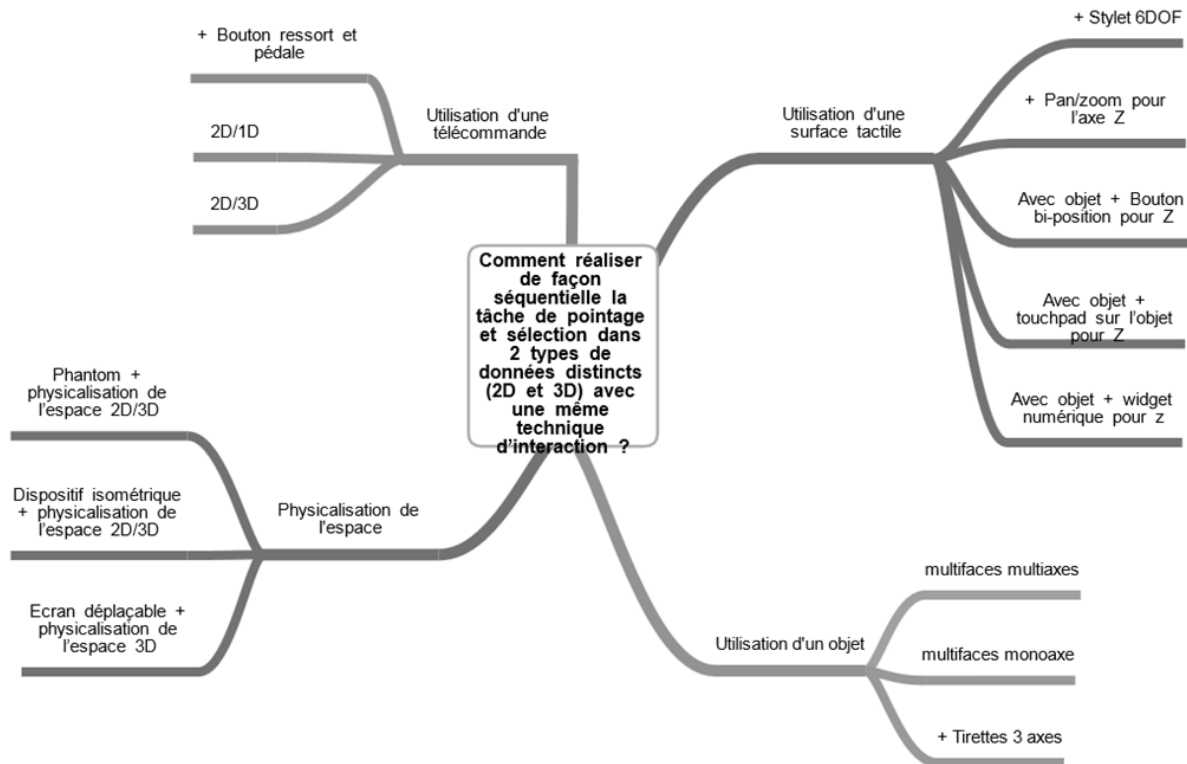


Figure 49 : Mindmap de la séance de créativité

En fin de séance de créativité, les participants ont sélectionné ensemble les modèles qui leur semblaient être les plus intéressants. En tout, 3 modèles ont été choisis : la solution consistant à utiliser une surface tactile et un stylet à 6 degrés de liberté (solution n°5 – cf Figure 51), celle qui utilisait un objet sur une surface tactile et un widget numérique pour z (solution n°9 – cf Figure 50) puis celle qui proposait l'utilisation d'un Phantom et la physicalisation de l'espace 2D/3D (solution n°12 – cf Figure 52).

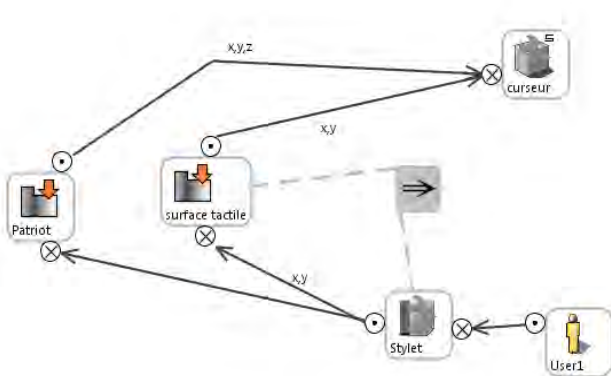


Figure 51: Modèle ASUR représentant la solution n°5

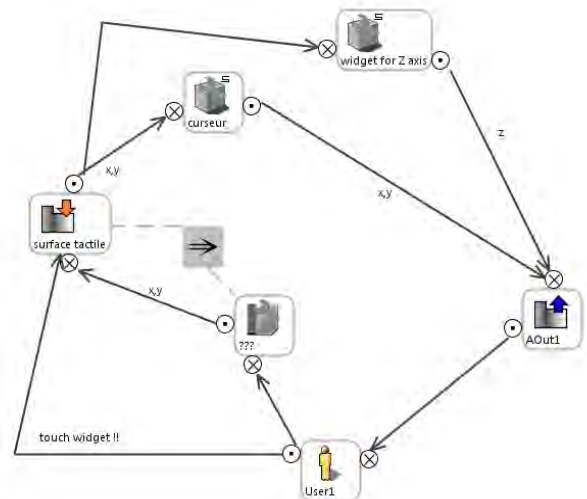


Figure 50: Modèle ASUR représentant la solution n°9

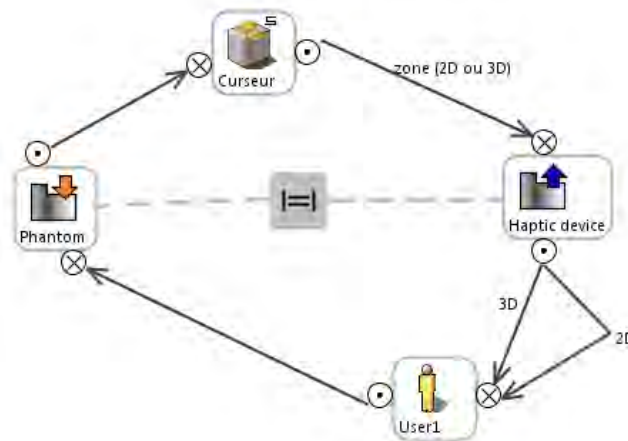


Figure 52: Modèle ASUR représentant la solution n°12

Suite à ces propositions de solutions, des caractéristiques ont été déterminées afin de définir celles qui répondaient au mieux aux besoins et de proposer un prototype qui permettra à l'utilisateur d'interagir de façon pertinente avec un environnement hétérogène:

- D'un point de vue des exigences fonctionnelles
  - Déplacer un curseur en 2D
  - Déplacer un curseur en 3D
  - Passer de la 2D ↔ 3D
  - Valider les actions
- D'un point de vue des contraintes techniques
  - Proposer du tactile
  - Pas de difficulté majeure d'implémentation
- D'un point de vue des contraintes financières/de mise en œuvre
  - Utilisation de technologies déjà acquises

Un tableau récapitulatif (cf Tableau 10) a été mis en place afin de lister les caractéristiques des différentes propositions issues de la séance de créativité (cf. Figure 4g) et de sélectionner la solution la plus adaptée au besoin.

	Déplacer un curseur en 2D	Déplacer un curseur en 3D	Passer de la 2D ↔ 3D	Valider les actions	Proposer du tactile	Sans difficulté d'implémentation	Utiliser des technologies déjà acquises
<b>Solution 1 : 1 télécommande + bouton à ressort + pédale</b>	oui	oui	facile	oui	non	non	possible
<b>Solution 2 : 2 télécommandes en 2D/1D</b>	oui	oui	facile	non	non	non	possible
<b>Solution 3 : 2 télécommandes en 2D/3D</b>	oui	oui	moins facile	non	non	non	possible
<b>Solution 4 : surface tactile et slider</b>	oui	oui	facile	non	oui	peut-être	pas forcément
<b>Solution 5 : surface tactile et stylet 6DOF</b>	oui	oui	facile	non	oui	peut-être	possible
<b>Solution 6 : surface tactile + pan/zoom pour l'axe Z</b>	oui	oui	facile	non	oui	peut-être	possible
<b>Solution 7 : objet sur surface tactile + bouton bi-position pour Z</b>	oui	oui	facile	non	oui	peut-être	possible
<b>Solution 8 : objet sur surface tactile + touchpad sur l'objet pour Z</b>	oui	oui	facile	non	oui	peut-être	possible
<b>Solution 9 : objet sur surface tactile + widget numérique pour z</b>	oui	oui	facile	non	oui	peut-être	possible
<b>Solution 10 : objet multiface/multiaxes</b>	oui	peut-être	moins facile	non	oui	peut-être	possible
<b>Solution 11 : objet multiface/mono axe</b>	oui	oui	facile	non	oui	peut-être	possible
<b>Solution 12 : Phantom et physicalisation de l'espace 2D/3D</b>	oui	oui	facile	non	non	peut-être	pas forcément
<b>Solution 13 : Dispositif isométrique et physicalisation de l'espace 2D/3D</b>	oui	oui	facile	non	non	peut-être	possible
<b>Solution 14 : Ecran déplaçable + physicalisation de l'espace 3D</b>	oui	oui	facile	non	oui	peut-être	pas forcément
<b>Solution 15 : Objet tirette 3axes</b>	oui	oui	facile	non	non	peut-être	pas forcément

Tableau 12: Tableau récapitulatif des solutions issues de la séance de créativité

Les solutions n°5, n°9 et n°12 semblent répondre au mieux aux différents besoins exprimés, d'autant plus qu'elles ont été sélectionnées par les utilisateurs en fin de séance de créativité. Finalement, la solution retenue est la solution n°5 car elle permet d'utiliser un objet physique en 3D, ce qui n'est pas possible avec les deux autres solutions. Cela permettra à l'utilisateur de réaliser des actions plus naturelles et plus proches de ses actions habituelles en 3D. Cette solution consiste ainsi en :

- interagir en 2D : réalisation avec du tactile
- interagir en 3D : réalisation avec un capteur/tracker 6-DOF

Remarque : certaines interactions en 2D pourraient être réalisées sur des objets 3D si celles-ci concernent les translations sur les axes x et y, les rotations autour de z et le zoom en z. Cela permet d'une part de rationaliser les interactions de l'utilisateur en fonction des besoins de l'interaction, mais d'autre part, de proposer une solution alternative qui puisse le soulager si jamais il ressent de la fatigue avec le tracker 6-DOF.

### V.3.2 Contraintes techniques

Pour le choix de la solution technique concernant le tracker 6-DOF, un certain nombre de contraintes peuvent être listées :

- Etre pratique et peu fragile
- Ne pas être encombrant et être facilement transportable
- Posséder une bonne autonomie
- Ne pas générer de problèmes d'ondes
- Etre peu sensible à la lumière
- Ne pas créer des problèmes d'occlusion
- Avoir un prix raisonnable

NB :

Quel que soit le type du tracker (infrarouge, électromagnétique ou optique) → besoin de calibration ou d'être dans un certain champ (celui de détection du récepteur ou de la caméra).

Il existe également des trackers inertiels (composés de gyroscopes et d'accéléromètres, avec une lente dérive même lorsqu'il n'y a pas de mouvement), mais ils sont souvent associés à des trackers optiques ou infrarouges.

Voici un tableau reprenant les différentes solutions de tracker 6-DOF et leurs réponses possibles aux contraintes listées précédemment.

Contraintes Solutions	Pratique (peu fragile)	Transportable (encombrement)	Bonne autonomie	Pas de problèmes d'ondes	Peu sensible à la lumière	Pas de problème d'occlusion	Prix raisonnable
Tracker électromagnétique (type Patriot)	Pas vraiment (un certain nombre de composants)	Assez encombrant (un certain nombre de composants)	Dépend de fil / sans fil	Oui (notamment avec le métal)	Non	Non	Peu raisonnable
Tracker infrarouge (type Kinect)	Oui	Oui	Pas de problème	Non	Moyennement sensible (faire attention à ce que la lumière ne pointe pas directement sur le capteur)	Apparemment, plus on augmente les points, meilleure est la détection	Raisonnable
Tracker optique (type webcam)	Oui	Oui	Pas de problème	Non	Très sensible	Assez gros problème	Raisonnable
Souris	Oui	Oui	Dépend de fil / sans fil	Non	Non	Pas de problème d'occlusion	Raisonnable

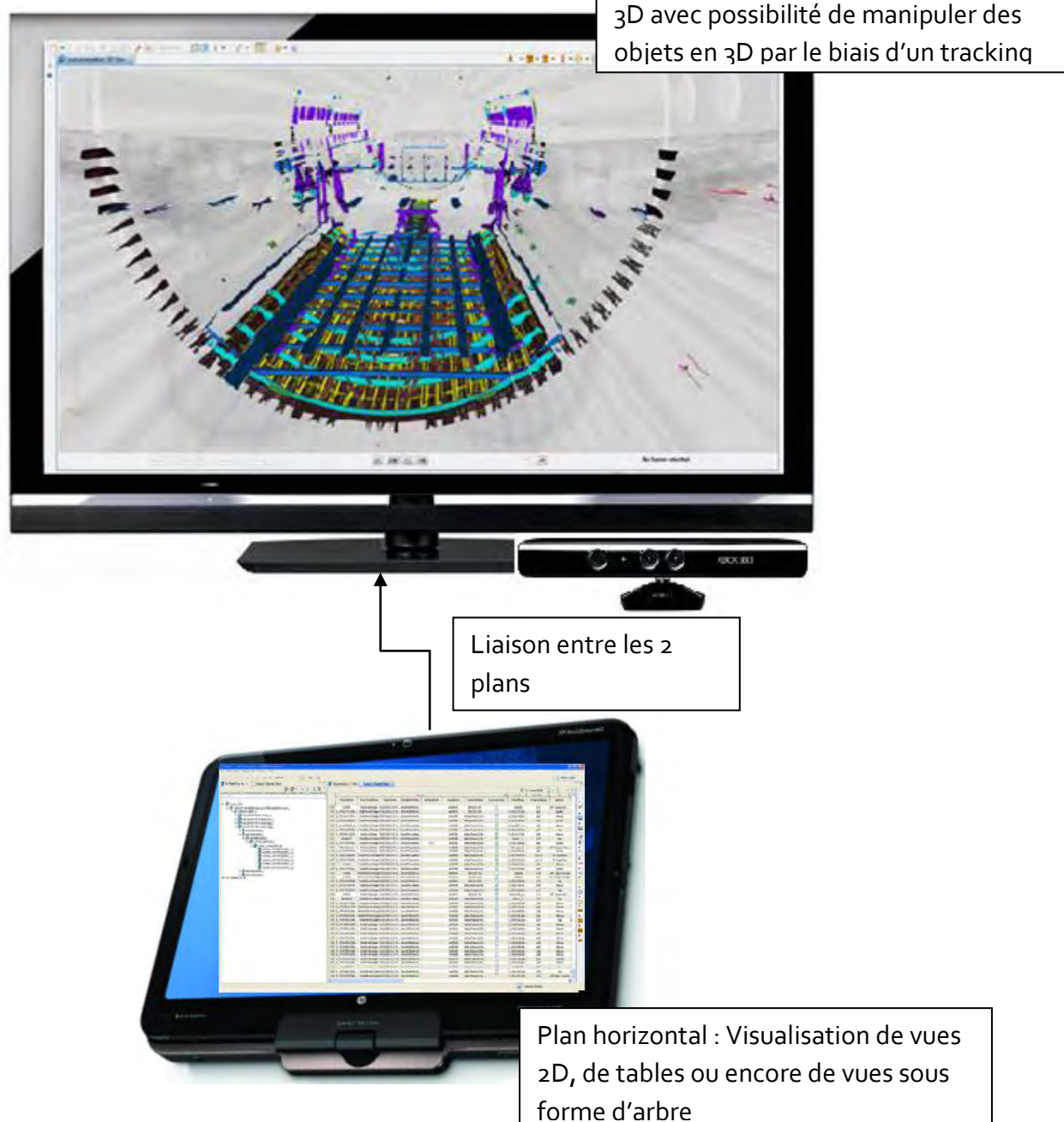
La solution technique retenue peut être la Kinect en vue d'optimiser l'utilisation du tactile pour l'interaction en 3D sans avoir à manipuler d'objet particulier. Cette solution peut être évolutive puisqu'il y a la possibilité d'ajouter de nouveaux gestes ou de les modifier afin de les améliorer. Cette solution a également l'avantage de marquer le début et la fin d'une action et de différencier les différentes actions. Il est également possible de gérer la validation d'une action sans pour autant ajouter un artefact spécifique. D'un point de vue architectural, des bibliothèques d'assez haut niveau existe en Java (comme Jnect) pour pouvoir intégrer rapidement ce type de solution aux applications de GVS.

### V.3.3 Présentation générale de la solution

La technique d'interaction rend possible la sélection de composants en 2D puis la manipulation d'un objet en 3D et la validation de sa position. Ainsi, la solution apportée aura pour but de faciliter la réalisation séquentielle de la tâche de pointage, notamment, dans 2 types de données distincts (2D et 3D) avec une même technique d'interaction.

#### V.3.3.1 Présentation de la situation d'interaction

La situation d'interaction, générée d'après les résultats de la séance de créativité, comprend deux plans distincts afin de permettre à l'utilisateur d'interagir avec les deux types de données et d'accéder plus facilement à ces données. La situation d'interaction est expliquée ci-dessous :


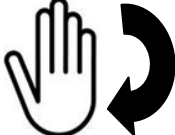







### V.3.3.2 Caractérisation des tâches d'interaction de la vue 3D

Les principales tâches d'interaction relevées dans la vue 3D sont :


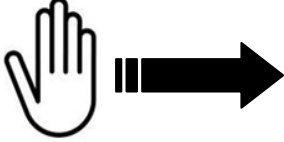
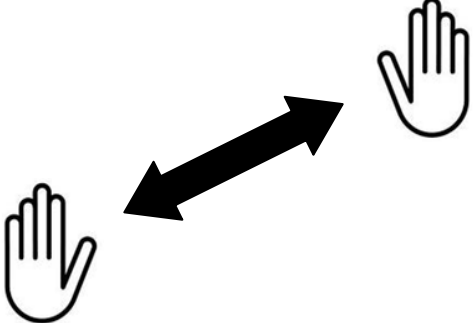
- la manipulation d'objet 3D (tels que des capteurs) en les déplaçant et en les orientant sur les 3 axes,
- la navigation dans la scène 3D en déplaçant ou en orientant le point de vue de la caméra selon les 3 axes,
- la sélection d'objet 3D ou encore la sélection d'un item dans un menu contextuel sur un objet situé dans la scène 3D.

Un ensemble de gestes physiques rend possible la réalisation de ces tâches dans le monde numérique et nous pouvons ainsi proposer des correspondances entre tâches d'interaction et actions physiques :

Tâches d'interaction	Actions physiques	Illustration des actions physiques
Manipulation	1 main	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Translation</li> </ul>	Déplacement bras-main	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Orientation</li> </ul>	Rotation main	
Navigation	2 mains	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Translation</li> </ul>	1 <sup>ère</sup> main : déplacement bras-main 2 <sup>ème</sup> main : main fixe et tendue dans l'espace	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Orientation</li> </ul>	1 <sup>ère</sup> main : rotation main 2 <sup>ème</sup> main : main fixe et tendue dans l'espace	
Sélection objet 3D	Attente de 5sec sur le choix	
Sélection item dans menu contextuel	Tracé d'un cercle avec la main pour faire apparaître le menu contextuel puis attente de 5sec sur le choix	
Validation d'une action (ou au lieu d'un double-clic par exemple)	Fermeture de la main	

La fin de ces différentes actions est marquée par le retrait de la main réalisant l'action en la rapprochant de l'utilisateur (on joue ainsi sur la profondeur de la main par rapport au tracker 6-DOF).

Les interactions proposées dans la vue 3D pour la sélection, la manipulation et le redimensionnement des cutplanes recourent à des raccourcis clavier spécifiques. En effet, la touche SHIFT est actuellement nécessaire pour interagir avec les cutplanes, en plus des interactions de base. Nous pouvons proposer les métaphores suivantes comme nouvelles interactions spécifiques pour les cutplanes :

Tâches d'interaction	Actions physiques	Illustration des actions physiques
Sélection cutplane	Attente de 5sec sur le choix avec les deux mains	
Manipulation cutplane (mode modify)	Déplacement bras-main	
Redimensionnement cutplane (mode modify)	« Zoom » à deux mains	

### V.3.3.3 Scénarios décrivant la mise en œuvre de la solution

Des scénarios ont été rédigés afin de présenter la mise en œuvre de la solution. Ces scénariosinstancient les cas d'utilisation décrits dans le diagramme de cas d'utilisation et ont pour but de présenter l'utilisation du prototype au cours de l'interaction entre l'utilisateur et de l'application (cf C pour les story-boards correspondants)

#### a. Description textuelle du cas d'utilisation « PlacerCapteur »

Pré conditions : L'application est lancée ; l'utilisateur a défini les capteurs à placer et connaît leur position ; l'utilisateur utilise 3 vues différentes de l'application : la vue 3D, la vue en arbre, et la vue table : la vue 3D est en plein écran sur le plan vertical et les deux autres vues sont visualisées sur la surface tactile placée horizontalement.

Post conditions : Le capteur placé est inséré dans la base de données, les plans pdf ont été générés.

Scénario :



Dans la vue 3D, le sensor requestor utilise le tracking pour naviguer dans la maquette numérique de façon à atteindre la « part » de l'avion sur laquelle il doit poser un capteur. Il sélectionne ensuite l'icône du capteur à poser, située sur la partie tactile. Il le positionne à peu près dans la vue 3D, et réalise un zoom dans la vue 3D, en utilisant le système de tracking. Le sensor requestor sélectionne le capteur dans la vue 3D, puis il sélectionne l'icône de modification du capteur sur la partie tactile. Enfin, il modifie l'orientation du capteur, à l'aide du système de tracking.

#### **b. Description textuelle du cas d'utilisation « AjouterCommentPoint »**

Pré conditions : L'application est lancée ; l'utilisateur a défini les capteurs à placer et connaît leur position ; l'utilisateur utilise 3 vues différentes de l'application : la vue 3D, la vue en arbre, et la vue table : la vue 3D est en plein écran sur le plan vertical et les deux autres vues sont visualisées sur la surface tactile placée horizontalement.

Post conditions : Un comment point a été ajouté sur la maquette numérique et porte le nom et le texte saisis par l'utilisateur.

##### Scénario:

Dans la partie tactile, le sensor requestor sélectionne l'icône pour créer un « comment point ». Puis il le place sur la « part » en utilisant le système de tracking. Depuis la partie tactile, il se déplace dans la vue arbre pour sélectionner la « part ». Puis il renomme le comment point à partir du menu « Propriétés ». L'utilisateur choisit le mode « modify » depuis la partie tactile. Puis il sélectionne le label du comment point (double clic souris) dans la vue 3D. Il inscrit la nouvelle orientation dans le comment point depuis le clavier tactile. Ensuite, il renomme le capteur dans la vue table.

#### **c. Description textuelle du cas d'utilisation « PlacerMeasureTools »**

Pré conditions : L'application est lancée ; l'utilisateur a défini les capteurs à placer et connaît leur position ; l'utilisateur utilise 3 vues différentes de l'application : la vue 3D, la vue en arbre, et la vue table : la vue 3D est en plein écran sur le plan vertical et les deux autres vues sont visualisées sur la surface tactile placée horizontalement.

Post conditions : Les mesures sont indiquées sur la maquette numérique, le capteur est placé à la bonne position.

##### Scénario:

Le sensor requestor navigue avec le système de tracking dans la vue 3D pour se positionner correctement. Il sélectionne ensuite l'icône des mesure points dans la partie tactile. Puis il en place deux sur la « part » dans la vue 3D en utilisant le système de tracking. Il sélectionne ensuite des mesure lines depuis la partie tactile. Il lie alors le capteur et les mesure points avec les mesure lines dans la vue 3D. Ensuite, il sélectionne l'option de déplacement du

capteur dans la partie tactile. Puis il sélectionne le capteur dans la vue 3D. Pour ensuite le déplacer en fonction des indications des mesure points (peut-être déplacement sur x et y).

Commentaire : La pratique montrera si la validation de la création d'un capteur nécessite une validation explicite telle que le point fermé ou si le retrait de la main est suffisant.

#### **V.3.4 Apport de la situation d'interaction et discussion**

La situation d'interaction décrite ci-dessus est basée sur un affichage vertical d'une vue 3D, principe largement répandu lorsque plusieurs techniques d'interaction sont combinées (Ajaj, Jacquemin, & Vernier, 2009). En effet, la correspondance entre monde physique et monde numérique semble plus simple à réaliser et la profondeur semble plus facile à estimer lorsque la visualisation de la vue 3D est verticale. Les interactions 2D sont proposées sur une surface tactile horizontale ; cela permet de réduire les interactions à bras levés et de moins fatiguer l'utilisateur. Ce choix de conception est basé sur les résultats de l'expérimentation menée en 3D ; c'est ainsi que le tracker a été privilégié à une autre solution pour le type de donnée 3D. Les utilisateurs avaient été satisfaits par cette technique mais ils avaient pu remarquer qu'elle était fatigante pour le bras et l'épaule. L'alternance avec une technique spécifique pour la 2D est ainsi proposée à l'utilisateur afin d'être plus confortable dans son utilisation. Par ailleurs, cela peut s'avérer plus simple pour saisir du texte. Les espaces d'interactions sont distincts mais l'utilisateur ne perd pas la cohérence des effets de ses actions entre les différents espaces : les espaces sont indépendants et ne sollicitent pas l'attention de l'utilisateur sur les deux espaces à la fois. La manipulation d'objets 3D de manière indirecte favorise les performances et la satisfaction des utilisateurs, d'après une étude menée sur les manipulations multi-touch en 2D et en 3D (Knoedel & Hachet, 2011). Cette étude a montré que le contrôle indirect était plus précis pour les manipulations en 3D. Une précision plus importante pour les rotations 3D avec contrôle indirect a également été démontrée dans une seconde étude (Hancock, Hilliges, Collins, Baur, & Carpendale, 2009).

L'intérêt de notre adaptation et de la mise en place de notre expérimentation est de déterminer si l'association de deux plans distincts avec l'utilisation d'un support tactile dédié à de la 2D et d'un tracker dédié à de la 3D permet d'optimiser les performances et la satisfaction de l'utilisateur au cours de la réalisation de la tâche évaluée. Par le biais de l'expérimentation, il sera possible de définir si la solution proposée permet de réduire le temps de passage d'une technique d'interaction à l'autre. Pour ce faire, il sera pertinent de comparer notre solution à 3 autres types de techniques d'interaction :

- Support tactile + spacenavigator : utilisation des deux plans distincts. Le spacenavigator a déjà été comparé à un tracker dans notre évaluation en 3D. Cette comparaison a pour objectif de montrer que l'utilisation du tracker en environnement hétérogène est toujours aussi performante et satisfaisante qu'en environnement 3D.

- Souris + tracker : utilisation d'un même plan vertical. Cette comparaison est mise en place afin de déterminer l'impact de l'utilisation de deux plans distincts sur les performances de l'utilisateur.
- Souris + spacenavigator : utilisation d'un même plan vertical. Cette comparaison est mise en place afin de déterminer l'impact de l'utilisation de deux plans distincts sur les performances de l'utilisateur.

Ces comparaisons sont utiles afin de comprendre si l'utilisateur met en œuvre des stratégies d'utilisation des techniques différentes si celles-ci peuvent expliquer des résultats quantitatifs différents.

Enfin, l'adaptation de la norme à un environnement hétérogène est un moyen de formaliser l'évaluation de techniques d'interaction dans cet environnement particulier et de déterminer si ces techniques sont optimisées pour la tâche évaluée et si elles peuvent être mises en œuvre dans un contexte de travail.

## V.4 Discussion

---

Afin de construire le prototype léger, une première évaluation a été menée sur un prototype léger partiel afin de tester la technique d'interaction en 3D. Cette évaluation est présentée dans le chapitre IV.1 et elle a démontré qu'une technique isotonique a de meilleures performances mais est également préférée comparée à une technique isométrique. Cette évaluation a été menée selon notre cadre structuré basé sur une adaptation de la norme ISO 9241-9. Ceci marque la première étape de la construction du prototype léger.

La deuxième étape de la conception de ce prototype est d'améliorer la technique d'interaction évaluée en 3D et de permettre son utilisation dans un environnement hétérogène en 2D/3D. Une nouvelle phase de conception, qui a été réalisée selon les principes de la conception participative, a rendu possible la mise en œuvre de cette deuxième étape. La technique d'interaction conçue lors de cette étape et détaillée dans cette partie reste à être évaluée selon la méthode proposée dans le chapitre IV.2.

La méthode d'évaluation proposée a pour objet de tester les techniques d'interaction pour une tâche de pointage réalisée en séquence entre des données en 2D et en 3D. L'intérêt de cette méthode est de déterminer la performance et la satisfaction de la technique d'interaction quand un utilisateur effectue une tâche de sélection dans des types de données différents, ce qui est à la base des autres types de tâche, tels que la manipulation d'un objet ou la navigation. Dans le scénario présenté dans la mise en œuvre du prototype léger, il est possible de réaliser la sélection d'un capteur en 3D puis de faire la sélection d'un autre élément dans une vue en 2D par exemple, ce type d'interaction avec le système peut être testé via la méthode que nous proposons. A ce jour, l'évaluation est en cours de planification, mais nous n'avons pas encore accès aux utilisateurs. Une fois cette évaluation menée, l'analyse des résultats indiquera si la technique d'interaction conçue répond bien aux objectifs fixés et la performance et la satisfaction de celle-ci sont conformes aux attentes du contexte d'utilisation.

Compte tenu des différents scénarios décrits dans la partie V.3.3.3, nous nous rendons compte que d'autres situations d'interaction ne sont pas couvertes par notre méthode d'évaluation et qu'il est alors possible de proposer des évolutions de notre protocole afin de couvrir un plus grand nombre de situations d'interaction. Il serait ainsi envisageable d'étendre nos propositions d'adaptation de la tâche de pointage à d'autres tâches élémentaires telles que la navigation ou la manipulation et ainsi permettre l'évaluation de tâches de plus gros grain combinant plusieurs types de tâches élémentaires.

## V.5 Bibliographie

---

- Ajaj, R., Jacquemin, C., & Vernier, F. (2009). RVDT: A design space for multiple input devices, multiple views and multiple display surfaces combination. *ICMI-MLMI'09*, (pp. 269-276).
- Bortolaso, C., Bach, C., & Dubois, E. (2011). MACS: A combination of a formal mixed interaction model with an informal creative session. *EICS'11*, (pp. 63-72).
- Hancock, M., Hilliges, O., Collins, C., Baur, D., & Carpendale, S. (2009). Exploring tabgible and direct touch interfaces for manipulating 2D and 3D information on a digital table. *OTS'09*.
- Knoedel, S., & Hachet, M. (2011). Multi-touch RST in 2D and 3D spaces: Studying the impact of directness on user performance. *3DUI*.



## VI Conclusion et perspectives

### VI.1 Conclusion

---

Les deux cadres structurés d'évaluation de la tâche de pointage que nous avons proposés et mis en œuvre ont pour objectif de combiner l'étude de la performance et de la satisfaction de techniques d'interaction avancées conçues pour réaliser des tâches de pointage en EV 3D ou EV hétérogène où différents types de donnée (2D et 3D) sont agrégés. Ces situations d'interaction spécifiques sont présentes dans des cas d'étude industriels sur lesquels nous nous sommes basés pour établir nos protocoles d'évaluation. Il était en effet primordial de proposer des protocoles d'évaluation de la tâche de pointage unifiés transposables dans des situations concrètes.

Concrètement la performance, la précision, la satisfaction et le confort sont intégrés. L'approche que nous proposons de l'évaluation d'une tâche de pointage dans ces contextes particuliers permet ainsi de combiner des aspects quantitatifs et qualitatifs mesurés dans des protocoles d'évaluation basés sur la norme ISO 9241-9. En adaptant certains éléments de la norme, nous avons proposé des cadres structurés qui constituent une première étape vers une formalisation de ce type d'évaluation et la création d'une base de connaissances cohérentes sur l'utilisabilité de techniques à au moins 3 degrés de liberté pour le pointage dans un EV 3D et en contexte hétérogène 2D/3D. Ce type d'évaluation basée sur la loi de Fitts permet l'étude d'un grand nombre de cas possibles en faisant varier l'intervalle des indices de difficultés (ID). De plus, une telle approche permet de comparer des résultats globaux car ils ne sont pas dépendants d'un contexte de tâche particulier, et de se focaliser sur une caractéristique de la technique, qui une fois optimisée contribuera à l'adéquation globale de la technique au domaine visé. Une fois le contexte d'utilisation visé mieux cerné, cette étude fine permettra de déterminer la technique d'interaction la plus appropriée : par exemple, pour un score SUS et un débit (TP) équivalent entre deux techniques, l'analyse atomique du pointage selon les ID pourra révéler une meilleure adéquation à l'application cible d'une des techniques d'interaction et celle-ci pourra alors être privilégiée sur ce motif. Il en va de même avec la combinaison des indices de performance (temps, ratio d'inefficience et TP) et de satisfaction (SUS, confort) : selon le type de contexte, les uns pourront s'avérer prédominants, mais les autres ne seront pas pour autant omis du protocole d'expérimentation.

Au-delà de cette contribution méthodologique, nous avons également conçu et développé une plateforme logicielle support à la conduite de ces expérimentations, en incluant la collecte de données. Ces deux volets de nos travaux ont fait l'objet d'une première validation au travers de leur mise en œuvre réelle sur des cas d'étude concrets.

Enfin, en alliant d'une part performance et satisfaction dans un protocole d'expérimentation pour des techniques d'interaction en 3D ou hétérogène en 2D/3D et en réunissant d'autre part des mesures prises en compte dans une norme et certaines autres utilisées de manière récurrente dans des expérimentations de la littérature, notre contribution à l'évaluation de la tâche de pointage revêt un caractère unificateur et constitue une originalité scientifique certaine.

Par ailleurs, ces travaux menés dans le cadre d'une thèse CIFRE comportait également un volet industriel. Ce manuscrit met en évidence le caractère ambitieux porté par la volonté de GVS de proposer une technique innovante pour interagir avec un environnement hétérogène.

Les contraintes industrielles auxquelles nous avons fait face ont mis en lumière l'utilisation conjointe de types de données différents dans le but de favoriser l'accès aux données et leur analyse. Ce constat a mené à développer une méthode d'évaluation pour un environnement hétérogène basé sur la mise en œuvre d'un environnement comprenant des données en 2D et en 3D. Enfin, il a été possible de proposer un prototype basé sur des recommandations issues des travaux scientifiques et sur une conception participative confrontant les besoins des utilisateurs et les contraintes industrielles.



## VI.2 Perspectives

---

Suite à ces travaux de recherche, de nombreuses perspectives à court terme sont envisagées notamment concernant le volet applicatif industriel. En effet, le prototype conçu en entreprise n'a pas encore été évalué d'après le protocole d'évaluation proposé pour un environnement hétérogène. Il n'a pour l'heure que bénéficier de la mise en œuvre de recommandations extraites sur la base d'expérimentations précédemment menées dans le cadre du protocole proposé. Cette évaluation aurait pour but de réaliser une rétro conception et d'apporter des évolutions pertinentes au prototype afin d'améliorer son adéquation avec la tâche des utilisateurs.

Le prototype proposé comprend deux zones d'interaction distinctes : la tablette permet à l'utilisateur de mêler les interactions en entrée et en sortie et l'espace 3D physique se trouvant devant l'utilisateur qui permet d'interagir en 3D avec les objets présents dans l'EV dont la visualisation est distante. Dans cette seconde zone d'interaction, les actions sont donc dissociées des perceptions. Désormais, l'utilisation des téléphones mobiles est fréquente et représente une nouvelle perspective étant donné qu'ils offrent la possibilité d'interagir en 3D tout en mêlant les interactions en entrée et en sortie au sein d'un même espace d'interaction. De telles situations s'apparentent alors aux situations décrites par le modèle de l'interaction instrumentale (Beaudouin-Lafon, 2000): intégrer les caractéristiques de ce modèle, en particulier le double feedback, permettront d'enrichir notre protocole d'évaluation.

A plus long terme, de nombreuses perspectives scientifiques et méthodologiques émergent. Limiter l'hétérogénéité à une confrontation 2D/3D n'est pas satisfaisant. Les types de donnée constituent la première caractéristique d'un environnement hétérogène, mais il serait possible de considérer l'aspect temporel de la réalisation de la tâche dans l'environnement (Allen, 1983) (Hartson & Gray, 1992), ou encore la configuration de l'espace d'interaction de l'environnement entre l'entrée et la sortie (Price, Sheridan, Falcao, & al., 2008). La considération de nouvelles caractéristiques de l'hétérogénéité pourrait amener à faire évoluer le protocole d'évaluation présenté dans ce manuscrit de façon à intégrer ces caractéristiques. Il est donc nécessaire de dépasser ce premier pas structurant en se concentrant sur l'identification de caractéristiques de l'hétérogénéité et de l'étude de leur impact sur le protocole d'évaluation actuel. D'un point de vue quantitatif, de nouvelles mesures de performance ou des adaptations de mesures existantes pourront être apportées afin de répondre à de nouvelles situations d'hétérogénéité et de comprendre l'impact de l'interaction de l'utilisateur sur la réalisation de la tâche dans ces nouvelles situations. Les mesures utilisées dans un environnement hétérogène et présentée dans l'étude en III.2.2.2 peuvent être un point de départ afin de proposer des mesures complémentaires à celles que nous avons détaillées en IV.2.2. En effet, nous n'avons pas identifié de variables étudiant aussi précisément le comportement du curseur comme le nombre de validations où le curseur est en dehors de la cible.

D'un point de vue qualitatif, il serait pertinent de faire évoluer le protocole existant afin de l'adapter aux caractéristiques définies pour l'hétérogénéité mais également à des contextes métier, comme cela peut être le cas dans les interactions liées au contexte (Frees, 2010). Ainsi, de nouveaux indices ou représentations pourraient être proposés en fonction des contextes métier. Dans notre cas d'étude, les utilisateurs sont amenés à poser des capteurs sur un avion, nous avons ainsi réalisé un environnement hétérogène d'évaluation correspondant à cette situation : un EV 3D de référence a été défini afin d'adapter la norme ISO pour évaluer les techniques d'interaction. Nous pourrions analyser les différences des contextes métier impliqués et déterminer une série de contexte de référence dans lesquels mettre en place les indices adéquats en fonction du contexte métier sélectionné : par exemple, ajouter des obstacles ou encore mettre les cibles en mouvement. En effet, de récentes études ont montré que des évaluations commencent à être menées sur des cibles dynamiques dans un EV 3D (cf III.2.2.3). La standardisation des indices offrira alors en plus la possibilité d'évaluer des techniques d'interaction d'après un contexte métier et de pouvoir comparer les évaluations pour un même contexte de référence. Il serait également possible de présenter une même information visualisée dans un même type de donnée mais selon un point de vue différent (exemple du partage d'informations avec un drone où on pourrait visualiser le drone dans son contexte mais également ce qu'il voit). De nouvelles problématiques apparaissent alors avec la prise en compte de ces nouvelles considérations car il serait question d'évaluer la qualité du pointage et de savoir comment pointer une direction lorsque deux points de vue différents sont confrontés.

### VI.3 Bibliographie

---

- Allen, J. (1983, November). Maintaining knowledge about temporal intervals. *Commun. ACM*, 26(11), 932-843.
- Frees, S. (2010). Context-driven interaction in immersive virtual environments. *Virtual Real*, 14(4), 277-290.
- Hartson, H., & Gray, P. (1992, March). Temporal aspects of tasks in the user action notation. *Hum.-Comput. Interact.*, 7(1), 1-45.
- Price, S., Sheridan, J., Falcao, T., & al. (2008). Towards a framework for investigating tangible environments for learning. *International Journal of Arts and Technology: Special Issue on Tangible and Embedded Computing*, 351-368.



# Annexes

## A. Questionnaire de satisfaction pour l'évaluation d'une tâche de pointage réalisée dans un EV 3D

	Fortement contre				Fortement pour
VI.4					
Je pense que j'aimerais utiliser ce type de dispositif fréquemment	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	1	2	3	4	5
Je trouve que ce dispositif est inutilement complexe	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	1	2	3	4	5
J'ai trouvé que le dispositif était facile à utiliser	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	1	2	3	4	5
Je pense que j'aurais besoin de l'aide d'une personne expérimentée pour utiliser ce dispositif	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	1	2	3	4	5
J'ai trouvé que les différentes fonctions du dispositif étaient bien intégrées	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	1	2	3	4	5
J'ai trouvé qu'il y avait trop d'incohérences dans ce dispositif	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	1	2	3	4	5
J'imagine que plusieurs personnes apprendront vite à utiliser le dispositif	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	1	2	3	4	5
J'ai trouvé que le dispositif était peu maniable à utiliser	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Je me sens en confiance lors de l'utilisation du dispositif

1	2	3	4	5

J'ai eu besoin d'apprendre beaucoup de choses avant d'utiliser le dispositif

1	2	3	4	5

Utiliser ce dispositif est plaisant

1	2	3	4	5

Utiliser ce dispositif est stimulant

1	2	3	4	5

Je n'aimerais pas utiliser ce dispositif tous les jours

1	2	3	4	5

Les tâches peuvent être réalisées de façon simple avec ce dispositif

1	2	3	4	5

Utiliser ce dispositif est frustrant

1	2	3	4	5

La vitesse du dispositif est suffisamment rapide

1	2	3	4	5

Questions plus générales pour chacun des dispositifs :

- Si après observation, la main utilisée est différente de la main dominante : demander pourquoi ?
- Quels sont les trois points les plus positifs du dispositif ?

- Quels sont les trois points les plus négatifs du dispositif ?
- Auriez-vous des suggestions à apporter sur ce dispositif (améliorations à apporter...)?
- Avez-vous des remarques à ajouter ou des points importants à aborder qui ne l'auraient pas été lors de cet entretien ?

Notre objectif étant de comparer deux périphériques, nous pouvons compléter le SUS par la grille issue de la norme 9241-9 et qui permet d'évaluer de façon comparative deux dispositifs. Cette grille se remplit en deux temps : les cases correspondant à la phase 1 sont remplies par l'utilisateur après avoir testé le premier périphérique et celles correspondant à la phase 2 sont remplies après avoir testé le deuxième périphérique en comparaison du premier.

Tableau C.2 — Échelle d'évaluation comparative

Indices généraux	Phase 1: Premier dispositif d'entrée □ A ou □ B					Phase 2: Deuxième dispositif d'entrée □ A ou □ B		
	Très Négatif..... Très Positif					Pire	Identique	Meilleur
	1	2	3	4	5	-1	0	+1
1. Force d'activation								
2. Souplesse d'utilisation								
3. Efforts requis pour le l'utilisation								
4. Précision								
5. Vitesse d'utilisation								
6. Confort global								
7. Fonctionnement global								
Indices de fatigue	Premier dispositif d'entrée □ A ou □ B					Deuxième dispositif d'entrée □ A ou □ B		
	Extrême ..... Aucune					Pire	Identique	Meilleur
	1	2	3	4	5	-1	0	+1
8. Fatigue des doigts								
9. Fatigue du poignet								
10. Fatigue du bras								
11. Fatigue de l'épaule								
12. Fatigue du cou								

Questions permettant de comparer les deux périphériques :

- Quel dispositif avez-vous préféré utiliser ?
- Quel dispositif vous a permis de réaliser le plus facilement les tâches attendues ?
- Et lequel vous a le plus contraint ?
- D'après vous, quelles différences existent entre les deux dispositifs ?
- Et quels sont les points communs ?





Questions relatives à l'application :

	Pas du tout d'accord					Tout à fait d'accord
Ce système est trop long à répondre						
	1	2	3	4	5	
J'ai apprécié ma session avec ce système						
	1	2	3	4	5	
Les informations sont claires et compréhensibles						
	1	2	3	4	5	
Je peux comprendre et agir en fonction des informations fournies par le système						
	1	2	3	4	5	

- Est-ce que le comportement du pointeur vous a aidé à atteindre les cibles ?
- Quels ont été les aspects de l'environnement 3D qui vous ont aidé dans votre tâche ?
- Quels sont la / les stratégie(s) que vous avez utilisée(s) pour vous orienter dans l'environnement 3D ?
- D'après vous, est-ce que les éléments qui se trouvent devant et derrière sont-ils suffisamment différenciés ?
- Avez-vous des remarques à ajouter ou des points importants à aborder qui ne l'auraient pas été lors de cet entretien ?

## B. Questionnaires pour l'évaluation d'une tâche de pointage en situation hétérogène 2D / 3D

---

3 types de questionnaires sont utilisés lors de l'expérimentation pour évaluer les techniques testées par les utilisateurs :

### B.1. Questionnaire sur le confort

Le premier questionnaire rempli par les utilisateurs est le questionnaire sur le confort issu de la norme ISO 9241-9. Il ne s'agit pas d'une échelle comparative, mais un questionnaire par technique regroupant des indices généraux et des indices de fatigue, à évaluer sur une échelle de Likert à 5 niveaux allant du « plus négatif » au « plus positif », est proposé à

l'utilisateur pour permettre d'avoir une vision synthétique des résultats. Les comparaisons pourront être établies sur la base de ces résultats et par le biais de l'analyse statistique. L'utilisateur a donc à remplir le questionnaire 3 fois au cours de l'expérimentation.

*Items du questionnaire sur le confort*

Indices généraux

- Force d'activation
- Souplesse d'utilisation
- Efforts requis pour l'utilisation
- Précision
- Vitesse d'utilisation
- Confort global
- Fonctionnement global

Indices de fatigue

- Fatigue des doigts
- Fatigue du poignet
- Fatigue du bras
- Fatigue de l'épaule
- Fatigue du cou

## B.2. Questionnaire de satisfaction

Le questionnaire de satisfaction est utilisé pour évaluer chaque technique. Il est ainsi proposé à l'utilisateur après le test de chaque technique au même moment que le questionnaire sur le confort. Les utilisateurs évaluent la technique sur une échelle de Likert à 5 niveaux allant de « fortement contre » à « fortement pour ». L'utilisateur a donc à remplir le questionnaire 3 fois au cours de l'expérimentation.

Evaluation de la technique

### *Items du SUS*

- Je pense que j'aimerais utiliser ce type de technique fréquemment
- Je trouve que cette technique est inutilement complexe
- J'ai trouvé que la technique était facile à utiliser
- Je pense que j'aurais besoin de l'aide d'une personne expérimentée pour utiliser cette technique
- J'ai trouvé que les différentes fonctions de la technique étaient bien intégrées
- J'ai trouvé qu'il y avait trop d'incohérences dans cette technique
- J'imagine que plusieurs personnes apprendront vite à utiliser la technique
- J'ai trouvé que la technique était peu maniable à utiliser
- Je me sens en confiance lors de l'utilisation de la technique
- J'ai eu besoin d'apprendre beaucoup de choses avant d'utiliser le système

### *Items issus du SUMI*

- Utiliser cette technique est plaisant
- Je n'aimerais pas utiliser cette technique tous les jours
- Utiliser cette technique est stimulant
- Les tâches peuvent être réalisées de façon simple avec cette technique
- La vitesse de la technique est suffisamment rapide
- Utiliser cette technique est frustrant

### *Questions plus générales pour chacune des techniques*

- D'après vous, l'utilisation (ou la manipulation) de la technique vous a-t-elle semblé cohérente au cours de la tâche ?
- La technique vous a-t-elle permis de facilement réaliser la tâche et de passer d'un type de donnée à un autre ?
- D'après vous, quelles sont les difficultés induites par la technique pour passer d'un type de donnée à autre au cours de la tâche ?
- Si après observation, la main utilisée est différente de la main dominante : demander pourquoi ?
- Quels sont les trois points les plus positifs de la technique ?
- Quels sont les trois points les plus négatifs de la technique ?

- Auriez-vous des suggestions à apporter sur cette technique (améliorations à apporter...) ?
- Avez-vous des remarques à ajouter ou des points importants à aborder qui ne l'auraient pas été lors de cet entretien ?

### B.3. Questionnaire de satisfaction globale

Le questionnaire de satisfaction globale est un questionnaire proposé à l'utilisateur à la fin de l'expérimentation. Un seul questionnaire est proposé à l'utilisateur lors de l'expérimentation. Ce questionnaire permet de recueillir les préférences des utilisateurs et de comparer les techniques testées. Il permet également de collecter des informations sur l'environnement de test dans lequel l'expérimentation a été conduite.

- Comparaison des techniques
  - Globalement, quelle technique avez-vous préféré utiliser ?
  - Quelle technique vous a permis de réaliser le plus facilement les tâches attendues ?
  - Et laquelle vous a le plus contraint ?
  - Quelle technique vous a permis de passer le plus facilement d'un type de donnée à un autre ?
  - Et laquelle vous a le plus contraint pour passer d'un type de donnée à un autre ?
  - D'après vous, quelles différences existent entre les dispositifs ?
  - Et quels sont les points communs ?
- Questions sur le système (instrumentation présentant les cibles à atteindre et avec laquelle l'utilisateur a interagi).

#### *Items sur l'instrumentation*

- Quelles sont la / les stratégie(s) que vous avez utilisée(s) pour faciliter le passage d'un type de donnée à un autre ?
- D'après vous, le passage d'un type de donnée à un autre était-il évident ?
- Au cours de la tâche, quelles sont les difficultés liées au passage d'un type de donnée à un autre ?
- Quelles sont la / les stratégie(s) que vous avez utilisée(s) pour vous orienter dans l'environnement 3D ?
- Quels sont les aspects de l'environnement 3D qui ont pu vous aider dans votre tâche ?
- Avez-vous des remarques à ajouter ou des points importants à aborder qui ne l'auraient pas été lors de cet entretien ?

## C. Tâches d'interaction de EasySensorManager

Menus	Interactions	Types de donnée	Périphériques	Actions
<b>Menu principal</b>				
<b>File</b>				
New	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Open file	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
			Clavier	CTRL + O
Search	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
			Clavier	CTRL + F
Save	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
			Clavier	CTRL + S
Save As	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Import	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Export	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Properties	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
			Clavier	ALT + Enter
Exit	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
			Clavier	CTRL + Q
<b>Edit</b>				
Undo	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
			Clavier	CTRL + Z
Redo	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
			Clavier	CTRL + Y
Cut	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
			Clavier	CTRL + X
Copy	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
			Clavier	CTRL + C
Paste	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
			Clavier	CTRL + V
Rename	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Delete	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
			Clavier	Delete
Select All	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
<b>Action</b>				
Cut	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
			Clavier	CTRL + X
Copy	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
			Clavier	CTRL + C
Paste	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
			Clavier	CTRL + V
Rename	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche

Delete	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche Delete
Select All	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Show All	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Properties	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche ALT + Enter
<b>if an object selected (in tree view or 3D view)</b>				
Show	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche S
Transparent	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche T
Hide	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche H
Isolate / Hide	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche I
Isolate / Transparent	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche Shift + I
Goto	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche G
Show All	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche Shift + S
Force High Definition	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Unforce High Definition	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
3D Label	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
<b>Management</b>				
Groups Management	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Materials Management	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
<b>Window</b>				
Switch perspective	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Show view	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Save Perspective As	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Delete Perspective	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Import Perspective	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Export Perspective	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Reset Perspective	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Preferences	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
<b>Help</b>				
About myTest- Instrumentation	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche

Help Contents	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Search	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Dynamic Help	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Key Assist	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche CTRL + Shift + L
New	Sélection	1D	Souris	Clic gauche
Undo				
Redo				
Cut	Sélection	1D	Souris	Clic gauche
Copy	Sélection	1D	Souris	Clic gauche
Paste	Sélection	1D	Souris	Clic gauche
Rename	Sélection	1D	Souris	Clic gauche
Delete	Sélection	1D	Souris	Clic gauche
Select All	Sélection	1D	Souris	Clic gauche
Hide object	Sélection	1D	Souris Clavier	Clic gauche H
Show object	Sélection	1D	Souris Clavier	Clic gauche S
Make object transparent	Sélection	1D	Souris Clavier	Clic gauche T
Isolate	Sélection	1D	Souris Clavier Clavier	Clic gauche I Shift + S
Add new link				
Link views	Sélection	1D	Souris	Clic gauche
Load Configuration	Sélection	1D	Souris	Clic gauche
Save configuration	Sélection	1D	Souris	Clic gauche
Open perspective	Sélection	1D	Souris	Clic gauche

### 3D Model Tree

#### View

	Sélection (Menu contextuel)	1D	Souris	Clic droit
	Sélection	2D	Souris	Clic gauche
	Navigation	2D	Souris	Roulette Toutes les touches...
Filtre	Texte		Clavier	

#### if an object selected

Cut	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche CTRL + X
Copy	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche CTRL + C
Paste	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche

				Clavier	CTRL + V
Rename	Sélection (menu)	1D	Souris		Clic gauche
Delete	Sélection (menu)	1D	Souris		Clic gauche
				Clavier	Delete
Select All	Sélection (menu)	1D	Souris		Clic gauche
Select all children	Sélection (menu)	1D	Souris		Clic gauche
Consistence	Sélection (menu)	1D	Souris		Clic gauche
Show	Sélection (menu)	1D	Souris		Clic gauche
				Clavier	S
Transparent	Sélection (menu)	1D	Souris		Clic gauche
				Clavier	T
Hide	Sélection (menu)	1D	Souris		Clic gauche
				Clavier	H
Isolate	Sélection (menu)	1D	Souris		Clic gauche
				Clavier	I
				Clavier	Shift + S
Show all	Sélection (menu)	1D	Souris		Clic gauche
				Clavier	Shift + S
Goto	Sélection (menu)	1D	Souris		Clic gauche
				Clavier	G
Set Reference	Sélection (menu)	1D	Souris		Clic gauche
3D Label	Sélection (menu)	1D	Souris		Clic gauche
Force High-		1D			
Definition	Sélection (menu)		Souris		Clic gauche
Unforce High-					
Definition	Sélection (menu)	1D	Souris		Clic gauche
Properties	Sélection (menu)	1D	Souris		Clic gauche
Load / Manage					
visibilities	Sélection	1D	Souris		Clic gauche
Export a(n) file	Sélection	1D	Souris		Clic gauche
Collapse	Sélection	1D	Souris		Clic gauche
Expand	Sélection	1D	Souris		Clic gauche
Sort	Sélection	1D	Souris		Clic gauche
Sort by type	Sélection	1D	Souris		Clic gauche

### Sensors / Channel Table

	Sélection	2D	Souris		Clic gauche
	Sélection	2D	Souris		Mouseover
					Toutes les
	Texte		Clavier		touches...
	Navigation	2D	Souris		Roulette
<b>if an object selected</b>					
Goto	Sélection (menu)	1D	Souris		Clic gauche
			Clavier		G



Cut	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche CTRL + X
Copy	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche CTRL + C
Paste	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche CTRL + V
Delete	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche Delete
Isolate	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche I
Show all rows	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
<b>if an object copied</b>				
Insert Copied Row	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
<b>Sensor Groups</b>				
Management	Sélection	1D	Souris	Clic gauche
<b>Sensor Materials</b>				
Management	Sélection	1D	Souris	Clic gauche
Load	Sélection	1D	Souris	Clic gauche
Save	Sélection	1D	Souris	Clic gauche
Search	Sélection	1D	Souris	Clic gauche
Position definition	Sélection	1D	Souris	Clic gauche
<b>Sensors / Channels</b>				
<b>Details</b>				
	Navigation	2D	Souris	Roulette
	Sélection (Menu contextuel)	1D	Souris	Clic droit Toutes les touches...
	Texte		Clavier	
<b>Actions</b>				
	Navigation	2D	Souris	Roulette
	Sélection (Menu contextuel)	1D	Souris	Clic droit
	Sélection	1D	Souris	Clic gauche
<b>if an object selected</b>				
Goto	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche G
<b>Hide Column</b>				
Isolate	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche I
Show all rows	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche

**Event Scheduler**

	Sélection (Menu contextuel)	1D		Souris	Clic droit
	Sélection	1D		Souris	Clic gauche
	Texte			Clavier	Toutes les touches...
	Navigation	1D		Souris	Roulette
		1D			Double Clic gauche
	Sélection			Souris	Clic gauche
<b>if an event selected</b>					
Lock	Sélection (menu)	1D		Souris	Clic gauche
Massive Event shifting		1D			
	Sélection (menu)			Souris	Clic gauche
Cut	Sélection (menu)	1D		Souris	Clic gauche
				Clavier	CTRL + X
Copy	Sélection (menu)	1D		Souris	Clic gauche
				Clavier	CTRL + C
Paste	Sélection (menu)	1D		Souris	Clic gauche
				Clavier	CTRL + V
Rename	Sélection (menu)	1D		Souris	Clic gauche
Delete	Sélection (menu)	1D		Souris	Clic gauche
				Clavier	Delete
Select All	Sélection (menu)	1D		Souris	Clic gauche
Properties	Sélection (menu)	1D		Souris	Clic gauche

### Current DAS Configuration View

	Sélection (Menu contextuel)	1D		Souris	Clic droit
	Sélection	1D		Souris	Clic gauche
	Texte			Clavier	Toutes les touches...
	Navigation	2D		Souris	Roulette
Show all	Sélection (menu)	1D		Souris	Clic gauche
				Clavier	Shift + S

### When Edit Configuration activated

Cut	Sélection (menu)	1D		Souris	Clic gauche
				Clavier	CTRL + X
Copy	Sélection (menu)	1D		Souris	Clic gauche
				Clavier	CTRL + C
Paste	Sélection (menu)	1D		Souris	Clic gauche
				Clavier	CTRL + V
Rename	Sélection (menu)	1D		Souris	Clic gauche
Delete	Sélection (menu)	1D		Souris	Clic gauche
				Clavier	Delete
Select All	Sélection (menu)	1D		Souris	Clic gauche

Properties	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Add DAS Element	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche

### Instrumentation 3D

#### View

	Navigation		Clavier	Arrow up
	Navigation		Clavier	Arrow down
	Navigation		Clavier	Arrow left
	Navigation		Clavier	Arrow right
	Navigation		Clavier	Space bar
	Navigation		Clavier	Page Up
	Navigation		Clavier	Page Down
	Navigation		Clavier	Begin
	Navigation		Clavier	End
	Navigation		Clavier	X
	Navigation		Clavier	Y
	Navigation		Clavier	Z
Vitesse différente des Arrows	Navigation		Clavier	NumPad 8
	Navigation		Clavier	NumPad 2
	Navigation		Clavier	NumPad 6
	Navigation		Clavier	NumPad 4
	Navigation (zoom)	3D	Souris	Roulette
	Navigation	3D	Souris	Clic gauche
	Navigation (zoom)	3D	Souris	Clic gauche
	Sélection		Clavier + souris	CTRL + clic gauche
	Sélection	3D	Clavier + Souris	SHIFT + clic gauche
	Sélection	3D	Souris	Clic gauche
	Sélection (menu contextuel)	1D	Souris	Clic droit
	Position		Clavier + Souris	Shift + roulette
	Manipulation / Navigation avant arrière	3D	Souris	Clic droit drag
	Manipulation / Navigation gauche/droit/haut/bas	3D	Souris	Roulette enfocée
	Rotation	3D	Souris	Clic gauche drag
	Texte		Clavier	Toutes les touches
	Load view	1D	Souris	Clic gauche
	Save view	1D	Souris	Clic gauche
	Hide all quotation objects	1D	Souris	Clic gauche
	Show all quotation objects	1D	Souris	Clic gauche
	Hide all sensor	1D	Souris	Clic gauche
	Show all sensor	1D	Souris	Clic gauche

Create one PDF	1D	Souris	Clic gauche
Create PDFs	1D	Souris	Clic gauche
SimpleStrainGaugeSensor	1D	Souris	Clic gauche
DoubleStrainGaugeSensor	1D	Souris	Clic gauche
RosetteStrainGaugeSensor	1D	Souris	Clic gauche
StripStrainGaugeSensor	1D	Souris	Clic gauche
StructuralBridgeSensor	1D	Souris	Clic gauche
PressureSensor	1D	Souris	Clic gauche
TemperatureSensor	1D	Souris	Clic gauche
DisplacementSensor	1D	Souris	Clic gauche
LoadSensor	1D	Souris	Clic gauche
Tools	1D	Souris	Clic gauche
Modify	1D	Souris	Clic gauche
Delete by picking	1D	Souris Clavier	Clic gauche CTRL + D
Load view point	1D	Souris	Clic gauche
Export view point	1D	Souris	Clic gauche
Camera mode	1D	Souris	Clic gauche

**Cutplanes**

Sélection (Menu contextuel)	1D	Souris	Clic droit
Sélection	3D	Souris	Clic gauche Clic gauche
Manipulation	3D	Souris	enfoncé
Navigation	3D	Souris	Roulette

**if an object selected**

Cut	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche CTRL + X
Copy	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche CTRL + C
Paste	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche CTRL + V
Rename	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Delete	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche Delete
Select All	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Select all children	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Consistence	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Show	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche S
Transparent	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche T
Hide	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche H

Isolate	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche I
Show all	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche Shift + S
Goto	Sélection (menu)	1D	Souris Clavier	Clic gauche G
Set Reference	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
3D Label	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Force High- Definition	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Unforce High- Definition	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche
Properties	Sélection (menu)	1D	Souris	Clic gauche

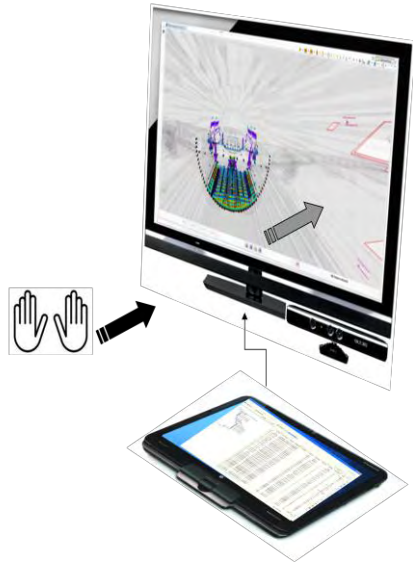

### Synoptics (encore en conception)

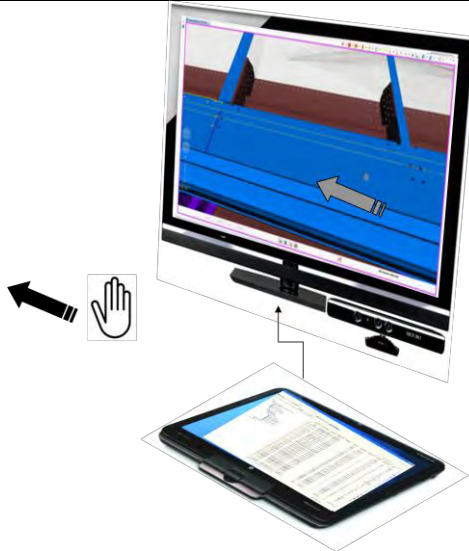
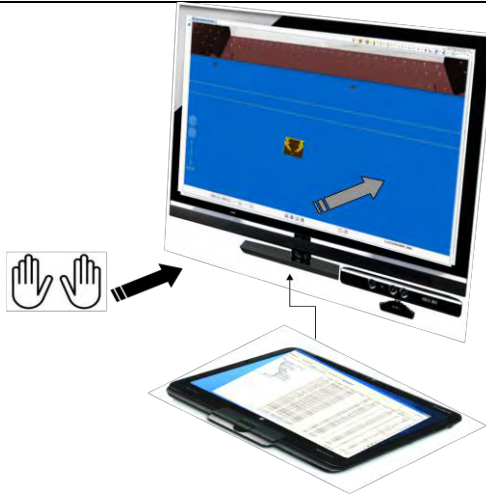

Rotation	2D	Souris	Clic gauche enfoncé
Navigation (zoom)	2D	Souris	Roulette Clic gauche
Manipulation Navigation	2D	Souris Clavier	enfoncé Barre espace
Sélection (Menu contextuel) - envisagé	2D	Souris	Clic droit

## D. Spécifications détaillées du prototype léger

### D.1. Story-Board de la mise en œuvre de la solution

#### D.1.1. Description du cas d'utilisation « PlacerCapteur »

<p>1. Dans la vue 3D, le sensor requestor utilise le tracking pour naviguer dans la maquette numérique de façon à atteindre la part de l'avion sur laquelle il doit poser un capteur.</p>	
<p>2. Il sélectionne ensuite l'icône du capteur à poser, située sur la partie tactile.</p>	

<p>3. Il le positionne à peu près dans la vue 3D,</p>	
<p>4. Et réalise un zoom dans la vue 3D, en utilisant le système de tracking.</p>	
<p>5. Le sensor requestor sélectionne le capteur dans la vue 3D,</p>	

6. Puis il sélectionne l'icône de modification du capteur sur la partie tactile.


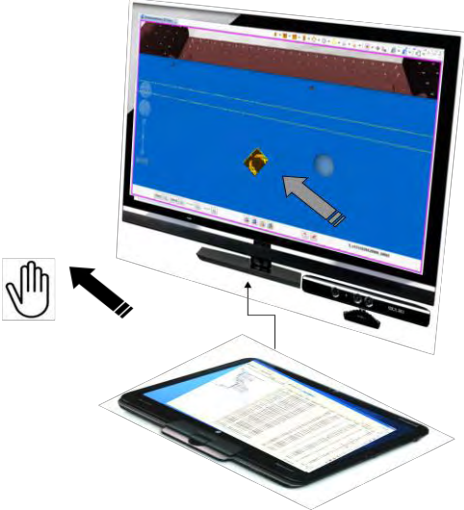



7. Enfin, il modifie l'orientation du capteur, à l'aide du système de tracking.





### D.1.2. Description du cas d'utilisation « AjouterCommentPoint »

<p>1. Dans la partie tactile, le sensor requestor sélectionne l'icône pour créer un « comment point ».</p>	
<p>2. Puis il le place sur la « part » en utilisant le système de tracking.</p>	
<p>3. Depuis la partie tactile, il se déplace dans la vue arbre pour sélectionner la « part ».</p>	

4. Puis il renomme le comment point à partir du menu « Propriétés ».



5. L'utilisateur choisit le mode « modify » depuis la partie tactile.



6. Puis il sélectionne le label du comment point (double clic souris) dans la vue 3D.





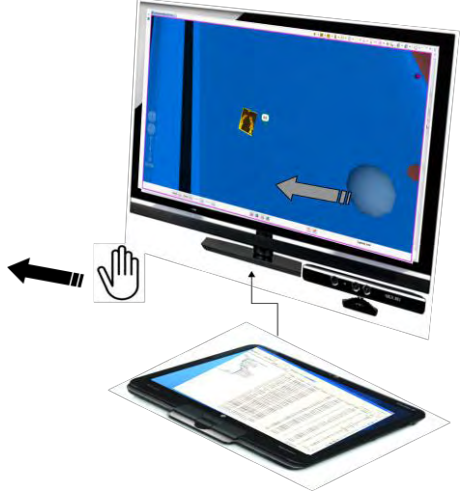
7. Il inscrit la nouvelle orientation dans le comment point depuis le clavier tactile.


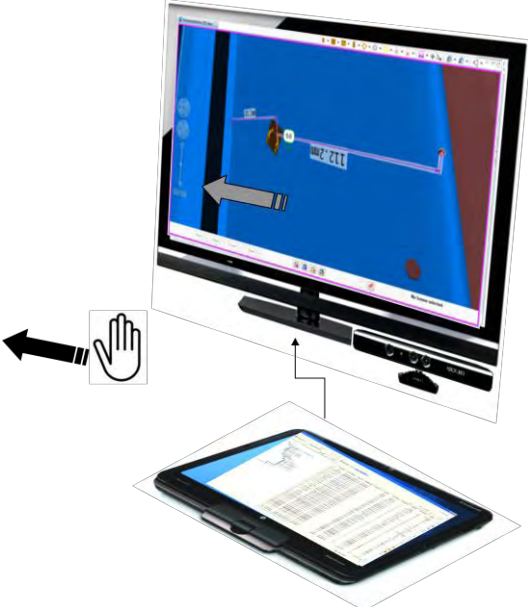
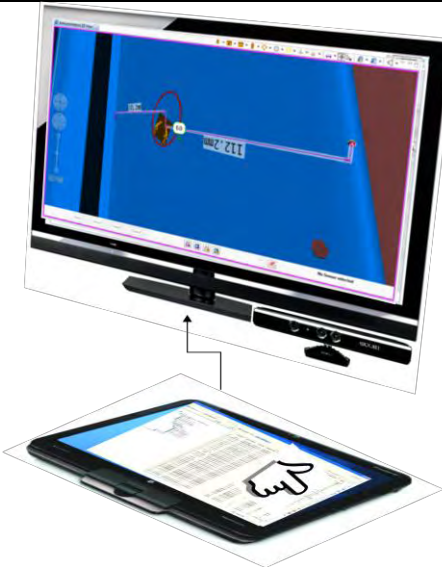


8. Ensuite, il renomme le capteur dans la vue table.



### D.1.3. Description du cas d'utilisation « PlacerMeasureTools »

<p>1. Le sensor requestor navigue dans la vue 3D pour se positionner correctement avec le système de tracking.</p>	
<p>2. Il sélectionne ensuite l'icône des mesure points dans la partie tactile.</p>	
<p>3. Puis il en place deux sur la « part » dans la vue 3D en utilisant le système de tracking.</p>	

<p>4. Il sélectionne ensuite des mesure lines depuis la partie tactile.</p>	 A diagram showing a computer monitor displaying a 3D model of a mechanical part. Below the monitor is a tablet. A hand icon is shown touching the tablet, with a line connecting it to the monitor. The 3D model on the monitor has a yellow square and a blue circle on its surface.
<p>5. Il lie alors le capteur et les mesure points avec les mesure lines dans la vue 3D.</p>	 A diagram showing the same setup as in step 4. The 3D model on the monitor now has a red line connecting a point on the part to a measurement line. A hand icon is shown touching the tablet, with an arrow pointing to the 3D view on the monitor.
<p>6. Ensuite, il sélectionne l'option de déplacement du capteur dans la partie tactile.</p>	 A diagram showing the same setup. The 3D model on the monitor now has a red circle around the sensor point. A hand icon is shown touching the tablet, with a line connecting it to the monitor.

7. Puis il sélectionne le capteur dans la vue 3D.



8. Pour ensuite le déplacer en fonction des indications des mesure points (peut-être déplacement sur x et y).



## D.2.Exigences fonctionnelles

Les exigences fonctionnelles caractérisant le système sont :

ID	Nom	Description
DS-EF-100	Sélection des données	La technique d'interaction doit permettre de sélectionner des éléments de types de données différents
DS-EF-200	Manipulation des données	La technique d'interaction doit permettre d'interagir et de manipuler des éléments de types de données différents (déplacement et orientation)
DS-EF-300	Navigation	La technique d'interaction doit permettre de naviguer dans des éléments de types de données différents
DS-EF-400	Séquence	La technique d'interaction doit permettre de passer facilement d'un type d'un élément d'un type de donnée à un élément d'un autre type de donnée
DS-EF-500	Validation de l'action	La technique d'interaction doit permettre à l'utilisateur de valider son action
DS-EF-600	Type de données	La technique doit interagir au moins avec de la 2D et de la 3D



### D.3. Exigences non-fonctionnelles

Le système doit répondre aux buts suivants :

ID	Nom	Description
DS-B-100	Evolutivité de l'interaction	L'ajout de nouvelles interactions ou techniques d'interaction doit être simple
DS-B-200	Adaptabilité de l'interaction au système	La technique d'interaction doit pouvoir s'adapter à différentes configurations (OS,...) et au contexte
DS-B-300	Adaptabilité de l'interaction à l'humain	La technique d'interaction doit pouvoir être utilisée par un grand nombre d'utilisateurs grâce à des interactions utilisables et acceptables
DS-B-400	Robustesse de la technique d'interaction	La technique d'interaction doit avoir une durée de vie suffisante
DS-B-500	Apprentissage simple	La technique d'interaction à temps d'adaptation et de prise en main limité/raisonnable
DS-B-600	Confort de l'interaction	La technique d'interaction doit favoriser le confort des utilisateurs lors de l'utilisation quotidienne de façon à éviter la fatigue

Nous pouvons inférer des buts décrits précédemment les exigences non fonctionnelles suivantes, qui définissent les propriétés du système :

ID	Nom	Description	ID source
DS-ENF-100	Ajout de nouvelles techniques d'interaction	Le système doit permettre d'ajouter une nouvelle technique en ne modifiant que très peu le code	DS-B-100
DS-ENF-200	Adaptabilité de l'interaction au système	S'adapter à différentes configurations (OS,...) et au contexte	DS-B-200
DS-ENF-300.1	Interactions utilisables - efficacité	Les interactions doivent permettre aux utilisateurs de réaliser la tâche en un minimum de temps	DS-B-300
DS-ENF-300.2	Interactions utilisables - efficacité	Les interactions doivent permettre aux utilisateurs de réaliser la tâche avec précision (réussir leur but sans erreur)	DS-B-300
DS-ENF-300.3.1	Interactions utilisables -	Les utilisateurs doivent être satisfaits lors des interactions au cours de la tâche	DS-B-300



	satisfaction		
DS-ENF-300.3.2	Interactions utilisables - satisfaction	Les utilisateurs doivent ressentir un certain confort lors des interactions avec le système	DS-B-300
DS-ENF-300.4.1	Interactions acceptables - fiabilité	La technique d'interaction doit guider les utilisateurs dans leurs interactions avec le système	DS-B-300
DS-ENF-300.4.2	Interactions acceptables – adéquation aux routines	La technique d'interaction doit permettre aux utilisateurs de réaliser la tâche sans perturber leur process de travail	DS-B-300
DS-ENF-400.1	Durée de vie de la technique	La technique d'interaction doit pouvoir être utilisée au minimum pendant 3 ans sans avoir à changer la technologie	DS-B-400
DS-ENF-400.2	Robustesse de la technique d'interaction	La technique d'interaction doit pouvoir fonctionner pendant au moins 10h sans connaître un bug ou un dysfonctionnement	DS-B-400
DS-ENF-500.1	Apprentissage de la technique d'interaction	Les utilisateurs doivent pouvoir utiliser la technique de façon efficace au bout de 15 min de prise en main	DS-B-500
DS-ENF-500.2	Simplicité de l'interaction	La technique d'interaction doit proposer des contacteurs/contrôles compréhensibles en 5 min d'utilisation	DS-B-500
DS-ENF-600	Confort de l'interaction	La technique d'interaction doit être utilisée au moins 6h d'affilée sans engendrer de fatigue ou de douleurs à l'utilisateur	DS-B-600

Notes :

DS-ENF-100 : Une architecture modulaire permettra de répondre à l'exigence d'évolutivité.

DS-ENF-300.4.1 : le guidage des utilisateurs doit être réalisé par le biais de messages d'incitation ou des feedbacks pour les différentes actions des utilisateurs



## Bibliographie

- Ajaj, R., Jacquemin, C., & Vernier, F. (2009). RVDT: A design space for multiple input devices, multiple views and multiple display surfaces combination. *ICMI-MLMI'09*, (pp. 269-276).
- Allen, J. (1983, November). Maintaining knowledge about temporal intervals. *Commun. ACM*, 26(11), 932-843.
- Bach, C., & Scapin, D. (2003). Ergonomic criteria adapted to human virtual environment interaction. *IHM'03*, (pp. 24-31).
- Bach, C., & Scapin, D. (2004). Obstacles and perspectives for evaluating mixed reality systems usability. *Workshop MIXER "Exploring the design and engineering of MR system", IUI-CADUI 2004*.
- Bach, C., & Scapin, D. (2005). *Critères ergonomiques pour les interactions homme-Environnements Virtuels: définitions, justifications et exemples*. Rocquencourt: INRIA.
- Balakrishnan, R., Baudel, T., Kurtenbach, G., & Fitzmaurice, G. (1997). The Rockin'Mouse: integral 3D manipulation on a plane. *CHI'97*, (pp. 311-318).
- Bangor, A., Kortum, P.-T., & Miller, J.-T. (2008). An empirical evaluation of the System Usability Scale. *Journal of human-computer interaction*, 574-594.
- Beaudouin-Lafon, M. (2000). Instrumental interaction: an interaction model for designing post-WIMP user interfaces. *CHI'00*, (pp. 446-453).
- Bérard, F., Ip, J., Benovoy, M., El-Shimy, D., Blum, J., & Cooperstock, J. (2009). Did "Minority report" get it wrong? Superiority of the mouse over 3D input in a 3D placement task. *INTERACT'09*.
- Bortolaso, C., Bach, C., & Dubois, E. (2011). MACS: A combination of a formal mixed interaction model with an informal creative session. *EICS'11*, (pp. 63-72).
- Bowman, D. (1999). *Interaction techniques for common tasks in immersive Virtual Environments: Design, evaluation, and application*. Thèse de doctorat.
- Bowman, D., & Hodges, L. (1999, February). Formalizing the design, evaluation, and application of interaction techniques for immersive Virtual Environments. *The Journal of Visual Languages and Computing*, 10(1), 37-53.

- Bowman, D., Gabbard, J., & Hix, D. (2002). A survey of usability evaluation in Virtual Environments: Classification and comparison of methods. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11(4), 404-424.
- Brooke, J. (2006). SUS: a "quick and dirty" usability scale. *Usability Evaluation in Industry*.
- Casallas, J., Oliver, J., Kelly, J., Merienne, F., & Garbaya, S. (2013). Towards a model for predicting intention in 3D moving-target selection tasks. *EPCE'13*, (pp. 13-22).
- Charfi, S., Scapin, D., & Dubois, E. (2008). Identification et prise en compte de propriétés ergonomiques pour la modélisation et la conception de SIM. *IHM'08*, (pp. 55-62).
- Dünser, A., Grasset, R., & Billinghamurst, M. (2008). A survey of evaluation techniques used in augmented reality studies. *ACM SIGGRAPH'08*, (pp. 1-27).
- Fitts, P. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of experimental psychology*, 383-391.
- Frees, S. (2010). Context-driven interaction in immersive virtual environments. *Virtual Real*, 14(4), 277-290.
- Froehlich, B., & Plate, J. (2000). The cubic Mouse: a new device for three-dimensional input. *CHI'00*, (pp. 526-531).
- Froehlich, B., Hochstrate, J., Skuk, V., & Huckauf, A. (2006). The GlobeFish and the GlobeMouse: two new six degree of freedom input devices for graphics applications. *CHI'06*, (pp. 191-199).
- Gabbard, J. (2001). *Researching usability design and evaluation guidelines for Augmented Reality systems*. Récupéré sur [http://www.sv.vt.edu/classes/ESM4714/Student\\_Proj/class00/gabbard/index.html](http://www.sv.vt.edu/classes/ESM4714/Student_Proj/class00/gabbard/index.html)
- Gabbard, J., Hix, D., & Swan, E. (1999). User centered design and evaluation of Virtual Environments. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19(6), 51-59.
- Gallo, L., De Pietro, G., & Marra, I. (2008). 3D interaction with volumetric medical data: experiencing the Wiimote. *Ambi-Sys'08*.
- Grossman, T., & Balakrishnan, R. (2004). Pointing at trivariate targets in 3D environments. *CHI'04*, (pp. 447-454).
- Guiard, Y. (1987). Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action: The action kinematic chain as a model. *The Journal of Motor Behavior*, 486-517.
- Ha, T., & Woo, W. (2010). An empirical evaluation of virtual hand techniques for 3D object manipulation in a tangible augmented reality environment. *3DUI'10*, (pp. 91-98).

- Hancock, M., Hilliges, O., Collins, C., Baur, D., & Carpendale, S. (2009). Exploring tangible and direct touch interfaces for manipulating 2D and 3D information on a digital table. *OTS'09*.
- Hartson, H., & Gray, P. (1992, March). Temporal aspects of tasks in the user action notation. *Hum.-Comput. Interact.*, 7(1), 1-45.
- Hauptman, A. (1989). Speech and gestures for graphic image manipulation. *CHI'89*, (pp. 241-245).
- Hix, D., & Hartson, H. (1993). *Developing user interfaces: Ensuring usability through product & process*.
- Hubona, G., Wheeler, P., Shirah, G., & Brandt, M. (1999). The relative contributions of stereo, lighting, and background scenes in promoting 3D depth visualization. *CHI'99*, (pp. 214-242).
- Ishii, H., & Ullmer, B. (1997). Tangible Bits: Towards seamless interfaces between people. *CHI'97*, (pp. 234-241).
- Kaiser, P. (2011). *The Joy of Visual Perception: A Web Book*. York University.
- Kalawski, R. (1999). VRUSE: A computerised diagnostic tool for usability evaluation of virtual/synthetic environment systems. *Applied ergonomics*, 30(1), 11-25.
- Karnik, A., Grossman, T., & Subramanian, S. (2013). Comparison of user performance in mixed 2D-3D multi-display environments. *INTERACT'13*, (pp. 260-277).
- Knoedel, S., & Hachet, M. (2011). Multi-touch RST in 2D and 3D spaces: Studying the impact of directness on user performance. *3DUI*.
- Kontio, J., Lethola, L., Bragge, J., & Box, P. (2004). Using the focus group method in software engineering: Obtaining practitioner and user experiences. *International Symposium on empirical software engineering*, (pp. 271-280).
- Kouroupetroglou, G., Pino, A., Blampakakis, A., Chalastanis, D., Golematis, V., Ioannou, N., & Koutsoumpas, I. (2011). Performance evaluation of gesture-based 2D and 3D pointing tasks. *9th International Gesture workshop*.
- Loeffler, C., & Anderson, T. (1994). *The Virtual Reality Casebook*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- MacArthur, V., Castellucci, S., & MacKenzie, I. (2009). An empirical comparison of "wiimote" gun attachments for pointing tasks. *EICS'09*, (pp. 203-208).
- Mackay, W. (1998). Augmented Reality: Linking real and virtual worlds - A new paradigm for interacting with computers. *ACM Conference on Advanced Visual Interfaces*.

- MacKenzie, I. (1992). Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, 7, 91-139.
- MacKenzie, I. (1992). Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, 7, 91-139.
- MacKenzie, I., & Buxton, W. (1992). Extending Fitts' law to two-dimensional tasks. *CHI'92*, (pp. 219-226).
- MacKenzie, I., Kauppinen, T., & Silfverberg, M. (2001). Accuracy measures for evaluating computer pointing devices. *CHI'01*, (pp. 9-16).
- Masliah, M. (1999). Récupéré sur <http://etclab.mie.utoronto.ca/people/moman/timeandspace/timeandspace.html>
- Masliah, M. (2001). *Measuring the allocation of control in 6 degree of freedom human-computer interaction tasks*. Thèse de doctorat, Université de Toronto.
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transaction on information Systems, Vol E77-D(12)*, 1321-1329.
- Natapov, D., Castellucci, S., & MacKenzie, I. (2009). ISO 9241-9 evaluation of video game controllers. *GI'09*, (pp. 223-230).
- Nielsen, J., & Marck, R. (1994). Executive summary. *Usability inspection methods*, 1-23.
- North, C., & Shneiderman, B. (1997). *A taxonomy of multiple window coordinations*. University of Maryland: Technical Report CS-TR-3854.
- Ortega, M. (2013). Hook: Heuristics for selecting 3D moving objects in dense target environments. *3DUI'13*, (pp. 119-122).
- Ortega, M., & Nigay, L. (2009). AirMouse: Finger Gesture for 2D and 3D interaction. *INTERACT'09*, (pp. 214-227).
- Pan, Q. (2008). *Techniques d'interactions mixtes isotonique et élastique pour la sélection 2D et la navigation / manipulation 3D*. Thèse de doctorat, Université de Lille.
- Pino, A., Tzemis, E., Ioannou, N., & Kouroupetroglou, G. (2013). Using Kinect for 2D and 3D pointing tasks: performance evaluation. *HCI'13*, (pp. 358-367).
- Polson, P., Lewis, C., Rieman, J., & Wharton, C. (1992). Cognitive walkthroughs: A method for theory-based evaluation of user interfaces. *International journal of man-machine studies*, 741-773.

- Price, S., Sheridan, J., Falcao, T., & al. (2008). Towards a framework for investigating tangible environments for learning. *International Journal of Arts and Technology: Special Issue on Tangible and Embedded Computing*, 351-368.
- Raynal, M., Gauffre, G., Bach, C., Schmitt, B., & Dubois, E. (2010). Tactile camera vs. tangible camera: taking advantage of small physical artefacts to navigate into large data collection. *NordiCHI'10*, (pp. 373-382).
- Roberts, J. (2007). State of the art: Coordinated multiple views in exploratory visualization. *Coordinated and Multiple Views in Exploratory Visualization* (pp. 61-71). IEEE Computer Society.
- Scapin, D., Law, E., & Bevan, N. (2008). *Fract final report MAUSE COST 294 WG 1: Critical review and analysis of individual UEMs*. COST-294 Project MAUSE.
- Scriven, M. (1967). The methodology of evaluation. *Perspectives of curriculum evaluation*, 39-83.
- Shneiderman, B. (1996). The Eyes Have It: A task by data type taxonomy for information visualizations. *IEEE Symposium on Visual Languages*, (pp. 336-).
- Soukoreff, R., & MacKenzie, I. (2004, December). Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research in HCI. *Int. J. Hum. - Comput. Stud.*, 61(6), 751-789.
- Sutcliffe, A., & Gault, B. (2004). The ISRE method for analyzing system requirements with virtual prototypes. *Systems engineering*, 7(2), 123-143.
- Sutcliffe, A., & Kaur, K. (2000). Evaluating the usability of virtual reality user interfaces. *Behaviour and Information Technology*, 19(6), 415-426.
- Teather, R., & Stuerzlinger, W. (2011). Pointing at 3D targets in a stereo head-tracked virtual environment. *3DUI'11*.
- Teather, R., Pavlovych, A., Stuerzlinger, W., & MacKenzie, I. (2009). Effects of tracking technology, latency and spatial jitter on object movement. *3DUI'09*, (pp. 43-50).
- Tromp, J., Steed, A., & Wilson, J. (2003). Systematic usability evaluation and design issues for collaborative Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 241-267.
- Wang Baldonado, M., Woodruff, A., & Kuchinsky, A. (2000). Guidelines for using multiple views in information visualization. *Working conference on Advanced Visual Interfaces* (pp. 110-119). New York: ACM.

- Ware, C., & Balakrishnan, R. (1994). Reaching for objects in VR displays: Lag and frame rate. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 1(4), 331-356.
- Ware, C., & Lowther, K. (1997). Selection using a one-eyed cursor in a fish tank VR environment. *ACM trans. Comput.-Hum. Interact*, 309-322.
- Wellner, P., Mackay, W., & Gold, R. (1993). Computer Augmented Environments: Back to the Real World. *Special issue of communications of the ACM*, 36(7), 24-26.
- Wickens, C., & Baker, P. (1995). Cognitive issues in Virtual Reality. *Virtual Environments and Advanced Interface Design*, 13, 516-541.
- Wilson, C. (2006). Brainstorming pitfalls and best practices. *Interactions*, 13(5), 50-63.
- Zhai, S. (1993). Investigation of feel for 6 DOF inputs: isometric and elastic rate control for manipulation in 3D environments. *The Human Factors and Ergonomics Society 37th Annual Meeting*.
- Zhai, S. (1998). User performance in relation to 3D input device design. *SIGGRAPH Comput. Graph*, 32(4), 50-54.
- Zhai, S., & Milgram, P. (1998). Quantifying coordination in multiple DOF movement and its application to evaluating 6DOF input devices. *CHI'98*, (pp. 320-327).
- Zhai, S., Accot, J., & Woltjer, R. (2004). Human actions laws in electronic virtual worlds: an empirical study of path steering performance in VR. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13(2), 113-127.
- Zhai, S., Buxton, W., & Milgram, P. (1994). The "Silk cursor": Investigating transparency for 3D target acquisition. *CHI'94*, (pp. 459-465).
- Zhang, X., & MacKenzie, I. (2007). Evaluating eye tracking with ISO 9241-part9. *HCI'07*, (pp. 779-788).





Bénédicte Schmitt

Conception de techniques d'interaction mixtes dédiées aux Environnements Virtuels hétérogènes : Approche centrée sur les usages et guidée par des modèles

Design of mixed interaction techniques dedicated to heterogeneous Virtual Environments: Approach based on usages and guided by models

Directeur de thèse : Emmanuel Dubois  
Co-encadrants : Mathieu Raynal, Cédric Bach

Thèse soutenue le 13 juin 2014 à l'IRIT, Université Paul Sabatier

---

### Résumé

Les environnements 3D sont de plus en plus présents dans notre quotidien (jeux, situations culturelles ou applications professionnelles). En parallèle, de nouvelles techniques d'interaction émergent sans cesse dans le but de faciliter l'interaction de l'utilisateur avec les systèmes. Des évaluations sont généralement mises en place afin de tester la mise en œuvre d'une technique d'interaction dans un environnement type pour des tâches élémentaires (e.g. sélection ou navigation) et déterminer son adéquation en termes de performance et de satisfaction. Nos travaux visent à proposer une méthode d'évaluation en environnement virtuel 3D qui s'appuie sur une adaptation de la norme ISO 9241-9. Pour répondre à des problématiques portées par les systèmes à multi-vues liées, nous avons également adapté la norme ISO 9241-9 à un environnement hétérogène mêlant 2D et 3D.

3D environments are increasingly present in our life (games, cultural situation, or professional applications). At the same time, new interaction techniques continuously appear to improve the user interaction with systems. Evaluations are usually proposed to assess the implementation of an interaction technique in a specific type of environment for elementary tasks (e.g. selection or navigation) to determine the consistency of the technique in terms of performance and satisfaction. Our works aim at defining an evaluation method in 3D environment that is based on the standard ISO 9241-9. To answer to issues of linked multi-views systems, we adapt the standard ISO 9241-9 to a heterogeneous environment that mixes 2D and 3D.

### Mots clés

Interaction Homme-Machine, Méthodes d'évaluation, loi de Fitts, techniques d'interaction avancées, environnement 3D, environnement hétérogène

Human-Machine Interaction, Evaluation methods, Fitts law, advanced interaction techniques, 3D environment, heterogeneous environment

---

Domaine : Informatique – Interactions Homme-Machine

Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT) – UMR 5505  
Université Paul Sabatier, 118 route de Narbonne, 31 062 Toulouse Cedex 4, France