



**HAL**  
open science

# Étalonnage statique d'un capteur électromagnétique de position et choix d'une méthode de correction : application aux expérimentations relatives au son 3D

David Sarafian

► **To cite this version:**

David Sarafian. Étalonnage statique d'un capteur électromagnétique de position et choix d'une méthode de correction : application aux expérimentations relatives au son 3D. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2013. dumas-01157544

**HAL Id: dumas-01157544**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01157544>**

Submitted on 28 May 2015

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

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

# CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

Centre d'enseignement de Paris

---

**Mémoire**

**présenté en vue d'obtenir**

**le Diplôme d'ingénieur C.N.A.M.**

**Spécialité : Mesure analyse qualité**

**Option : Instrumentation qualité**

**par**

**SARAFIAN David**

---

**Etalonnage statique d'un capteur électromagnétique de position  
et choix d'une méthode de correction : application aux  
expérimentations relatives au son 3D.**

Soutenu le 25 septembre 2013  
Au C.N.A.M. Landy

---

## JURY

Président :

Monsieur Patrick Juncar (C.N.A.M.)

Membres :

Monsieur Guillaume Andéol (IRBA)

Monsieur Stephan Briaudeau (C.N.A.M.)

Monsieur Lionel Pellieux (IRBA)

Monsieur Mark Plimmer (C.N.A.M.)

---

## Remerciements

Je tiens en premier à remercier la direction de l'Institut de Recherche Biomédicale des Armées (IRBA) ainsi que la Délégation Générale pour l'Armement (DGA) qui m'ont offert l'opportunité de participer au programme d'étude amont « PERTIA » au sein duquel j'ai réalisé ce mémoire. Je remercie aussi les chefs successifs du département Action et Cognition en Situation Opérationnelle (ACSO) de l'IRBA, qui m'ont autorisé à réaliser et à poursuivre ce mémoire.

Je remercie particulièrement Monsieur Lionel Pellieux, qui a accepté d'être mon tuteur scientifique pour ce mémoire et qui m'a apporté son soutien indéfectible.

Je remercie Monsieur Guillaume Andéol pour son aide dans le domaine des analyses statistiques.

Je remercie mon tuteur pédagogique, Monsieur Patrick Juncar qui m'a encouragé pour achever mon cursus d'ingénieur au C.N.A.M. et en même temps je remercie l'ensemble des enseignants rencontrés en cours du soir qui m'ont tant appris.

Je remercie Monsieur Mark Plimmer pour ses remarques constructives lors de la lecture de ce mémoire et pour ses conseils pertinents pour la préparation à la soutenance.

Je remercie Monsieur Francis Boutet, mécanicien de haute précision, et Monsieur Cyril Basch, menuisier d'équipements de recherche sans qui certaines pièces n'auraient pu être fabriquées.

J'adresse un remerciement sincère à l'équipe audition de l'IRBA et notamment à Monsieur Claude Blancard, technicien supérieur, qui m'a aidé dans l'installation des équipements.

Je remercie Monsieur Bruno Gourby, fidèle photographe qui a assuré la traçabilité iconographique de l'avancement de cette étude.

Je remercie Monsieur Joël Baudou, ingénieur chez Thalès Avionics et partenaire industriel, qui m'a permis en particulier d'assister à qualification du traqueur d'un casque de vol d'hélicoptère de combat.

Pour terminer, un grand merci à toute ma famille pour tous les encouragements et les espoirs qu'elle a placés en moi.

Enfin, je dédie ce mémoire à mes chers parents, à ma femme Nadine et à mon fils Grégory.



---

## Liste des abréviations

**ACSO** : Action et Cognition en Situation Opérationnelle

**ANOVA** : ANalysis Of Variance

**CERMA** : Centre d'Etudes et de Recherches en Médecine Aérospatiale

**C.N.A.M.** : Conservatoire National des Arts et Métiers

**ddl** : degré de liberté (DoF : Degree of Freedom)

**DGA** : Délégation Générale pour l'Armement

**FoB** : Flock of Birds (nom d'un modèle de traqueur)

**GPS** : Global Positioning System

**HMSD** : Helmet Mounted Sight & Display (casque de vol avec vision à réalité augmentée)

**HSD** : Honestly Significant Difference

**HUD** : Head Up Display (Visualisation tête haute)

**IMASSA** : Institut de Médecine Aérospatiale du Service de Santé des Armées

**IRBA** : Institut de Recherche Biomédicale des Armées

**LED** : Light-Emitting Diode (diode électroluminescente DEL)

**LUT** : Look Up Table (table de correspondance)

**PEA** : Programme d'Etude Amont

**PERTIA** : Personnalisation Transducteurs Intra Auriculaires

**RIF** : filtre numérique à réponse Impulsionnelle Finie (FIR in English)

**SI** : Système International d'unités

**Son3D** ou **son 3D**: Présentation spatialisée d'informations sonores et restituée sous casque

**2D** : en deux dimensions

**3D** : en trois dimensions

---

## Glossaire

Angles d'orientation et de rotation : les angles de tangage, de lacet et de roulis respectivement ( $\Psi$ ;  $\Theta$ ;  $\Phi$ ) sont illustrés par la Figure 1, à noter que les axes  $x$  et  $y$  sont parfois intervertis.

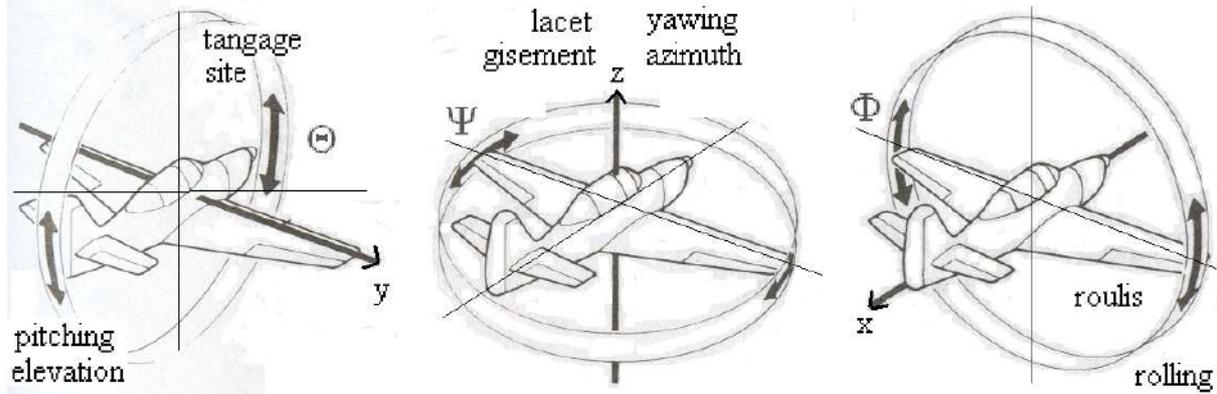


Figure 1 : Appellations françaises et anglaises rencontrées dans la littérature pour les angles d'orientation

Capteur de position : élément du traqueur déterminant la localisation ou l'orientation ou les deux, basé sur un principe physique. Dans ce dernier cas on parle de capteur de position.

CAVE : le CAVE est une pièce de 3 m de coté où une personne peut évoluer dans un monde de réalité virtuelle. Le traqueur utilisé est généralement de type électromagnétique.

f de classe  $C^1$  : une application  $f$  d'un ouvert de  $O$  de  $\mathbb{R}^n$  dans  $\mathbb{R}$  continûment différentiable est dénommée de classe  $C^1$ .

GELP : Gold Eye Localisation Pointing, méthode de recueil expérimental qui permet au participant de désigner la localisation d'un stimulus perçu dans son espace proche.

Orientateur : dispositif permettant d'orienter selon les angles ( $\Psi$ ;  $\Theta$ ;  $\Phi$ ) illustrés en Figure 1, un objet dans les trois axes. Ce dispositif est aussi appelé positionneur angulaire.

Position : manière dont une chose est posée, placée, située, lieu où elle est placée (disposition, emplacement). [Petit Robert 1999]. La position comporte la notion de localisation (coordonnées  $x, y, z$ ) et/ou d'orientation (angles d'orientation).

RS 232 : bus de communication conforme à la norme EIA RS-232 (port série d'un ordinateur ou d'une interface)

Traqueur : système de poursuite ou de suivi de position d'un objet ou d'un point dans l'espace d'un laboratoire.

---

# Table des matières

Remerciements .....	2
Liste des abréviations .....	3
Glossaire.....	4
Table des matières .....	5
Introduction .....	8
Présentation du contexte de travail : .....	12
Historique .....	15
1. Etude bibliographique .....	20
1.1. Les traqueurs de position.....	20
1.1.1. Introduction .....	20
1.1.2. Périmètre de la revue.....	21
1.1.3. Principe de localisation .....	21
1.1.4. Les différents types de traqueurs de position.....	22
1.1.4.1. Traqueur mécanique.....	22
Principe.....	22
Technique.....	22
Avantages et contraintes.....	23
Produits existants.....	23
1.1.4.2. Traqueur électromagnétique.....	24
Principe.....	24
Techniques .....	24
Avantages et contraintes.....	25
Produits existants.....	26
1.1.4.3. Traqueur acoustique .....	28
Principes : .....	28
Techniques : .....	29
Avantages et contraintes : .....	29
Produits existants : .....	30
1.1.4.4. Traqueurs optiques .....	30
Principes : .....	31
Techniques : .....	31
Avantages et contraintes : .....	34
Produits existants : .....	35
1.1.4.5. Capteurs inertiels.....	36
Principes : .....	36
Accéléromètres : .....	36
Gyroscope et Gyromètre : .....	37
1.1.4.6. Capteurs à champ naturel (gravitationnel ou magnétique).....	39
Principe : .....	39
L'inclinomètre : .....	39
Le compas : .....	39
1.1.4.7. Traqueurs hybrides.....	40
1.1.4.8. Spécificités de traqueur dédié au Son3D.....	43

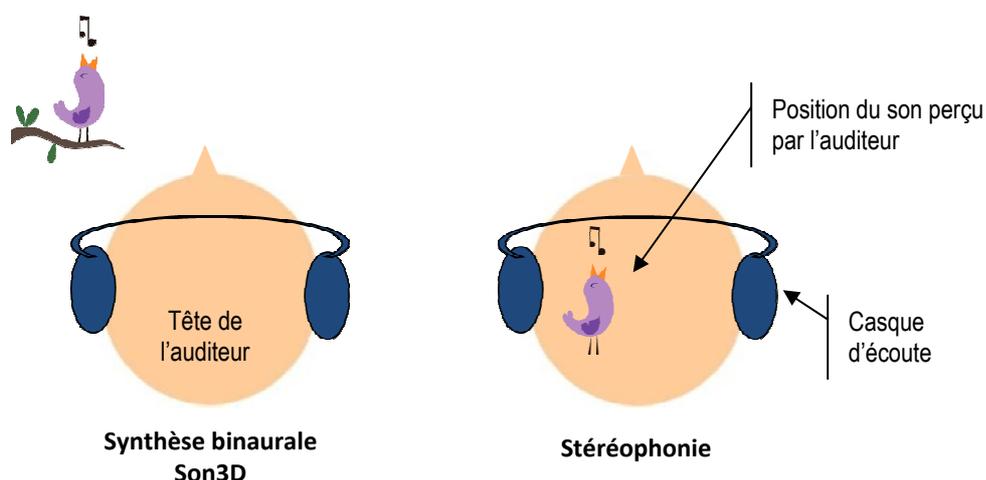
1.1.5.	Comparatif entre les différents traqueurs .....	44
1.2.	Étalonnage des traqueurs de position en laboratoire .....	46
1.2.1.	Principe de l'étalonnage .....	46
1.2.2.	Spécificités des erreurs .....	48
1.2.3.	Facteurs d'erreur électromagnétiques .....	50
1.2.4.	Les méthodes de correction d'erreur de position .....	53
1.2.4.1.	Les méthodes de correction d'erreur de localisation.....	53
	Interpolation tri-linéaire .....	53
	Fonction forme .....	55
	Autres schémas d'interpolation locale .....	56
	Forme polynomiale de degré élevé .....	58
	La méthode multi-quadrique d'Hardy.....	59
	Méthode basée sur le réseau neuronal.....	61
1.2.4.2.	Méthode de correction d'erreur de l'orientation .....	61
	Interpolation locale.....	62
	Polynôme de degré élevé.....	63
	La méthode multi-quadrique d'Hardy.....	64
1.2.5.	Techniques et moyens d'acquisition de données d'étalonnage.....	64
1.2.6.	Applications logicielles .....	70
1.2.7.	Synthèse sur l'étude de l'étalonnage de traqueurs .....	71
2.	Etalonnage.....	72
2.1.	Dispositif à étalonner et caractéristiques de l'étude .....	72
2.1.1.	Choix du traqueur .....	72
2.1.2.	Périmètre et originalité de l'étude .....	73
2.2.	Méthode par comparaison directe .....	74
2.3.	Moyens .....	74
2.3.1.	Dispositif d'étalonnage statique .....	75
2.3.1.1.	Table d'étalonnage et colonnes .....	76
2.3.1.2.	Pentes fixes.....	77
2.3.1.3.	Positionneur angulaire : « Orientateur » .....	78
2.3.1.4.	Support et conditions de mesure .....	78
2.3.2.	Réflexion sur l'étalonnage en dynamique .....	79
2.4.	Résultats.....	80
2.4.1.	Caractérisations du système d'étalonnage.....	80
2.4.1.1.	Caractérisation de l'échiquier.....	80
2.4.1.2.	Caractéristique du support de capteur .....	81
2.4.1.3.	Caractérisation des colonnes .....	82
2.4.1.4.	Caractérisation du système d'étalonnage statique en localisation .....	82
2.4.1.5.	Caractérisation des pentes fixes .....	85
2.4.1.6.	Caractérisation de l'orientateur .....	85
2.4.1.7.	Synthèse des caractérisations des systèmes d'étalonnage.....	86
2.4.2.	Etalonnage en position .....	86
2.4.2.1.	Fixation du capteur.....	86
2.4.2.2.	Positionnement de l'émetteur .....	87
2.4.2.3.	Configuration du traqueur Fastrak .....	87
2.4.2.4.	Mode opératoire .....	89
2.4.2.5.	Résultats .....	89
2.4.2.6.	Perspectives d'application pour l'étude PERTIA .....	91

2.4.2.7.	Estimation des incertitudes.....	91
	Identification des sources d'erreurs.....	92
	Modèle mathématique.....	93
	Estimation des incertitudes-types.....	93
	Incertitude composée.....	96
	Calcul de l'incertitude élargie.....	96
2.4.2.8.	Nécessité d'une correction des mesures.....	97
<b>3.</b>	<b>Choix d'une méthode de correction.....</b>	<b>100</b>
3.1.	Sélection des méthodes de correction.....	100
3.1.1.	Méthode de correction à forme polynomiale.....	100
3.1.2.	Méthode de correction basée sur une interpolation.....	100
3.1.3.	Méthode dite de « proximité ».....	101
3.2.	Moyens logiciels.....	101
3.2.1.	Logiciel de correction à base de forme polynomiale.....	102
3.2.2.	Logiciel à base d'interpolation locale.....	103
3.2.3.	La fonction de « proximité ».....	104
3.2.4.	Fichier de test.....	105
3.3.	Résultats.....	107
3.3.1.	Indicateurs.....	107
3.3.2.	Tests statistiques.....	108
3.3.3.	Comparaison des corrections.....	109
3.3.3.1.	Application de la correction basée sur une forme polynomiale.....	109
3.3.3.2.	Application de la correction basée sur l'interpolation.....	113
3.3.3.3.	Application la correction de « proximité ».....	115
3.3.4.	Analyses statistiques de l'efficacité des corrections.....	116
3.3.5.	Synthèse du classement des méthodes de correction.....	119
3.3.6.	Pertinence des indicateurs.....	121
<b>4.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>123</b>
<b>5.</b>	<b>Annexes.....</b>	<b>125</b>
	Annexe 1 : Tableau comparatif de traqueurs de position.....	126
	Annexe 2 : Tableaux comparatifs de l'étalonnage et des techniques d'interpolation.....	138
	Annexe 3 : Outils d'étalonnage statique.....	140
	Annexe 4 : Caractéristiques du système d'étalonnage.....	147
	Annexe 5 : Tableau des 294 points de référence.....	151
	Annexe 6 : Tableau de l'étalonnage.....	157
	Annexe 7 : Programmation informatique.....	163
	Annexe 8 : Application des corrections.....	168
	Annexe 9 : Exemples d'analyse statistique.....	171
	Annexe 10 : Activité professionnelle.....	172
<b>6.</b>	<b>Bibliographie.....</b>	<b>178</b>
<b>7.</b>	<b>Liste des figures.....</b>	<b>182</b>
<b>8.</b>	<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>185</b>
	Résumé.....	Quatrième de couverture

## Introduction

La DGA (Délégation Générale pour l'Armement) a mandaté l'IMASSA (Institut de Médecine Aérospatiale du Service de Santé des Armées) intégré de nos jours dans l'IRBA (Institut de Recherche Biomédicale des Armées), pour coopérer à un programme d'étude amont franco-australien PERTIA (Personnalisation Transducteurs Intra Auriculaires) de 2005 à 2012. Dans l'étude PERTIA, l'IMASSA a notamment en charge l'évaluation de la spatialisation de son, d'abord en laboratoire puis sur simulateur de vol et enfin en vol à bord d'un hélicoptère de combat. Le domaine d'étude s'étend de la recherche appliquée à l'expertise.

Le son spatialisé ou aussi communément appelé Son3D par synthèse binaurale est une sorte de stéréophonie améliorée et restituée sous casque (pour une revue récente sur le sujet voir Nicol [1]). Le Son3D permet à l'auditeur de localiser une source sonore virtuelle et d'exploiter ses facultés d'écoute binaurale. Autrement dit, le Son3D permet de restituer à l'auditeur un environnement sonore tel qu'il le percevrait dans le monde réel comme par exemple des sources sonores réparties distinctement autour de lui. En stéréophonie, le son est perçu à l'intérieur de la tête, tandis qu'avec le Son3D, le son est perçu à l'extérieur de la tête dans l'environnement proche de l'auditeur (*cf.* Figure 2). Le Son3D s'apparente à l'effet enveloppant « surround » en champ libre que l'on peut entendre dans les salles de cinéma équipées, à la différence que la restitution du Son3D sous casque est beaucoup plus exacte pour la perception des sources sonores et est très réaliste en particulier dans l'hémisphère arrière du sujet (en gisement seulement quelques degrés d'erreur pour la localisation de la source sonore virtuelle perçue).

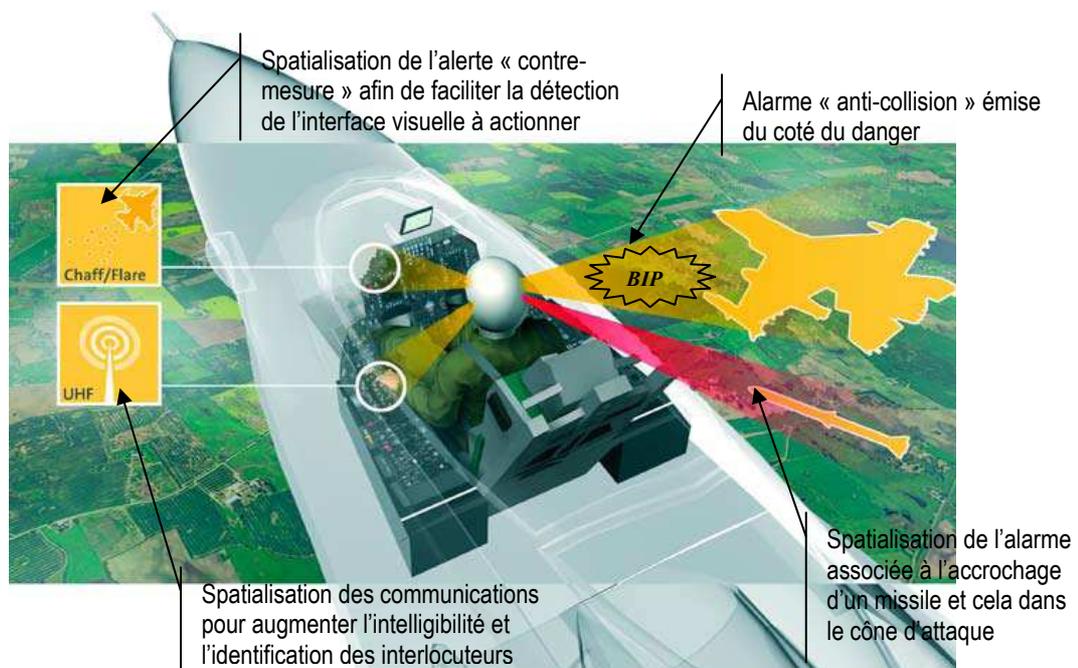


**Figure 2 : Différence perceptive de la restitution sonore sous casque entre le Son3D et la stéréophonie, dessin d'après Andéol [2]**

Un exemple d'application du Son3D en aéronautique militaire est la spatialisation de l'alarme sonore anti-collision (*cf.* Figure 3). Cette dernière émise du côté du danger permettrait au pilote d'aéronef volant en patrouille serrée d'enclencher ainsi plus rapidement la manœuvre d'évitement et du bon côté, cela sans ambiguïté.

Evidemment si une alarme est émise à droite par l'écouteur du casque, il faut la percevoir toujours à la même position quels que soient les mouvements de tête comme en environnement réel. Lors de cette restitution, les sons émis au niveau des oreilles de l'opérateur sont actualisés en « temps réel » au moyen d'une interface dédiée à la génération du Son3D. Cette interface Son 3D doit asservir le signal à spatialiser aux mouvements de tête. Ces deniers doivent donc être mesurés et sont capturés pour cela par un système dénommé « tracker » en anglais et par néologisme « traqueur » en français.

Par définition, les traqueurs sont conçus pour mesurer la localisation et l'orientation spatiale d'un objet observé en mouvement ou non, par rapport à un repère fixe et dans un espace réduit de quelques mètres tout au plus. Le capteur de position est un élément du traqueur qui mesure par un principe physique la localisation en coordonnées cartésiennes ou l'orientation des trois angles de position ou ces deux types d'information à la fois. Le capteur de position peut comporter au total six degrés de liberté qui correspondent aux trois translations et aux trois rotations possibles d'un objet dans l'espace.



**Figure 3 : Illustrations de différentes applications possibles du Son3D à bord d'un avion de chasse, dessin d'après Terma (Courtesy of TERMA A/S, [www.terma.com](http://www.terma.com), 2009)**

A l'IRBA, afin de mesurer les mouvements de tête nous avons employé jusqu'à maintenant un capteur de position de type électromagnétique pour l'écoute du Son3D en dynamique. La photographie (Figure 4) illustre un environnement expérimental pour l'évaluation du Son3D au CERMA (Centre d'Etudes et de Recherches en Médecine Aéronautique), ancienne dénomination de l'IMASSA. Le capteur de position est aussi utilisé comme moyen de désignation afin de recueillir la réponse du sujet par rapport à la localisation du son perçu. La photographie (Figure 5) montre l'utilisation d'un capteur de position de type stylet pour une tâche de désignation. A l'IRBA, le traqueur est un élément clé pour l'expertise du Son3D et

---

sert donc à la restitution du Son3D pour l'écoute et aussi à la désignation du Son3D pour le recueil expérimental. C'est pourquoi il est important de sélectionner le type de traqueur en fonction des contraintes expérimentales, de pouvoir vérifier son exactitude et donc de l'étalonner et le corriger si nécessaire. De plus, il faut se remettre en question et ne pas se contenter des solutions techniques utilisées à ce jour à l'IRBA et souvent imposées par des partenaires industriels. Par conséquent une étude bibliographique au sujet du traqueur, de son étalonnage et de ses corrections devient nécessaire.

Pour nos essais en laboratoire dans le cadre de l'étude PERTIA mais aussi d'une façon plus générale pour les expérimentations relatives au Son3D, quel type de traqueur faut-il choisir ? Quelles sont les contraintes d'emploi ? Comment étalonner le traqueur et corriger ses erreurs éventuelles ? Tels sont les enjeux à relever dans ce mémoire.

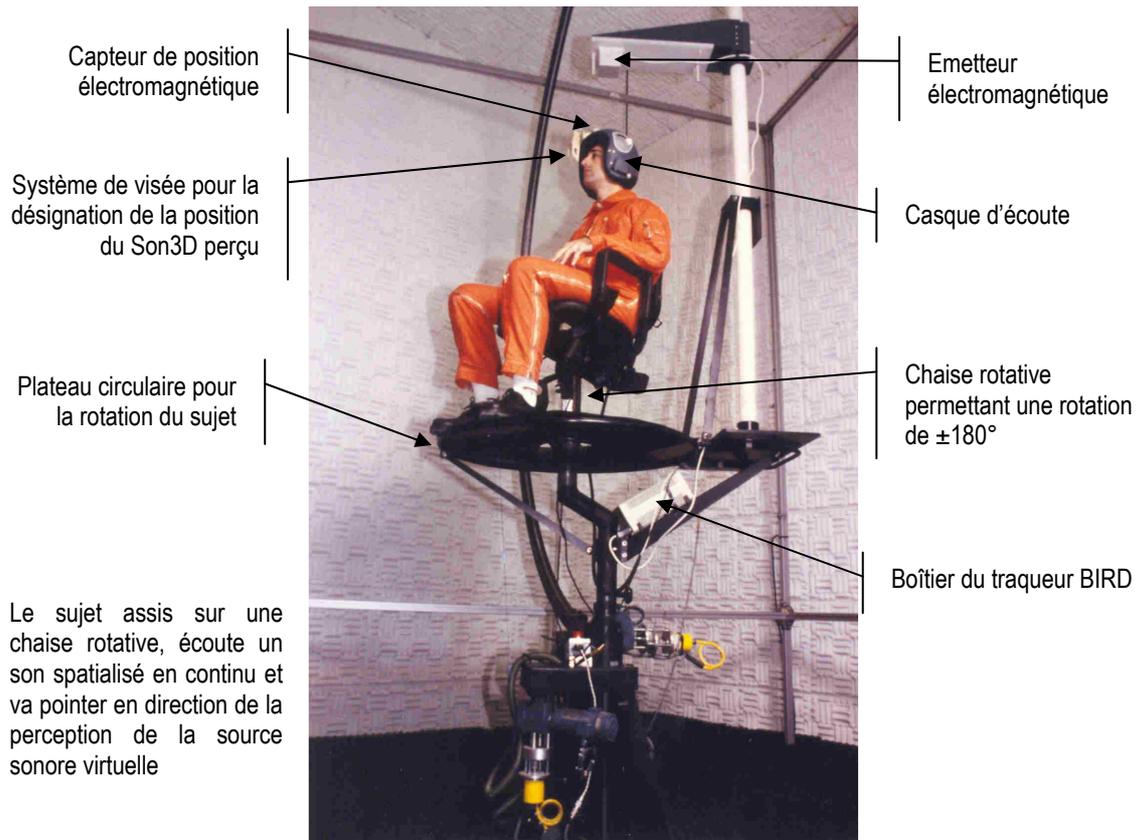
Pour répondre à ces questions, le travail de ce mémoire est décomposé en trois parties.

Après une description du contexte de travail et un survol historique des traqueurs, une revue exhaustive sur les traqueurs et leurs mesures, sur l'étalonnage de traqueur et les méthodes de corrections, est établie en première partie de ce mémoire.

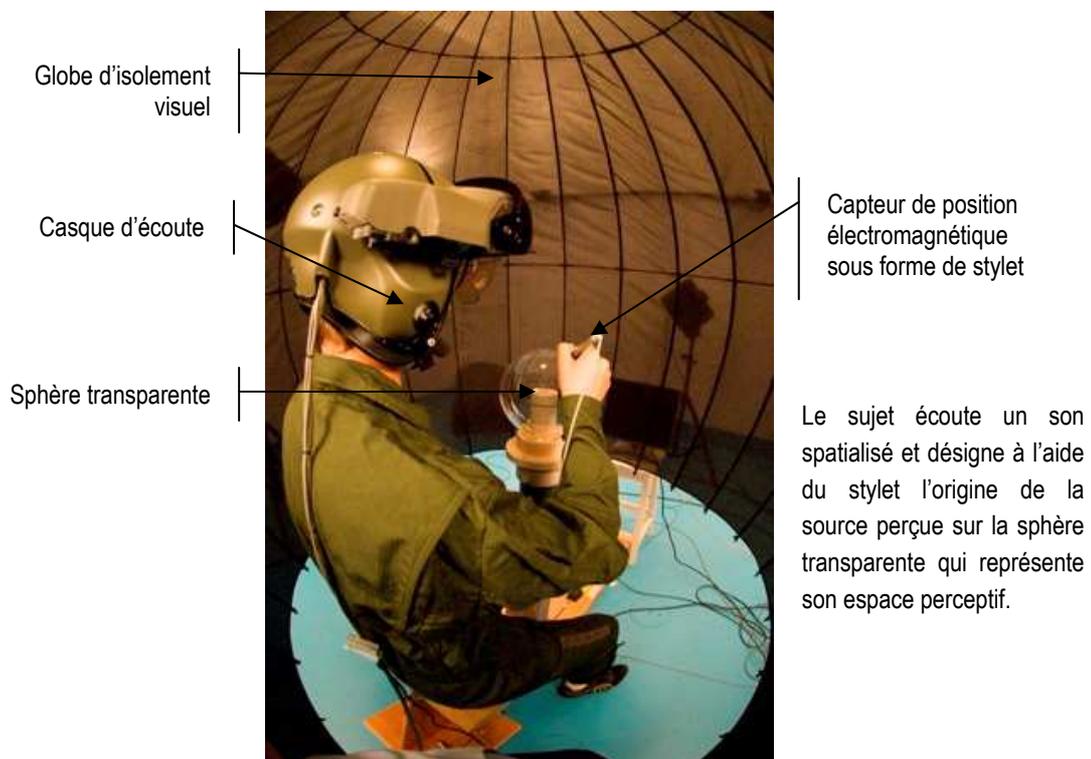
Dans la deuxième partie, le choix du traqueur, des méthodes d'étalonnage et de corrections est justifié. Puis la réalisation d'un système d'étalonnage, sa caractérisation, et l'étalonnage du traqueur sont décrits. La nécessité d'apporter une correction aux valeurs fournies par le traqueur est démontrée.

Enfin en troisième partie, des méthodes existantes de correction d'erreurs sont appliquées, évaluées, puis comparées entre elles au moyen d'analyses statistiques en fonction du résultat de l'efficacité des corrections.

En conclusion, l'application des solutions trouvées et les perspectives sont abordées.



**Figure 4 : Ecoute en dynamique et évaluation du Son3D (Photo. CERMA, 1995)**



**Figure 5 : Tâche de désignation à l'aide d'un stylet (Photo. IRBA 2010)**

---

## Présentation du contexte de travail :

J'ai effectué ce travail au sein de l'unité « Perception » du département ACSO de l'IRBA entre 2007 et 2012. Les mesures effectuées ont eu lieu principalement dans deux salles du hall d'essai (cf. Figure 6) : la salle d'essai D57 dédiée à l'audition et la chambre d'essai réverbérante.



Figure 6 : Photographie vue du ciel de l'IRBA, Photo. IRBA (2010)

### L'IRBA :

L'IRBA est un organisme français spécialisé dans la recherche biomédicale implanté à Brétigny sur Orge (91). En tant que composante du Service de santé des armées (SSA), l'IRBA est placé sous l'autorité du ministère de la Défense. L'IRBA participe à la recherche clinique en collaboration avec le SSA dans les domaines du soutien sanitaire en opérations ainsi que la protection et les soins à apporter aux combattants.

Les missions de l'IRBA sont :

- Répondre aux besoins exprimés par les États-majors en matière de protection du combattant, dans un contexte opérationnel marqué par un environnement hostile et des engagements sous une menace Nucléaire, Radiologique, Biologique et Chimique (NRBC),
- Protéger et prévenir le militaire des menaces et contraintes particulières induites par son environnement d'évolution mais aussi améliorer la prise en charge et le traitement des malades et des blessés.

---

Les thématiques de recherche de l'IRBA présentent un caractère médico-militaire faisant son unicité. Elles répondent aux besoins des forces grâce aux actions de recherche, d'expertise et de formation.

Concernant la recherche, quatre pôles de compétence transversaux et pluridisciplinaires guident les programmes de recherche de l'IRBA :

- les risques nucléaire, radiologique, chimique : effets biologiques des rayonnements, toxicologie et risques chimiques ;
- la maîtrise du risque infectieux : microbiologie, infectiologie de terrain ;
- la recherche médicale opérationnelle : soutien médico-chirurgical des forces ;
- les facteurs humains : environnements opérationnels, action et cognition en situation opérationnelle dont fait parti le département ACSO.

Au sujet de l'expertise, l'IRBA intervient en qualité d'expert auprès des forces, du SSA, de l'OTAN ainsi qu'auprès d'institutions internationales comme l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et l'Organisation des Nations Unies (ONU). Les capacités d'expertise de ses chercheurs permettent tout aussi bien d'évaluer les programmes d'entraînement physique du combattant, que de faire face à des situations exceptionnelles qui engagent la santé des populations civiles. C'est dans le domaine de l'expertise que l'étude PERTIA a été menée au profit de la DGA.

A propos de la formation, l'IRBA forme les chercheurs du Service de santé des armées mais également des étudiants civils, accueillis dans ses laboratoires pour des formations reconnues par les universités comme master et doctorat. L'IRBA dispense des formations au profit des forces, des personnels du Service de santé des armées, des acteurs de la santé civile et à des chercheurs étrangers dans le cadre d'accord de coopération. Les actions de formation sont menées sous la tutelle de l'École du Val-de-Grâce.

A noter que le site de l'IRBA est en travaux depuis l'été 2012 afin d'accueillir les moyens d'essai de ses trois centres de recherche auparavant situés en province.

### **ACSO :**

Le Département ACSO, est composé d'environ 35 personnes, et développe des recherches en ergonomie et en sciences cognitives sur la perception, la simulation et la sécurité. Les trois unités de recherche qui composent ACSO contribuent à étudier l'adaptation aux systèmes opérationnels, la prise en compte de la composante humaine au sein du couple homme/système. Dans l'unité Perception, cinq personnes contribuent aux recherches et aux expertises dans le domaine de l'audition. L'étude de nouvelle interface auditive, l'expertise relative à la protection acoustique des opérateurs et à l'intelligibilité de système de communication dans le bruit sont des exemples des travaux menés. L'IRBA dispose notamment d'une chambre semi-anéchoïque et d'une chambre réverbérante d'un volume d'environ 125 m<sup>3</sup> chacune pour réaliser ces études.

---

### **Expérience particulière chez l'industriel Thalès Avionics :**

A noter que j'ai eu l'opportunité de visiter les moyens d'essai chez Thalès Avionics sur le site du Haillan (33), concernant le système de qualification du traqueur du casque de vol « Topowl » dédié aux hélicoptères de combat. Sur place, j'ai pu assister à une cartographie électromagnétique du traqueur industriel et connaître les contraintes associées. Cette expérience pratique a facilité l'identification des problèmes rencontrés et les solutions envisagées pour la mise en œuvre d'un traqueur similaire dans notre laboratoire.

### **Réalisation de ce mémoire et expérience professionnelle :**

Le travail (recherche bibliographique, choix du traqueur et de la méthode d'étalonnage, mesure, résultats) a été effectué pour l'étude PERTIA (décrite par Sarafian *et al.* [3] pour la partie en laboratoire). En revanche, la rédaction de ce mémoire (notamment la partie correction et analyse statistique) a été réalisée hors de temps de travail pendant une multitude de soirées, de week-ends et mes congés sur plus d'une année. Ce mémoire relatif au traqueur a été très enrichissant car assez éloigné de mes préoccupations habituelles du domaine de la protection acoustique des opérateurs militaires et des interfaces sonores associées. A ce propos le lecteur pourra consulter en annexe 10, un exemple de mes actes de congrès, et quelques références illustrant mon parcours professionnel.

Pour finir, ce travail m'a permis de concrétiser les connaissances acquises au cours de ces nombreuses années passées au CNAM en cours du soir.

## Historique

L'intérêt de ce survol historique est de montrer l'évolution de la capture et de la mesure en trois dimensions (3D) d'un point ou d'un objet. Au travers des différentes technologies au cours du temps, cette évolution a abouti en laboratoire au traqueur de position.

L'un des premiers systèmes considérés comme capteur de position par certains auteurs [4] est la « *groma* », instrument d'arpentage égyptien datant de 270 avant JC puis adopté par les romains. La *groma* décrite par Adam [5] est une équerre optique qui divise l'espace en quatre quadrants et sert à l'origine à tracer des lignes droites et des angles droits pour la construction des villes et des camps militaires. Cet instrument de mesure est constitué de deux paires de fil à plomb suspendues à deux tiges horizontales de longueurs égales et fixées à angles droits. Le fonctionnement est le suivant : l'équerre de visée est positionnée dans la direction choisie par l'opérateur. Puis dans l'axe de visée de l'œil, le premier fil à plomb cache le second fil et toute perche positionnée dans cet axe est forcément aligné par rapport aux fils à plombs (cf. Figure 7). Un alignement des perches est donc réalisé et cela avec une erreur de l'ordre de quelques dixièmes de degré pour une distance de 50 m. Connaissant les distances entre les perches, l'instrument *groma* complété par un appareil de mesure angulaire « *dioptra* » permettait par triangulation de repérer des objets distants et d'effectuer des relevés en trois dimensions.

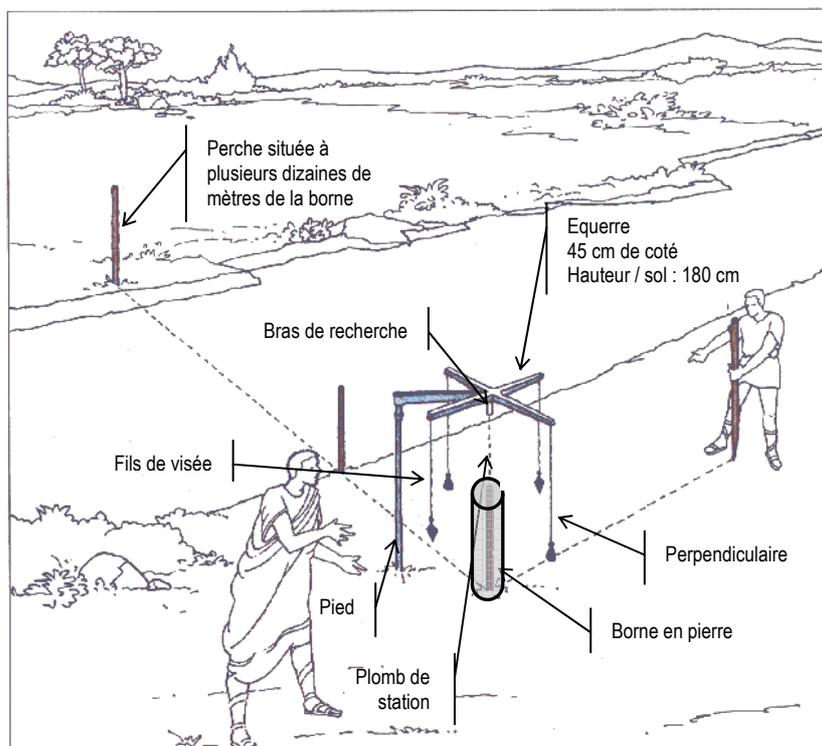


Figure 7 : Utilisation de la *groma* pour le bornage dans l'antiquité, dessin d'après l'illustration de G. Moscara (1983) dans l'ouvrage « *Misurare* » [6]

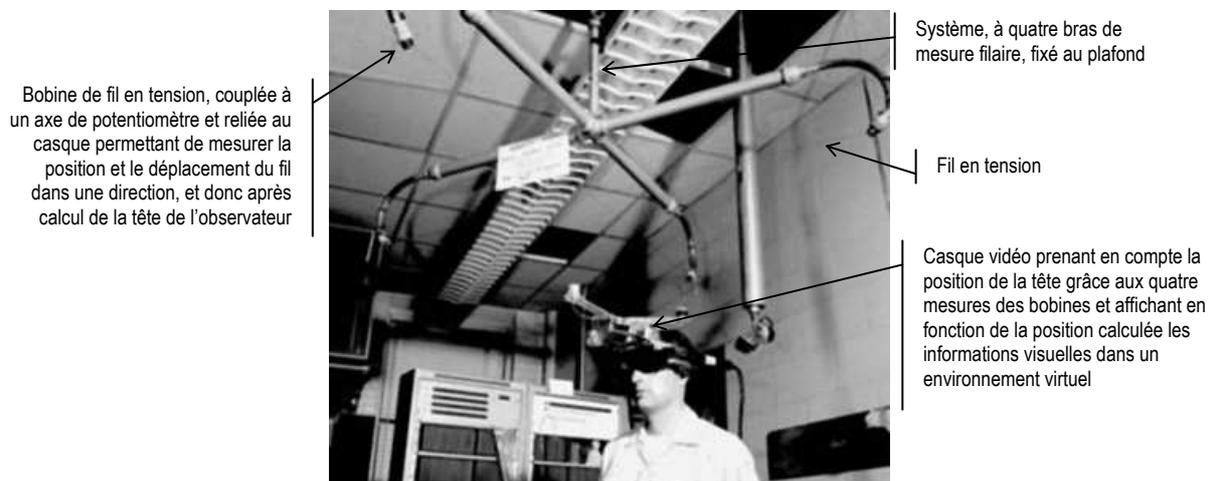
Pendant la Renaissance (XV<sup>e</sup> au XVI<sup>e</sup> siècle), les artistes emploient des systèmes de repère quadrillé (Figure 8) qui permettent de transférer par coupe une vue réelle 3D en une vue 2D et d'élaborer les règles du dessin en perspective. Au moyen de trois plans de coupe orthogonaux, les coordonnées en 3D d'un point pouvaient ainsi être déterminées.



**Figure 8 : Représentation de l'artiste Daraughsman en train de dessiner en perspective une femme allongée par rapport à un plan de coupe au moyen de repères quadrillés, dessin de Dürer [7]**

Depuis l'avènement des calculateurs informatiques, connaître la position et la direction d'un objet dans un environnement de laboratoire est un problème qui se pose fréquemment dans le monde de la mesure (métrologie, robotique), en particulier lors de la réalisation de systèmes asservis. C'est sous l'essor des besoins industriels et de la réalité virtuelle que sont apparus les traqueurs les plus évolués dédiés aux environnements de laboratoire.

En 1966, Sutherland [8] réalise le premier système dit de réalité virtuelle. Au moyen de deux tubes cathodiques miniatures, l'utilisateur observe de façon immersive dans un casque vidéo la représentation d'un cube filaire représenté en 3D et générée par un système informatique. Pour prendre en compte les mouvements de la tête et actualiser la vue cohérente du cube, le casque est relié à un capteur de mouvement mécanique appelé « épée de Damoclès » (Figure 9). Avec ce dispositif, l'utilisateur peut alors visualiser et naviguer autour d'éléments virtuels avec un champ de vision de 40°.

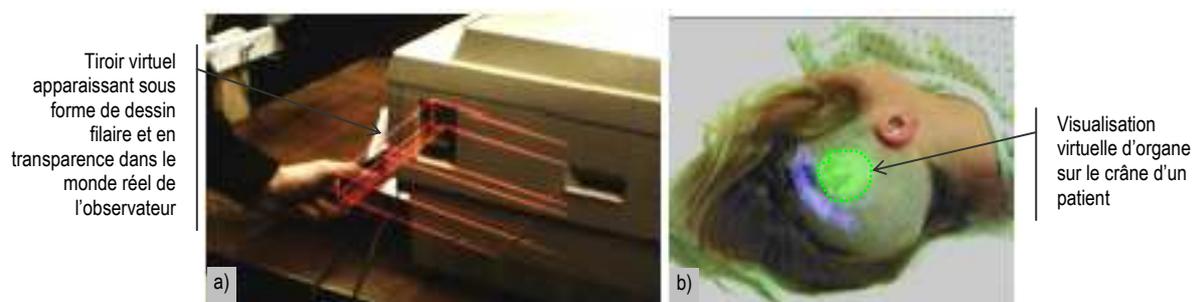


**Figure 9 : Système de détection de déplacement appelé « Epée de Damoclès » 1966, source AFIPS Joint Computer Conference Archive (1968)**

Durant les années 80, les traqueurs de position sont développés pour détecter le positionnement de tête ainsi que la direction du regard afin de servir les besoins du domaine de la réalité virtuelle. Ces traqueurs sont notamment employés dans le domaine de la conception assistée par ordinateur et de la simulation.

Par la suite, la miniaturisation et les performances croissantes des traqueurs ont permis le développement de la réalité augmentée en introduisant un grand nombre d'applications cibles : médecine ingénierie/production, architecture, visualisation augmentée, design, robotique et les loisirs.

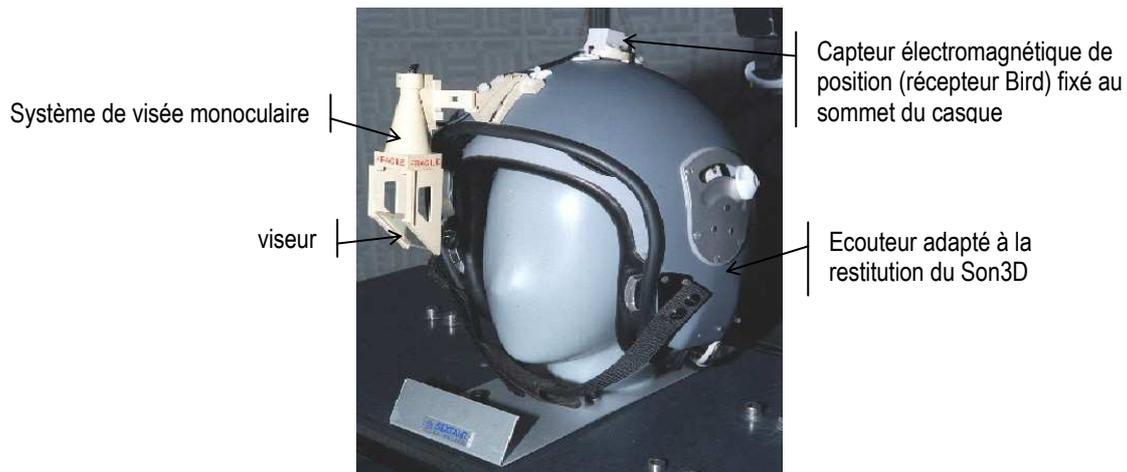
Les capteurs et traqueurs de position sont développés en laboratoire afin de déterminer la position de partie du corps humain en mouvement. Par exemple un gant instrumenté de plusieurs capteurs (Data Glove) permet de reproduire l'articulation complexe des doigts d'une main. A ce même gant, des fonctionnalités de commande sont attribuées en fonction de la position des doigts ce qui permet à l'utilisateur de manipuler un objet virtuel ou de diriger un robot. La capture du déplacement en 3D d'une tête en mouvement est nécessaire pour asservir la présentation d'images virtuelles à la position d'observation de l'utilisateur. De façon équivalente, la fusion d'image virtuelle à la vision réelle nécessite des traqueurs de tête et parfois un traqueur du regard. Par exemple, pour une tâche d'un objet à manipuler, sa localisation peut être facilitée par la vision d'une image virtuelle de l'objet observée en transparence sur l'environnement réel (Figure 10a). Dans le milieu chirurgical, la réalité augmentée peut contribuer à la délimitation et à l'identification de zone d'organe pour traiter un patient dans un but thérapeutique ou pédagogique (Figure 10b). Dans les deux derniers exemples d'application de la réalité augmentée, les traqueurs de tête sont indispensables. La restitution sous casque d'un environnement sonore virtuel (spatialisation d'information sonore ou Son3D) requiert aussi l'emploi de traqueur de position.



**Figure 10 : Applications de la réalité augmentée : a) localisation et vue d'un objet à manipuler, b) identification et délimitation de zone d'organe sur un patient, illustration d'après Grasset *et al.* [9]**

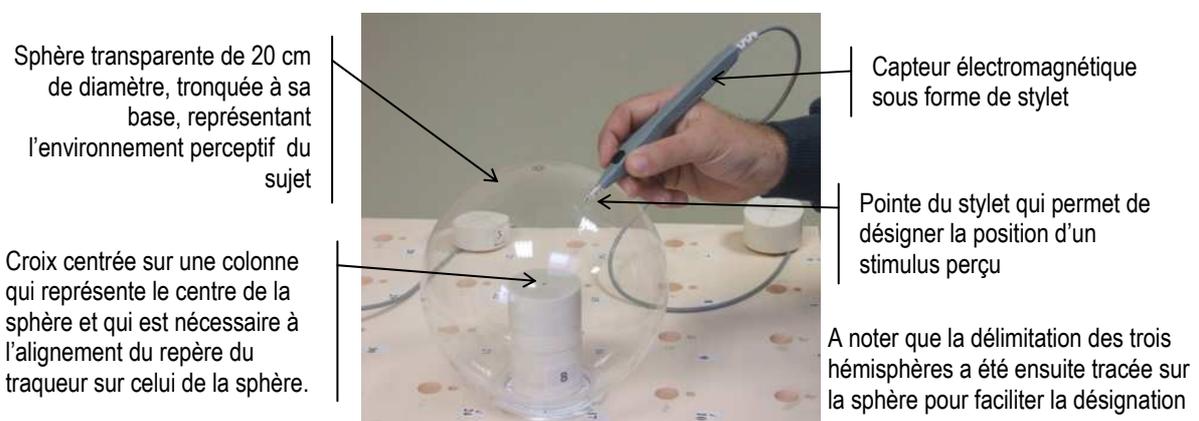
Depuis les années 90 jusqu'à nos jours, des études relatives au Son3D sont réalisées à l'IRBA dans le but d'utiliser les capacités binaurales et d'augmenter les performances cognitives des opérateurs à bord d'aéronef en vol. Pour rappel de l'introduction, le détecteur de position de tête (traqueur) est nécessaire pour deux tâches : l'écoute du Son3D en dynamique (c'est-à-dire avec mouvement de tête ou de l'auditeur) et pour le recueil expérimental de la localisation de la source sonore virtuelle. En 1999, dans le cadre d'une étude intitulée AUDIS et initiée par la DGA auprès de l'industriel Sextant Avionique, l'IMASSA met en œuvre un traqueur (le

modèle Bird de la marque Ascencion) pour l'écoute du Son3D en dynamique et la désignation de la source perçue. Un seul capteur électromagnétique de position est utilisé. Celui-ci est placé sur le sommet d'un casque de vol modifié (Figure 11). Un système de visée monoculaire est fixé sur le casque comportant une lame semi réfléchissante sur laquelle apparaît en transparence un viseur lumineux collimaté à l'infinie. L'axe de visée de l'utilisateur est déterminé par calcul au moyen d'une matrice de transfert à partir de la position fournie par l'unique capteur électromagnétique.



**Figure 11 : Casque de vol modifié pour l'étude expérimentale du Son3D (Photo. IMASSA 1999)**

En 2008, dans le cadre de l'étude PERTIA et aussi pour d'autres études psycho acoustiques menées à l'IRBA, est développée une nouvelle méthode de recueil expérimental pour la désignation de la localisation d'une source sonore perçue par un auditeur. Cette nouvelle méthode est inspirée de celle de Gilkey *et al.* [10] qui est dénommée GELP (Gold Eye Localisation Pointing). A l'IRBA, nous avons utilisé une sphère transparente (Figure 12) représentant l'espace perceptif de l'auditeur et un traqueur (le modèle Fastrak de la marque Polhemus). Le capteur électromagnétique de position utilisé a la forme d'un stylet. Le capteur (récepteur) se trouve à l'intérieur du stylet et a été étalonné par le constructeur afin de fournir les coordonnées au niveau de la pointe. Pour le pointage sur la sphère d'une position connue, l'incertitude de mesure obtenue est de  $\pm 0,5^\circ$  en gisement et en site.



**Figure 12 : Développement de la méthode GELP (Photo. IRBA 2008)**

Enfin, aujourd'hui dans le domaine militaire, les traqueurs de tête sont notamment utilisés pour actualiser l'affichage d'informations aux travers de la visière transparente du casque des pilotes d'aéronefs. Ce type de casque HMSD (Helmet Mounted Sight & Display) offre à l'utilisateur une vision avec une réalité augmentée par des informations de vol et est compatible avec le viseur tête haute Head-Up Display (HUD). Par exemple à bord de l'hélicoptère de combat Tigre produit par Eurocopter, un traqueur de type électromagnétique est mis en œuvre. Ce traqueur permet notamment d'asservir le tir du canon mobile en fonction de la visée naturelle et instinctive du tireur au travers de la visière du casque « TopOwl » de type HMSD, produit par Thales Avionics (Figure 13).



Figure 13 : Traqueur électromagnétique de position à bord de l'hélicoptère Tigre (Photo. Extrait du site [www.aviation-francaise.com](http://www.aviation-francaise.com), Topowl.jpg, 2013)

---

# 1. Etude bibliographique

Les différents types de capteurs de position, éléments clés des traqueurs, sont correctement documentés dans la littérature. Par contre, les différents problèmes de mise en œuvre des traqueurs de position et notamment les erreurs statiques et dynamiques sont étudiées de façon très diverses et éparses. Cela justifie cette revue bibliographique sur les traqueurs utilisés en laboratoire et sur les différentes techniques servant à étalonner ces systèmes de traqueur. Bien que dans le système final PERTIA de spatialisation des sons le capteur de position soit de type électromagnétique, il est nécessaire d'étudier les autres types de capteurs pouvant être utilisés pendant la phase d'évaluation du système. Un objectif de cette revue est de sélectionner et/ou d'établir une méthode robuste d'étalonnage d'un traqueur de position afin de l'employer dans le cadre du Son3D.

Dans une première partie de cette étude bibliographique, les traqueurs de position sont étudiés et classés selon le phénomène physique exploité par les capteurs associés. Dans une deuxième partie, les étalonnages et différents types d'erreur rencontrés lors de l'utilisation des traqueurs sont décrits. Puis l'ensemble des méthodes de corrections des erreurs de position et d'orientation est étudié. Enfin, les matériels d'acquisition de données ainsi que les logiciels disponibles sont exposés. Quelques paragraphes sont spécifiques aux applications de la technologie du Son3D.

## 1.1. Les traqueurs de position

Les traqueurs de position sont des systèmes capables de fournir les coordonnées et/ou l'orientation d'un objet dans l'espace ainsi que de suivre en temps réel le déplacement de cet objet. Une composante essentielle d'un tel système est le capteur de position.

### 1.1.1. Introduction

Il s'agit de présenter dans ce chapitre les traqueurs permettant la localisation et le suivi de la trajectoire en temps réel de tout objet dans un environnement de laboratoire. Dans le domaine de la réalité virtuelle, l'objet à localiser peut être un objet manipulé par l'utilisateur, une partie du corps ou même tout le corps. Un traqueur peut aussi être utilisé en tant que pointeur et souris 3D ou 6D : les capteurs de position spatiale déterminent six paramètres liés aux six degrés de liberté (soit trois angles et trois distances). Une matrice de transformation géométrique entre le repère lié à l'objet et le repère lié à l'environnement définit les six paramètres. Cette transformation est le plus souvent composée d'une rotation et d'une translation.

Par contre, d'autres capteurs ne mesurent que trois paramètres liés soit à la localisation soit à la rotation. Certains capteurs ne mesurent qu'un seul degré de liberté. Dans ce cas, à partir de simples capteurs de mesure de distance ou d'orientation angulaire, la position spatiale d'un objet peut être déterminée à partir de la mesure de plusieurs de ses points par rapport à un référentiel (application de la méthode de triangulation).

---

Quoi qu'il en soit, d'après Fuchs [11], concevoir et réaliser un capteur de position délivrant en temps réel à une fréquence supérieure à 100 Hz six mesures très exactes, sans contraintes d'exploitation reste un défi technique très difficile. Le traqueur parfait ou «presque parfait» n'existe pas. Dans ce chapitre, tous les capteurs présentent au moins une contrainte d'exploitation ou des performances restrictives.

### **1.1.2. Périmètre de la revue**

Cette revue de la littérature est orientée vers l'application de ces capteurs dans le cadre d'expérimentation relative au son tridimensionnel (Son3D) en laboratoire. Plus précisément, le périmètre de cette revue se limite aux capteurs capables de fournir les informations relatives à l'emplacement, à l'orientation d'un objet dans l'espace, avec six degrés de liberté en temps réel. Le volume d'évolution est restreint ( $0,5 \text{ m}^3$ ) avec un rayon d'action de moins d'un mètre. Les gants instrumentés de capteurs ne sont pas inclus dans cette étude. L'exhaustivité de l'ensemble des capteurs de position n'est donc pas complète et évidemment tous les capteurs de « navigation » permettant la localisation terrestre exploités notamment en aéronautique sont exclus comme le GPS. Seuls les appareils susceptibles d'être miniaturisés pour être utilisés en réalité virtuelle et qui présentent une incertitude de l'ordre du millimètre sont répertoriés.

### **1.1.3. Principe de localisation**

Dans ce paragraphe, les principes géométriques de localisation sont d'abord décrits puis les phénomènes physiques exploités par les différents types de capteurs sont énoncés.

La position à six degrés de liberté (6 ddl) d'un solide indéformable dans un repère de référence peut être déterminée à partir de la mesure de la localisation de trois points S1, S2, et S3 non alignés du solide. Par méthode de triangulation, la position du point S1 est déterminée dans l'espace grâce aux trois distances ( $d_2, d_5, d_6$ ) mesurées entre ce point S1 et les trois points fixes F1, F2 et F3 liés au repère de référence (*cf.* Figure 14). Connaissant la distance entre S1 et S2 il suffit de mesurer les deux distances ( $d_3, d_4$ ) du point S2 avec seulement deux points  $F_i$  (F1 et F2 par exemple) pour calculer la position du point S2. Enfin, de la même façon connaissant les trois distances entre S1, S2, et S3, une seule distance ( $d_1$ ) est nécessaire pour calculer la position de S3 avec un point  $F_i$ . Les six ddl du solide peuvent être ainsi déterminés avec le système des six équations obtenues. Mais matériellement, si trois distances sont nécessaires pour calculer la position dans l'espace du point S1, les positions des deux autres points S2, et S3 peuvent elles aussi être calculées avec trois distances. On obtient alors un système de neuf équations à six inconnues.

Afin de déterminer de la position d'un objet, les principes de mesure utilisent différents domaines de la physique tels que la mécanique, l'électromagnétisme, l'acoustique, et l'optique.

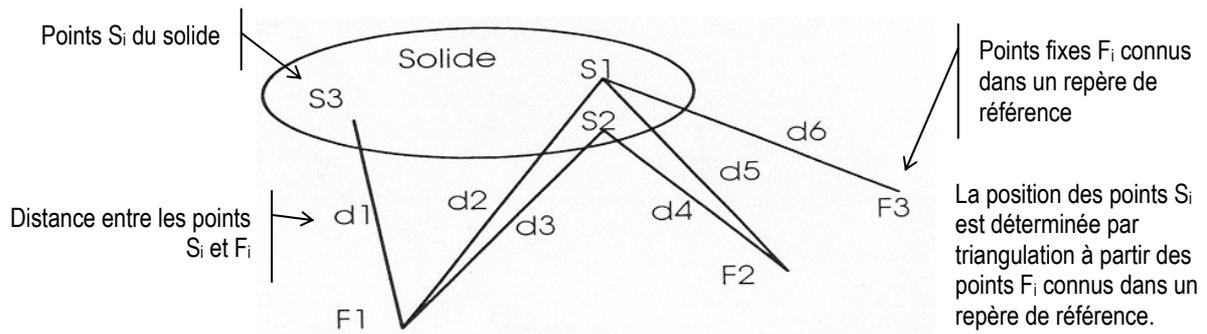


Figure 14 : Principe basé sur les mesures de distances d'après Fuchs [11]

#### 1.1.4. Les différents types de traqueurs de position

Le descriptif des différents traqueurs de position reprend en partie et plus succinctement celui de Fuchs *et al.* [11], mais est actualisé et enrichi de nouveaux types de traqueurs. Le lecteur trouvera en annexe 1 un tableau renseigné selon de multiples critères reprenant les produits passés et actuels.

##### 1.1.4.1. Traqueur mécanique

###### *Principe*

Les traqueurs mécaniques mesurent des angles et des distances entre solides.

###### *Technique*

Une liaison entre l'objet détecté et son environnement est nécessaire en permanence. Pour conserver les six degrés de liberté à l'objet, la liaison est réalisée en général par un ensemble de trois barres. Celles-ci possèdent des liaisons pivot entre elles à l'extrémité desquelles une rotule permet une orientation angulaire à trois degrés de liberté. La mesure des six angles détermine la position de l'objet (Figure 15). Les mouvements relatifs entre les pièces mécaniques sont des rotations qui sont mesurées grâce à des potentiomètres ou des capteurs optiques incrémentaux. Cette architecture mécanique est similaire à celle de bras de mesure dimensionnelle 3D mais en plus légère (1 à 10 kg) pour réduire les contraintes de mouvement et d'inertie de l'objet observé.

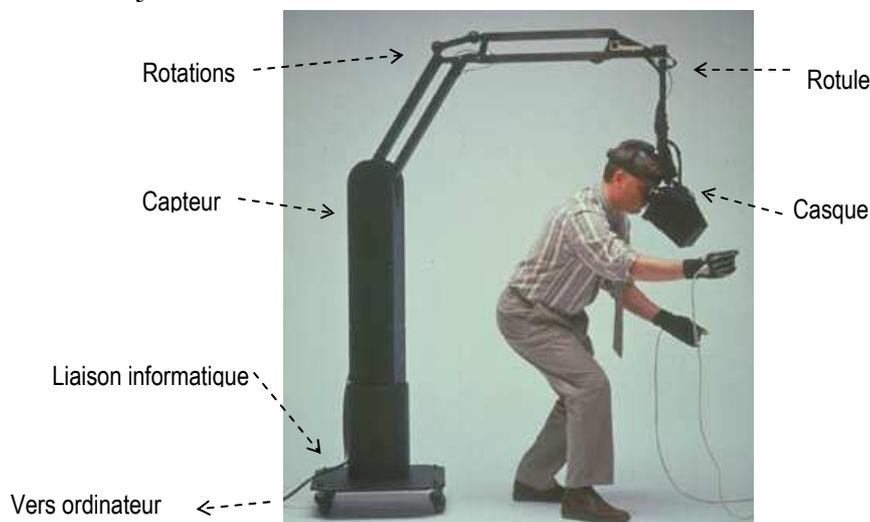


Figure 15 : Traqueur de localisation mécanique de tête, image d'après Abdallahi *et al.* [4]

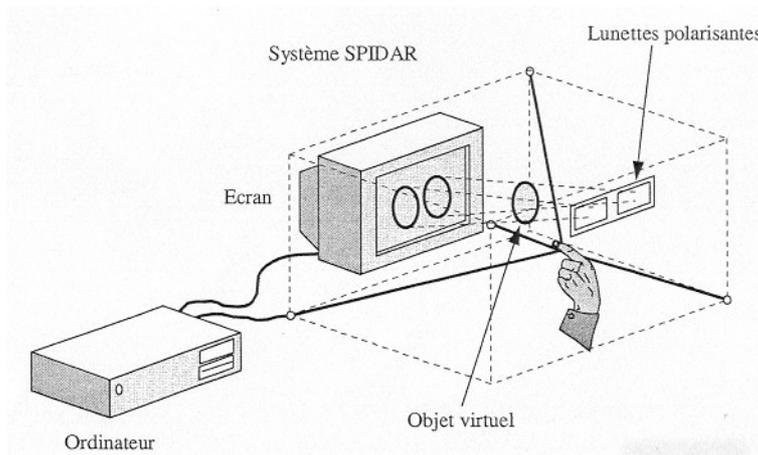
### **Avantages et contraintes**

Les mesures sont exactes et/ou fidèles (quelques dixièmes de millimètres en répétabilité), très rapides (jusqu'à 300 mesures par seconde) et le temps de réponse est très court (2 à 3 ms). Le seul inconvénient majeur est la contrainte de liberté de mouvement. L'étendue de mesure est limitée à la longueur des bras soit moins de trois mètres et le capteur crée des obstacles aux déplacements de l'objet observé.

Ce type de traqueur est principalement exploité pour mesurer le mouvement de la tête. Ce système mécanique peut enregistrer des mouvements d'objet quelconque. Dans le cas où cet objet est un autre capteur de position, le traqueur mécanique, pris comme référence, est un outil tout à fait adapté pour réaliser l'étalonnage par comparaison du capteur étudié.

D'autres types de traqueurs mécaniques, conçus dans le passé, sont présentés par Fuchs *et al.* [11]. Un prototype (Spidar II) à plusieurs fils est employé pour mesurer les mouvements de translation de l'extrémité d'un doigt (3 ddl). Celle-ci est attachée à quatre fils reliés à quatre moteurs-encodeurs qui maintiennent une tension sur les fils. Le doigt peut se mouvoir dans un volume d'un mètre cube environ (Figure 16). Grâce aux encodeurs, la longueur des parties déroulées des fils est mesurée à chaque instant et la position du doigt peut être déterminée géométriquement.

D'autres systèmes, d'ailleurs souvent les premiers utilisés en réalité virtuelle afin de détecter les déplacements de tête comme « l'épée de Damocles », fonctionnent sur des techniques similaires. Ces traqueurs sont des prototypes de laboratoire et ne sont généralement pas commercialisés.



**Figure 16 : Mesure de la position d'un doigt et du retour d'effort sur celui-ci d'après Fuchs [11]**

### **Produits existants**

Les seuls produits identifiés sont des systèmes de mesures dimensionnelles 3D très précis, de l'ordre de quelques micromètres. Ce type de matériel n'est pas adapté ergonomiquement pour suivre une trajectoire en temps réel (Figure 17). Par contre, ce type de d'appareil de mesure peut servir à étalonner d'autres types traqueurs au moins en statique. L'industriel Faro offre une grande gamme de bras mesureur et notamment non magnétique pouvant être utilisé pour

étalonner certains capteurs électromagnétiques (voir Figure 18). Bien que l'électronique du bras Faro de type Platinum effectue des mesures à une fréquence de 2 kHz, seulement 100 points par seconde sont transmis au PC via un port USB. Dans ce cas, la linéarité temporelle des points n'est pas assurée, et l'étalonnage en dynamique n'est donc pas possible sans une modification du système de transfert des données. L'industriel Romer proposerait aussi des produits équivalents.



Figure 17 : Bras de mesure de précision d'après Foxlin *et al.* [12]



Figure 18 : Bras de mesure dimensionnelle Faro type Platinum, [www.faro.com](http://www.faro.com) (2012)

#### 1.1.4.2. Traqueur électromagnétique

##### *Principe*

Une source artificielle émettrice fixe crée dans son espace environnant un champ variable d'une grandeur physique. Un récepteur lié à l'objet à localiser mesure ce champ, dont les valeurs sont fonction de la position spatiale de l'objet.

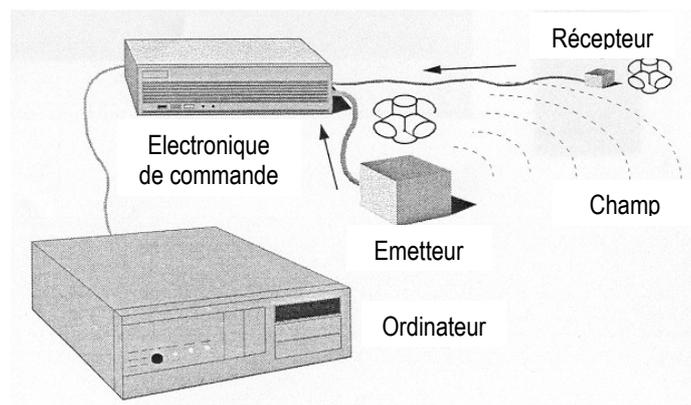


Figure 19 : Principe et dispositif d'un système de localisation à base de capteur électromagnétique d'après Fuchs *et al.* [11]

##### *Techniques*

Le capteur électromagnétique à six degrés de liberté est basé sur l'application des champs électromagnétiques orthogonaux [13]. Le système comporte un émetteur de champ magnétique et un récepteur connecté au circuit de commande. L'émetteur électromagnétique comporte 3 bobines orthogonales qui émettent en séquence et le récepteur a trois bobines qui

---

mesurent le champ généré par l'émetteur (*cf.* Figure 19). L'intensité des signaux reçus est comparée à celle des signaux générés afin de déterminer la position et est comparée à chacune des autres pour déterminer l'orientation.

Jusqu'ici deux types de capteurs électromagnétiques de position ont été réalisés : une réalisation utilise un champ magnétique rotatif et alternatif (CMA), l'autre utilise un champ magnétique continu (CMC). CMA et CMC sont respectivement notés AC et DC en anglais.

Dans le système CMA, un courant alternatif est envoyé aux bobines de l'émetteur dans une séquence de telle sorte que les trois champs magnétiques soient générés perpendiculairement entre eux. Le champ induit des courants dans le récepteur qui comporte aussi trois bobines passives et mutuellement perpendiculaires. La détection de position et d'orientation est donc estimée à partir des neuf courants induits via le calcul des faibles changements des coordonnées directionnelles et la mise à jour des mesures précédentes. L'émetteur comme le récepteur est composé de trois bobines enroulées sur un cube. Le temps de latence de ce type de système est de l'ordre de 9 ms et de 45 ms selon le filtrage appliqué. L'unité électronique peut gérer plusieurs récepteurs (quatre par exemple).

Contrairement au cas précédent, le système CMC émet une succession d'excitations impulsionnelles de courant continu dans les bobines pendant 2,5 ms environ, ce qui revient à alterner les mises sous et hors tension de l'émetteur. Cette conception permet de réduire l'effet de la distorsion du champ provoquée par les courants de Foucault, eux-mêmes induits par les métaux à proximité lorsque le champ évolue. Les mesures initiales sont réalisées avec l'ensemble des trois antennes hors service de telle sorte que les composantes (x, y, z) du champ magnétique terrestre ou de l'environnement de travail soient mesurées. Ensuite, chaque bobine de l'émetteur est excitée successivement et le courant induit est enregistré sur chaque bobine du récepteur après un court instant (de l'ordre de 1 ms) nécessaire à l'extinction des courants de Foucault. Les mesures sont effectuées sur les trois bobines du récepteur lorsque le champ magnétique devient constant. Les composantes du champ magnétique terrestre sont alors soustraites des neuf valeurs mesurées générées dans chaque bobine du récepteur à chaque excitation et les neuf valeurs mesurées résultantes sont alors prises pour calculer la position et l'orientation du récepteur par rapport à l'émetteur. Le cycle total des mesures d'une position du récepteur dure moins de 10 ms. La structure matérielle est similaire à celle du traqueur précédent, sauf dans la forme du bobinage. Le récepteur possède de plus au centre du cube un bobinage cylindrique complémentaire pour augmenter l'énergie magnétique réceptionnée.

### ***Avantages et contraintes***

Les traqueurs électromagnétiques offrent de bonnes performances quant à l'exactitude des mesures (de l'ordre du millimètre). Ces traqueurs sont les plus employés pour les applications liées à la réalité virtuelle, car ils sont transparents pour l'utilisateur. Ils sont notamment utilisés dans les cockpits d'avion pour les systèmes de vision en réalité augmentée par casque.

---

La liaison électrique par câble avec le récepteur peut être une entrave à la liberté de mouvement du solide observé. Des systèmes hybrides sans liaison par câble entre le récepteur et le boîtier électronique existent.

Pour les traqueurs CMA, la contrainte principale est leur forte sensibilité aux pièces métalliques. En présence de pièces conductrices, le champ magnétique variant dans le temps crée des courants induits dans ces pièces (les courants de Foucault). Les intensités de ces derniers sont proportionnelles à la fréquence du champ magnétique et créent des champs magnétiques complémentaires qui perturbent les mesures. L'emploi des appareils à champ magnétique alternatif dans un environnement métallique fixe est possible à condition de réaliser un étalonnage préalable pour compenser les perturbations. Les temps de latence sont relativement courts et comparables entre les traqueurs CMA et CMC. Les temps de latence des différents modèles de traqueurs ont été étudiés et mesurés par Adelstein *et al.* [14]. En option, un filtrage adaptatif de type moyenne exponentielle sur la mesure (tenant compte des mesures filtrées précédentes *cf.* manuel d'emploi [15]) peut supprimer les bruits parasites et lisser les mesures, mais le temps de réponse est alors augmenté de plusieurs dizaines de millisecondes. Ces temps augmentent encore s'il y a plusieurs récepteurs en fonctionnement. L'unité électronique CMA peut gérer plusieurs récepteurs (quatre par exemple) et le constructeur a prévu des fréquences porteuses différentes pour associer dans un même espace jusqu'à quatre émetteurs commandés par quatre unités différentes (16 récepteurs).

### ***Produits existants***

Les sociétés Polhemus et Ascension Technology Corporation sont les principaux fabricants de systèmes de traqueur électromagnétique qui sont couramment employés dans les applications de réalité virtuelle. Polhemus fabrique plusieurs sortes de systèmes CMA pour les applications d'orientation VR : 3 Space Isotrack, 3 Space Fastrack, Liberty, Minuteman (souris 3D). Les principales différences entre eux sont le nombre de capteurs que les systèmes peuvent supporter et la technologie CMA ou CMC.

Fastrak présente de base une dynamique opérationnelle jusqu'à 3,05 m, mais un fonctionnement avec une étendue supérieure jusqu'à 9,15 m est possible au moyen de l'émetteur optionnel à grand rayon. Le modèle 3Space Fastrack opère à 120 Hz atteignant une résolution de poursuite 0,06 mm en position et de 0,025° en orientation. L'incertitude de capture est de 0,76 mm rms en position et de 0,15° rms en orientation à une distance de 30,5 cm entre l'émetteur et le récepteur. Différents produits existent, comme notamment les modèles Liberty ou le Patriot (Figure 20), qui permettent de pointer en 3D à l'aide d'un stylet. A noter que le modèle Liberty travaille à une fréquence de 240Hz pour un récepteur et peut gérer jusqu'à 16 récepteurs. Les performances du modèle Liberty sont supérieures ou égales à celles du Fastrak. De plus, une option du modèle Liberty permet de détecter et d'alerter de toute distorsion du champ électromagnétique de l'environnement. Une version nommée

Liberty Latus dont le récepteur est sans fil a été développée (cf. Figure 21) et possède une fréquence de mesure de 188 Hz.

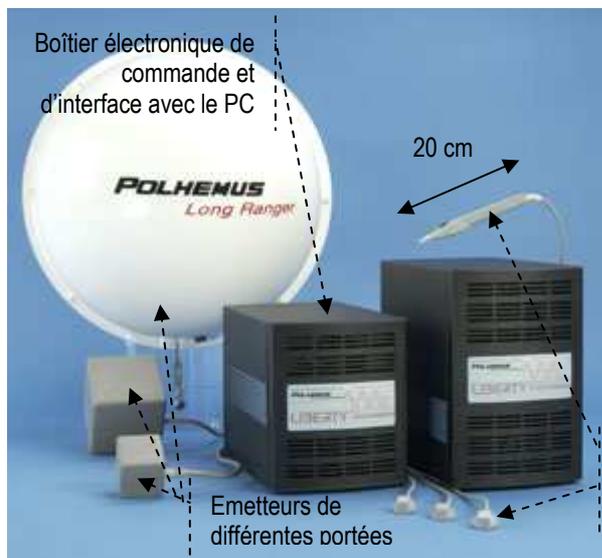


Figure 20 : Traqueur de type Liberty de Polhemus, [www.polhemus.com](http://www.polhemus.com) (2012)



Figure 21 : Récepteur sans fil du Liberty Latus, [www.polhemus.com](http://www.polhemus.com) (2012)

Ascension Technology produit plusieurs systèmes de traqueur basés en CMC comprenant les modèles Nest of Bird (Figure 22), Flock of Birds (FoB) (Figure 23), SpacePad, pcBird, miniBird, microBird. Le système Spacepad comporte des boucles magnétiques servant d'antennes à positionner soi-même. Ces antennes peuvent être disposées horizontalement et verticalement dans une pièce ou sur un dispositif (de jeux, par exemple), permettant une localisation à la fréquence de 120 Hz avec un récepteur. Ascension commercialise aussi un traqueur de petites dimensions ( $9 \times 6 \times 6$  mm pour le récepteur) : le miniBird. Le récepteur du microBird a un diamètre de moins de 1,8 mm et peut être inséré dans un cathéter (Figure 24). Le Flock of Birds relie plusieurs unités de traitement dans un seul système permettant simultanément la poursuite de plusieurs récepteurs et est habituellement utilisé dans les installations comme le CAVE alors que SpacePad et pcBird sont prévus pour fonctionner dans des volumes plus petit. Flock of birds fonctionne à 144 Hz atteignant en résolution 0,5 mm pour la position et  $0,1^\circ$  pour l'orientation avec une incertitude de 1,8 mm rms en position et  $0,5^\circ$  rms en orientation à une distance de 30,5 cm entre le récepteur et l'émetteur cf. manuel d'emploi [16]. Avec le système Flock of birds, jusqu'à 30 récepteurs peuvent être utilisés sans diminution du nombre de mesures par seconde. Les ordres de grandeur du temps de latence sont en pratique de 8 ms avec un seul récepteur et sans filtrage, et de 47 ms avec filtrage. Plusieurs émetteurs peuvent être aussi exploités afin d'augmenter l'étendue de mesure. A noter qu'une version du Flock of Birds de classe B a été développée afin d'effectuer des mesures en présence d'ultrasons pour des applications dédiées au domaine de l'imagerie médicale.

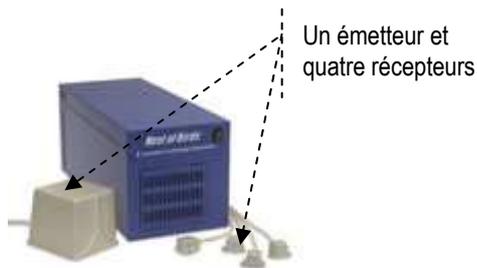


Figure 22 : Traqueur Nest of Bird d'Ascension, [www.ascension-tech.com](http://www.ascension-tech.com) (2007)

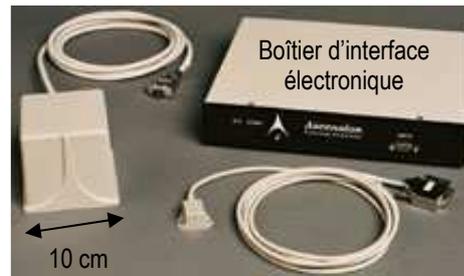


Figure 23 : Traqueur Bird d'Ascension, [www.ascension-tech.com](http://www.ascension-tech.com) (2007)

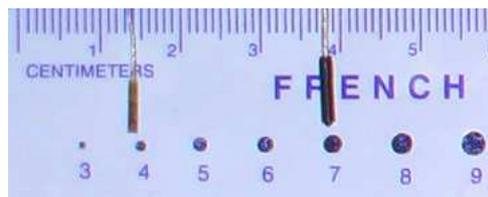


Figure 24 : Récepteur microBird de 1,3 et 1,8mm de diamètre, [www.ascension-tech.com](http://www.ascension-tech.com) (2010)

En incorporant l'électronique de mesure sur une carte directement connectable dans l'ordinateur, on réalise un gain de temps dans la transmission. L'entreprise Polhemus le propose avec le traqueur Inside Trak et l'entreprise Ascension avec le traqueur pcBird, mais leurs performances en exactitude sont dégradées.

La société Northern Digital Inc (NDI) propose un capteur électromagnétique Aurora (cf. Figure 25), ayant des récepteurs de 0,9 mm de diamètre, dix pouvant être suivis simultanément. Les incertitudes annoncées sont de l'ordre de 1 mm en translation et de  $0,5^\circ$  en rotation. La fréquence de mesure est comprise entre 20 et 60 Hz, indépendante du nombre de récepteurs. Un logiciel détecte et informe des perturbations électromagnétiques.

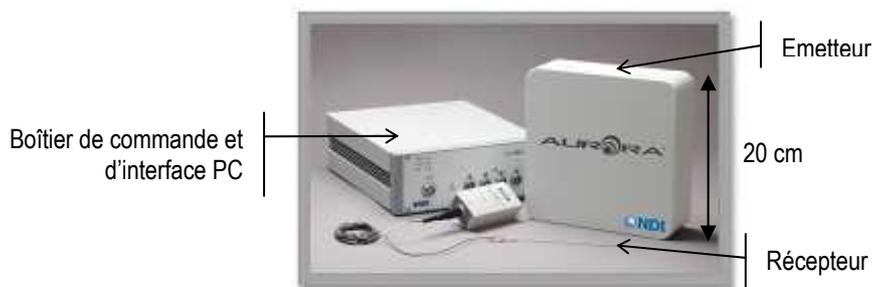


Figure 25 : système Aurora, [www.ndigital.com](http://www.ndigital.com) (2006)

Sakurada *et al.*, [17] conçoivent un prototype de traqueur électromagnétique de faible coût basé sur deux bobines mono axiale et une bobine trois axes. Ils développent aussi l'algorithme de détection de position associée.

### 1.1.4.3. Traqueur acoustique

#### **Principes :**

La mesure de distances déterminée par des temps de propagation d'ultrasons dans l'air est le principe de ce type de traqueur. Le radar de recul arrière des voitures récentes est un exemple d'application industrielle de ce principe.

---

En acoustique, la vitesse du son  $c$  dans l'air sec, à la pression normale, est fonction de la température et est donnée par l'équation suivante en unités SI :

$$c = 331 \sqrt{\frac{T}{273}}$$

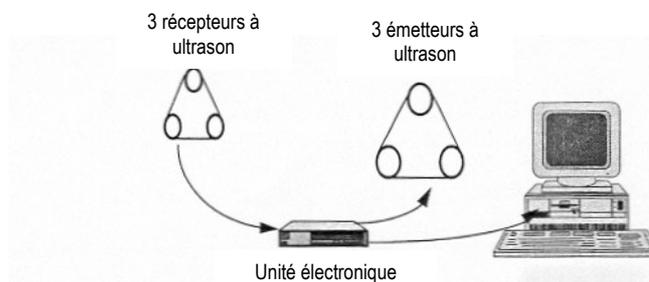
Un autre principe de mesure est basé sur la mesure de déphasage entre l'émission sonore et la réception sonore. Dans ce cas les mesures sont continues, ce qui permet non seulement un meilleur temps de latence (de l'ordre d'une quinzaine de millisecondes) mais aussi de pouvoir filtrer les données pour diminuer le bruit.

### **Techniques :**

Une céramique piézoélectrique est excitée à une fréquence voisine de 40 kHz de manière impulsionnelle. Cette fréquence résulte d'un compromis entre des fréquences plus élevées pour lesquelles l'atténuation de l'onde dans l'air limite la portée (deux mètres environ à 80 kHz) et des fréquences plus basses pour lesquelles la longueur d'onde  $\lambda$  et la résolution sont trop grandes (dans l'air à 40 kHz, la distance minimale de mesure correspond à la longueur d'onde soit 8,3 mm). L'angle solide du faisceau sonore diminue quand la fréquence augmente. Une pastille de 20 mm de diamètre excitée à 40 kHz émet dans un cône de 30° environ. Le temps de vol est de 10 ms pour une distance de 3,3 m. Trois émetteurs étant nécessaires, la durée de la mesure totale est donc trois fois plus grande, si les mesures de distances sont faites cycliquement. A partir du codage différent des impulsions, soit en fréquence, soit en durée le temps de réponse du capteur peut être diminué.

Le traqueur type est composé d'un ensemble triangulaire fixe de trois émetteurs d'ultrasons (céramiques piézo-électriques) et d'un ensemble triangulaire de trois récepteurs lié à l'objet (céramiques identiques, la piézoélectricité étant un phénomène réversible). Les mesures des différents temps de vol des ultrasons entre les émetteurs et les récepteurs permettent de déterminer la position de l'objet (Figure 26).

Un système électronique gère les émissions d'ultrasons, les mesures de temps de propagation, les calculs des paramètres et la communication avec l'ordinateur exploitant les mesures. Le traqueur type peut réaliser 50 mesures par seconde.



**Figure 26 : Dispositif d'un traqueur de localisation à ultrasons, d'après Fuchs *et al.* [11]**

### **Avantages et contraintes :**

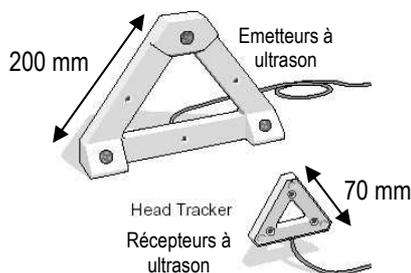
La sonde émettrice et la sonde réceptrice doivent être reliées toutes les deux au boîtier électronique de commande pour la synchronisation des impulsions des mesures des temps.

Cette liaison électrique par câble peut être une entrave à la liberté du mouvement du solide observé. Les traqueurs à ultrasons ont pour défaut d'être influençables par la température ambiante car la vitesse du son dépend de la température. Ces capteurs sont facilement bruités par tous les appareils qui émettent des ultrasons et par les échos sur les parois. En contrepartie, les traqueurs à ultrasons ont pour avantage leur faible coût comparativement aux traqueurs électromagnétiques. De plus, ce type de traqueur est insensible à un environnement métallique. L'encombrement (20 cm environ) et le poids (une centaine de grammes) sont faibles. La résolution est inférieure au millimètre dans un volume de plusieurs mètres et l'incertitude correspond à 2% de la distance entre l'émetteur et le récepteur.

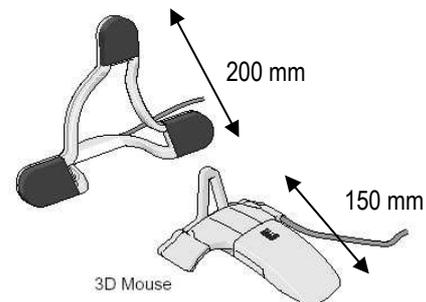
Le câble entre le boîtier de commande et la sonde observée peut être supprimé à l'aide d'un système à infrarouges qui servent à synchroniser les émissions ultrasonores. L'étendue de mesure de ce type de système peut être augmentée si l'on utilise un grand nombre de récepteurs d'ultrasons. Par contre le récepteur IR doit être en ligne de vue directe d'au moins un émetteur IR. Ce type de dispositif nécessite un étalonnage.

### ***Produits existants :***

La firme Logitech produit plusieurs types de traqueur acoustique (Figure 27 et Figure 28) généralement dédiés au domaine des jeux virtuels.



**Figure 27 : Traqueur acoustique de tête (Logitech), [www.vrdepot.com](http://www.vrdepot.com) (2006)**



**Figure 28 : Traqueur acoustique « souris 3D », (Technical Reference Manual Rev. C, Logitech, 2006)**

D'après Fuchs *et al.* [11], un constructeur propose un traqueur acoustique que l'on fixe à un doigt. Cette interface, employée en pointeur 3D, exploite les ultrasons et les infrarouges. La fréquence de mesure est de 50 Hz, la résolution est de 0,3 mm et l'étendue de mesure est limitée à 90 cm.

#### **1.1.4.4. Traqueurs optiques**

Le traqueur optique est souvent exploité pour le suivi du mouvement de la tête de l'observateur et de son regard, pour la reconstruction du corps et pour la détermination de mouvements corporels.

## Principes :

Différents principes optiques sont employés par les traqueurs. Parmi ceux-ci, les plus courants sont d'une part la mesure d'angles à partir de rayons lumineux reçus sur des récepteurs ponctuels, d'autre part la mesure de position à partir d'images vidéo prises par des récepteurs plans (caméras).

Dans ce dernier cas, deux techniques se distinguent. Celle de l'extérieur vers l'intérieur (out side in) correspond à une ou plusieurs caméras fixes observant des mouvements de repères ponctuels de l'objet à localiser (Figure 29). La technique de l'intérieur vers l'extérieur (inside-out) correspond à une ou plusieurs caméras placées sur l'objet en mouvement à localiser et qui observent des repères ponctuels fixes (Figure 30).

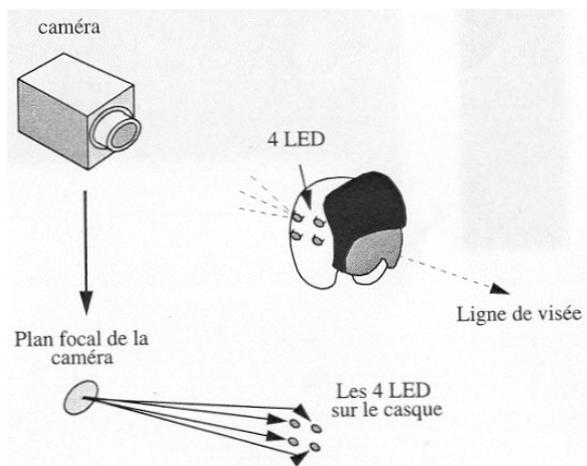


Figure 29 : Technique de l'extérieur vers l'intérieur pour un capteur de localisation optique, d'après Fuchs *et al.* [11]

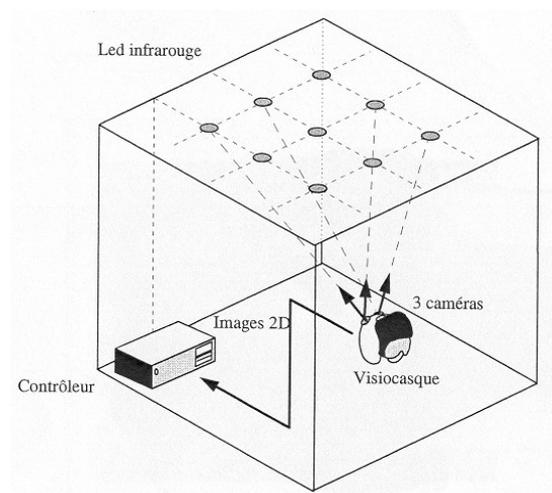


Figure 30 : Technique de l'intérieur vers l'extérieur pour un capteur de localisation optique, d'après Fuchs *et al.* [11]

## Techniques :

### TRAQUEURS AVEC RECEPTEURS PONCTUELS :

En 1991 au Centre d'Etudes et de Recherches de Médecine Aéronautiques (CERMA) prédécesseur de l'IRBA, M. Le Menn [18] développe un prototype de capteur de position de tête. Ces travaux s'inscrivent dans un contexte plus large d'aide au pilotage des avions de combat. Cette aide ne peut être apportée que si l'on connaît instantanément l'orientation que prend la tête du pilote. Le cahier des charges est un système de mesure de la direction de la tête, avec lequel le sujet ne doit pas être gêné dans ses mouvements. La mesure doit avoir une incertitude d'un degré d'angle environ et la position doit être fournie 100 fois par seconde. Un récepteur de type photodiode est placé sur un casque audio mobile. Le récepteur extérieur de référence est fixe. La méthode choisie utilise une lumière modulée en polarisation. La modulation permet de s'affranchir des variations parasites d'intensité lumineuse. L'étude se limite à la mesure de rotations dans le plan horizontal. Le sujet est équipé d'un casque audio

portant un détecteur photoélectrique recouvert d'un polariseur. La mesure du déphasage entre le signal issu du détecteur, et le signal issu d'un récepteur de référence fixe, est réalisée à l'aide d'un montage électronique approprié. Un traitement numérique effectué sur microordinateur permet de déterminer, sans ambiguïté, la valeur de l'angle de rotation entre  $0^\circ$  et  $360^\circ$ . Ce prototype n'a pas été développé par la suite.

Un exemple décrit par Fuchs [18b] est un traqueur conçu pour détecter le mouvement de la tête d'un pilote d'avion. Deux fins faisceaux lumineux plans tournent autour de deux axes de rotation parallèles sur le côté du cockpit. Des capteurs infrarouges détectent leurs passages sur le casque. La rotation angulaire des faisceaux est alors mesurée. Après calcul, deux angles d'orientation du casque peuvent être connus à partir de deux capteurs. Le nombre de capteurs augmente la qualité de détection des mouvements, (*cf.* d'après Ferrin *et al.* [19] et Figure 31).

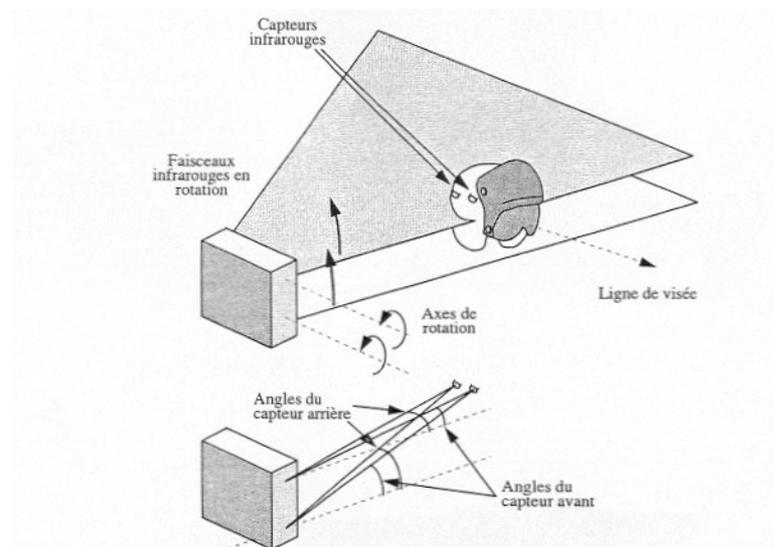


Figure 31 Capteur de localisation optique avec récepteurs ponctuels, Fuchs *et al.* [11]

Un autre type de traqueur conçu par Fenner [20] est basé sur un ensemble de LED et de récepteurs ponctuels. Le principe appliqué est la variation d'intensités reçues sur deux LED en fonction de leur position relative angulaire.

#### TRAQUEURS AVEC RECEPTEURS PLANS :

La position d'un objet à l'aide de deux ou trois caméras peut être calculée à partir du traitement d'images acquises.

#### TECHNIQUE DE L'EXTERIEUR VERS L'INTERIEUR (OUTSIDE-IN) :

Une balise optique ponctuelle est détectée par un capteur. La position angulaire de cette balise est calculée au moyen d'un traitement d'images. Plusieurs balises peuvent être repérées en ayant des codages lumineux différents. Cette technique a surtout été développée pour la détermination de trajectoires.

Le traqueur optique DynaSight de Origin Instruments Corporation (Figure 32) utilise cette technique afin de suivre le mouvement d'une paire de lunettes sur un sujet. Le capteur associé mesure à 65 Hz la position tridimensionnelle (3ddl) d'une cible très légère (10 mg) positionnée sur la paire de lunettes. Le capteur fonctionne avec des ondes proches des infrarouges. L'étendue de mesure est de 75° en élévation par 75° en azimut avec une profondeur de 1,5 m pour une cible de 7 mm jusqu'à une profondeur de 5 m pour une cible de 50 mm. Le temps de latence est de 9 à 28 ms. L'incertitude est de 2 mm latéralement et de 8 mm en profondeur. Un dispositif avec quatre cibles permet d'obtenir un traqueur à six ddl. Un système équivalent « Polaris » est produit par NDI (Figure 33).

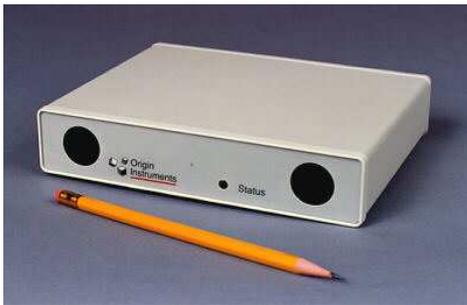


Figure 32 : Traqueur optique DynaSight pour le suivi de mouvement de tête, [www.orin.com](http://www.orin.com) (2012)



Figure 33 : Traqueur optique Polaris de NDI, [www.ndigital.com](http://www.ndigital.com) (2013)

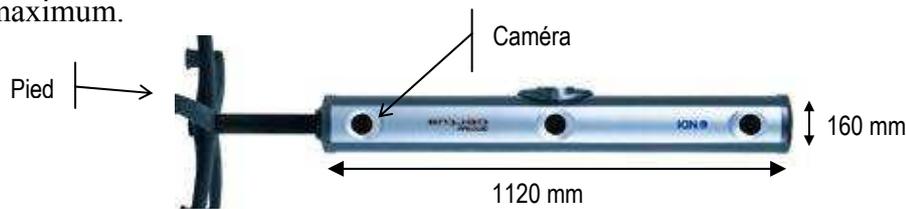
D'autres dispositifs similaires détectent des LED ou des cibles passives pour déterminer le mouvement d'un casque. Afin d'accroître l'étendue de mesure et la précision, plusieurs caméras sont nécessaires.

Le système Coda de Chamwood Dynamics composé de trois caméras suit en temps réel la position de LED infrarouges. Chacune identifiable, elles sont alimentées par des batteries portables. Le temps de latence est de 5 ms. La fréquence de mesure maximum est de 800 Hz. Cinquante-six LED sont identifiables et la résolution est de 0,1 mm. L'incertitude n'est pas mentionnée.

Dans le cas des précédents systèmes, les repères ponctuels se déplacent peu relativement à la rotation de la cible. L'exactitude est donc relativement faible en rotation. La caméra doit avoir un grand champ de vision relativement à ces mouvements de translation.

Dans le domaine de la métrologie, le système Optotrak de Northern Digital Inc (Figure 34) peut déterminer la position de 250 diodes émettrices infrarouges au moyen de trois caméras alignées et montées sur une poutre verticale d'un mètre environ. Les résolutions des caméras, équipées de lentilles cylindriques, sont «subpixel», meilleures que les caméras à CCD plan (1/200 000 au lieu de 1/4000). Les 24 diodes des pointeurs «crayons» réduisent les problèmes d'occultation lors de la manipulation. L'incertitude est de 0,1 mm pour une zone située à

2,25 m et sur une étendue de 1,3 m par 1,3 m. La fréquence de transfert des données est de 400 Hz maximum.



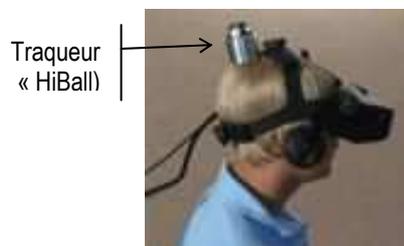
**Figure 34 : Capteur de localisation optique Optotrak Certus de Northern Digital Inc présenté à l'horizontale, [www.ndigital.com](http://www.ndigital.com) (2006)**

TECHNIQUE DE L'INTERIEUR VERS L'EXTERIEUR (INSIDE-OUT) :

De nombreuses diodes sont fixées dans l'environnement. Les mouvements relatifs des diodes par rapport aux caméras sont grands. Les champs de vision de celles-ci peuvent donc être limités. La personne, dont on veut localiser la tête doit supporter l'encombrement et le poids des caméras miniatures. Le traitement des images exige une grande puissance de calculs. La salle où évolue l'utilisateur doit être spécialement aménagée.

Un système développé par Wang [21] est composé de trois caméras sur un visiocasque et une série de diodes fixées sur le plafond d'une pièce. L'incertitude est au mieux de 1 cm et  $0,3^\circ$  pour une étendue de mesure correspondant à une pièce d'une surface sol de  $4 \times 4 \text{ m}^2$ .

Un prototype de traqueur « HiBall » développé depuis 1997 par UNC Tracker Research Group [22] (cf. Figure 35) offre une incertitude et une résolution submillimétriques et supérieures à  $2/100$  de degré sur une surface de  $46 \text{ m}^2$ .



**Figure 35 : Système Hiball de UNC Tracker research Group, [22]**

### ***Avantages et contraintes :***

Le choix de diodes électroluminescentes (LED) émettant dans les infrarouges rend insensible les mesures à la lumière ambiante. Les conditions de luminosité ne sont alors pas une contrainte. Au contraire, le choix d'observer des cibles ponctuelles dans le spectre visible nécessite une lumière ambiante.

Tout récepteur optique doit être en ligne de vue d'un émetteur et par conséquent l'espace de mesure est limité et des zones d'occultations peuvent exister. L'étendue de mesure augmente avec le nombre de récepteurs ou d'émetteurs.

Les systèmes optiques sont assez complexes à mettre en œuvre et présentent un coût élevé.

### Produits existants :

Le lecteur trouvera en annexe n°1 les caractéristiques des traqueurs optiques énoncés dans la partie 1.4.4. Parmi ceux-ci, deux produits différents sont illustrés par les figures 36 et 37.

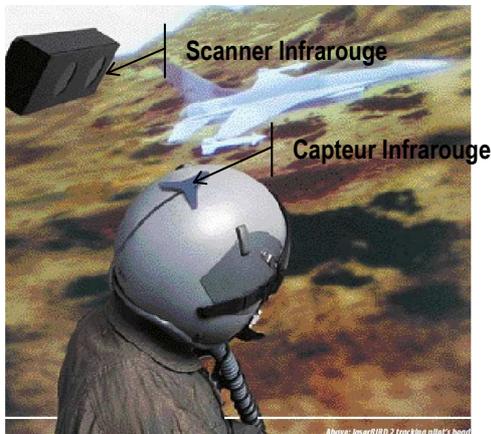


Figure 36 : Laser Bird 2 de Ascension Technology Corporation, pour simulateur de vol, [www.ascension-tech.com](http://www.ascension-tech.com) (2006)



Figure 37 : ARTtrack1 de Advanced Realtime tracking GmbH, [www.ar-tracking.com](http://www.ar-tracking.com) (2006)

L'IRBA est équipé d'un système VICON 460 avec six caméras (cf. Figure 38). La résolution et l'incertitude du système ne sont pas précisées par le constructeur (de l'ordre du millimètre d'après un utilisateur, communication personnelle avec M. Sandor en 2007). Ce type de système permet une capture vidéo qui est ensuite traitée par calcul. Une option temps réel du système VICON existe mais les performances ne sont pas annoncées précisément. Ce système peut être envisagé comme référence pour étalonner en dynamique et en différé un autre type de traqueur.



Figure 38 : Système Vicon avec caméra muni de LED infrarouges et marqueurs auto-réfléchissants, [www.vicon.com](http://www.vicon.com) (2007)

### 1.1.4.5. Capteurs inertiels

Les différents types de capteur inertiel exploités en combinaison dans le domaine de la réalité virtuelle sont les gyromètres, les gyroscopes et les accéléromètres. Ces capteurs sont décrits par Asch *et coll.* [23].

#### **Principes :**

Le capteur inertiel mesure des caractéristiques du mouvement en temps réel telles que les vitesses de rotation d'un objet ou l'accélération. Le principe du gyroscope repose sur l'immobilité dans l'espace de l'axe de rotation d'une masse tournant à grande vitesse. L'orientation de l'objet est déterminée à chaque instant à partir de son orientation initiale (gyromètre). A partir de la connaissance de la position et de la vitesse initiale d'un objet, sa position tridimensionnelle (3ddl) est déterminée à chaque instant par la mesure en temps réel des accélérations de l'objet en translation. On calcule la position par intégration simple (gyromètre) ou double (accéléromètre).

#### **Accéléromètres :**

##### Techniques :

Les accéléromètres sont basés sur la mesure d'une force provenant de l'accélération d'une masse. Les accéléromètres peuvent être employés en boucle ouverte ou en boucle fermée. Pour la mesure en boucle ouverte, la force est mesurée par le faible allongement d'un ressort supportant la masse. Cette mesure est détectée par principe piézo-électrique (*cf.* Figure 39), piézorésistif, à jauges de contrainte ou à variation de capacité. Pour les accéléromètres en boucle fermée on crée une force opposée à la force inertielle, annulant le déplacement de la masse. Cette force d'opposition est créée par un système moteur dont la commande est fonction de cette force, donc de l'accélération.

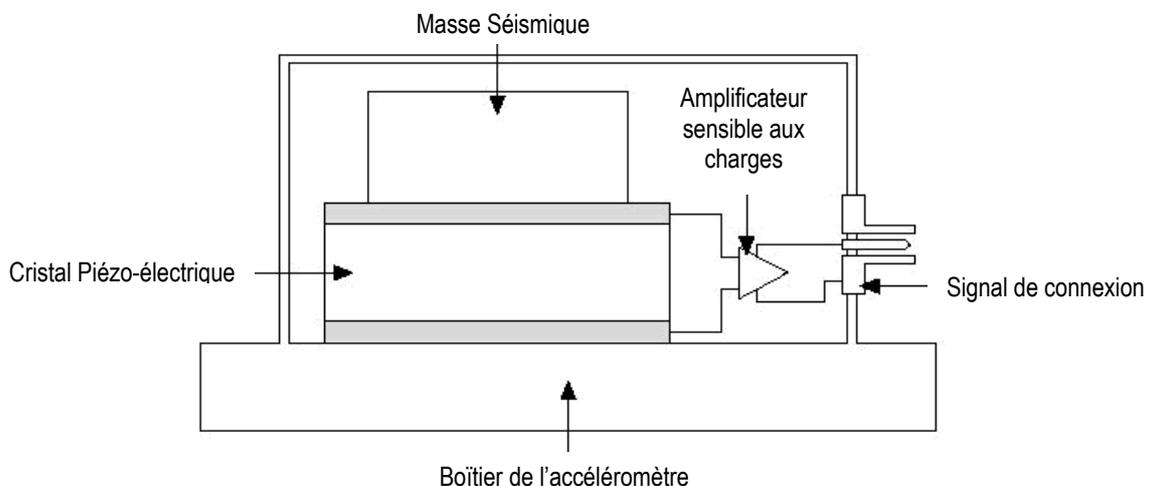


Figure 39 : Schéma d'un accéléromètre, d'après [www.ni.com](http://www.ni.com) (Capteurs de vibrations 28/04/2011)

---

### Avantages et contraintes :

Pour ce type d'accéléromètre en boucle ouverte, un problème classique de compromis est à faire entre précision et rapidité de réponse. La technique en boucle fermée permet d'obtenir des accéléromètres de meilleure précision.

La mesure de position de l'objet en mouvement est obtenue par intégration. En cas de double intégration (accéléromètre), les erreurs de position augmentent au carré. Les dérives dans le temps sont le principal inconvénient de ce type de traqueur. L'accélération terrestre est à prendre en compte dans les mesures. Des accéléromètres miniatures existent.

### Produits existants :

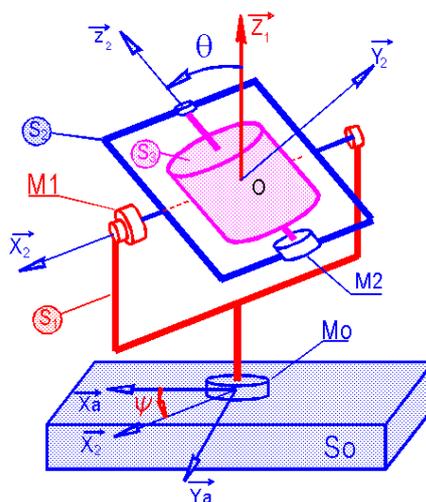
Ce type de capteur est rarement utilisé seul et est employé dans des systèmes de traqueurs comportant d'autres types capteurs.

### ***Gyroscope et Gyromètre :***

D'après Radix [24a], un gyroscope est un dispositif qui permet d'effectuer une mesure de la rotation de son boîtier vis-à-vis de l'espace absolu. Le gyroscope est un appareil capable de fournir une direction physique de référence et corrélativement une information de rotation angulaire. Un gyromètre permet d'effectuer une mesure d'une ou deux composantes de la rotation instantanée (vitesse angulaire) absolue de son boîtier. Dans un certain nombre de cas, un même appareil peut être capable de fonctionner en gyroscope ou en gyromètre.

### Techniques :

Le gyroscope à suspension de cardan indique une direction constante grâce à une masse (toupie) en rotation autour de son axe de révolution. La toupie du gyroscope est reliée au niveau de son centre d'inertie à une suspension de cardan qui permet à la toupie de s'orienter dans toutes les directions (*cf.* Figure 40). La mesure de position de l'objet en mouvement est obtenue à partir de la vitesse par intégration.



**Figure 40 : Schéma d'un gyroscope à cardan d'après Guiziu [24b]**

---

Le gyroscope de la société Murata est de type piézoélectrique. Le principe de fonctionnement est basé sur l'effet Coriolis. Un prisme triangulaire piézoélectrique, possède une face excitatrice et les deux autres réceptives. Au repos, l'excitateur fournit des impulsions périodiques reçues sur les deux autres faces de façon identique. Un quelconque mouvement de rotation du prisme produit des forces de Coriolis, ce qui augmente l'amplitude du signal de réception sur un détecteur par rapport à l'autre. La différence entre les deux signaux fournis par les détecteurs est proportionnelle à la vitesse de rotation. La rotation angulaire est obtenue après intégration. Dans le cas d'une mesure absolue de position, un recalage est nécessaire pour réduire la dérive des mesures. Le traqueur gyroscopique de la société VR Systems utilise ce procédé.

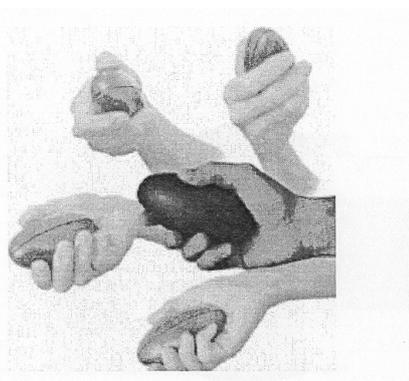
#### Avantages et inconvénients :

Les gyroscopes à suspension de Cardan présentent le défaut d'avoir une dérive dans le temps de l'ordre de plusieurs degrés par minute. Des dispositifs miniaturisés existent. Le poids peut être inférieur à 50 g. Dans certaines applications en réalité virtuelle, la mesure de rotation de la tête concerne plutôt la rotation relative que la rotation absolue.

#### Produits existants :

Le traqueur «Gyropoint II Pro» de IXMicro Gyropoint à 3 ddl est «sans fil» et est basé sur des gyroscopes à «état solide». La forme du traqueur est ergonomique (Figure 41). L'utilisateur peut le manipuler aisément en rotation afin de faire évoluer un objet virtuel.

Le capteur inertiel InterTrax2 à technique inertielle de Intersense mesure trois degrés de liberté, les trois rotations sur 360°. Ce capteur équipe en standard des traqueurs de visiocasques comme Glassiron de Sony et Scuba de Philips.



**Figure 41 : Le traqueur Gyropoint II Pro sans fil de IXmicro Gyropoint, copyright photo IXMicro Gyropoint**

#### 1.1.4.6. Capteurs à champ naturel (gravitationnel ou magnétique)

##### **Principe :**

Le principe du capteur à champ naturel repose sur une mesure sans source émettrice artificielle. Les champs gravitationnels ou magnétiques du globe terrestre sont généralement exploités. Les modifications d'orientation par rapport aux lignes du champ permettent de déterminer l'orientation du capteur.

##### **L'inclinomètre :**

L'inclinomètre utilise le champ gravitationnel de la terre comme source émettrice naturelle. Sans mouvement, l'inclinomètre indique sa position angulaire avec la verticale du lieu. En mouvement, l'inclinomètre indique la direction de la force extérieure totale sur lui, due à l'accélération du mouvement et à l'attraction terrestre. Un constructeur propose un inclinomètre basé sur le principe d'un contenant parallélépipédique rempli de liquide visqueux. Une lumière est émise sur une face et est recueillie sur la face opposée. La quantité de lumière recueillie est fonction de l'angle d'inclinaison (Figure 42).

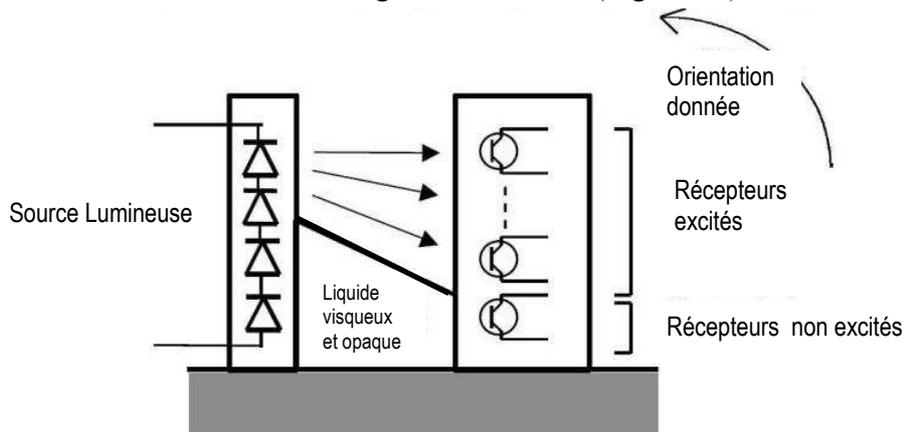


Figure 42 : Principe d'un inclinomètre, d'après Baillot *et al.* [25]

##### **Le compas :**

La terre crée un grand champ magnétique qui peut être utilisé pour des mesures de position. Les compas électroniques miniatures exploitent principalement l'effet Hall (*cf.* [26]). Ce phénomène consiste en une apparition d'une différence de potentiel dans une plaque métallique très mince, quand on place celle-ci dans un champ magnétique normal à son plan. Avec deux capteurs à effet Hall perpendiculaires entre eux, le nord magnétique terrestre peut être déterminé. Un traqueur d'orientation à trois degrés de liberté peut être réalisé avec plusieurs compas combinés avec un inclinomètre. L'entreprise Intersense a plusieurs traqueurs d'orientation à technologie inertielle (Figure 43). Le dispositif inertiel mesure les vitesses angulaires de rotation avec un gyroscope, l'attraction terrestre avec un inclinomètre et le champ magnétique terrestre avec des compas.



Figure 43 : Traqueur de tête InterTrax2 à 3 ddl d'orientation à technologie inertielle monté sur des lunettes stéréoscopiques, [www.insense.com](http://www.insense.com) (2005)

Ce type de traqueur a pour principal inconvénient d'être perturbé par les pièces métalliques environnantes et par les variations locales du nord magnétique. Ce problème est moindre dans le cas de l'emploi de mesures exclusivement relatives.

#### 1.1.4.7. Traqueurs hybrides

Différents types de capteurs ne fournissent, directement ou indirectement, la mesure que d'un degré de liberté. Afin de réaliser des traqueurs de position à trois ou six ddl, d'autres capteurs « mécaniques » ou « non-mécaniques » sont ajoutés (cf. Figure 44). L'avantage d'un tel dispositif est en général une étendue de mesure accrue.

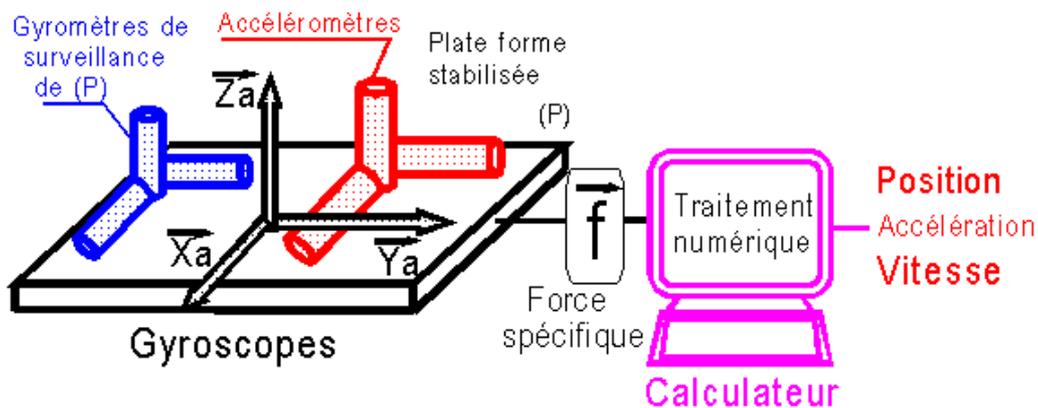


Figure 44 : Diagramme fonctionnel de traqueur hybride

#### **Traqueurs hybrides de la marque Intersense :**

Par exemple, le dispositif inertiel miniature IS 300 Pro produit par l'entreprise Intersense mesure les vitesses angulaires de rotation avec un gyroscope, l'attraction terrestre avec un inclinomètre et le champ magnétique terrestre avec des compas. Les vitesses de rotation dans les trois directions sont intégrées pour obtenir les trois rotations. L'inclinomètre et le compas sont utilisés pour compenser les dérives du gyroscope. Un algorithme de prédiction du

mouvement diminue le temps de retard dans la boucle «action - perception» de tout système de réalité virtuelle. La portée des appareils est limitée en pratique uniquement par la longueur des câbles. Il n'y a pas de problème d'occultation. La fréquence maximale d'échantillonnage est 500Hz. La vitesse maximale de rotation permise est de 1200°/sec. La résolution est de 0,02° rms et l'incertitude est de 3° rms.

Foxlin *et al.* [12] évaluent un capteur hybride à six degrés de liberté de type acoustico-inertiel IS-600 Mark 2 commercialisé par la société Intersense comme capteur de position de tête (Figure 45). Quatre récepteurs à ultrasons sont aux extrémités d'une croix et complètent les mesures (trois rotations) transmises par la centrale inertielle. Le capteur inertielle est le InertiaCube et le capteur acoustique est le SoniDiscs. Les performances mesurées au moyen de deux systèmes de mesure (statique et dynamique) sont les suivantes : résolution de 0,02° rms et précision statique de 0,25° rms. La précision dynamique est de l'ordre 1,5° pour un mouvement rapide de tangage. L'instabilité en position est de 0,5 mm rms, l'incertitude statique supérieure à 1 mm et l'incertitude dynamique supérieure à 3 mm. Le traqueur hybride IS-900 est comparable au modèle 600 Mark2.

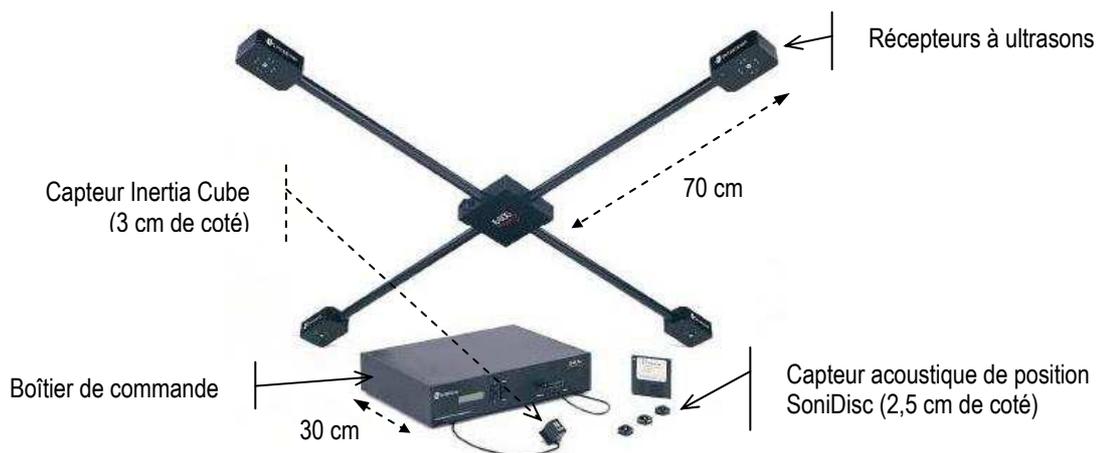


Figure 45 : Traqueur 600 Mark2 de Intersense, [www.isense.com](http://www.isense.com) (2007)

### Traqueur hybride Kinect :

Récemment (2011), Microsoft distribue le périphérique connu sous le nom Kinect et destiné à la console de jeux vidéo Xbox 360. Cet équipement permet de contrôler des jeux vidéo au moyen de notre propre corps sans utiliser de manette. Ce traqueur hybride utilise des techniques d'interaction développées par la société PrimeSense. Le traqueur Kinect est une barre horizontale reliée à une petite base avec un pivot motorisé, conçu pour être placé au-dessus ou en dessous de l'affichage vidéo (téléviseur, écran d'un ordinateur). Le dispositif comporte une caméra RGB, un capteur de profondeur et un microphone multi-réseau, qui fournissent la capture du mouvement du corps en 3D, la reconnaissance faciale et la reconnaissance vocale (cf. figure 46). La caméra interprète les informations sur la scène 3D obtenue à travers une lumière infrarouge structurée et projetée en continu. Ce système de scanner 3D appelé « Light Coding » utilise une variante de la reconstruction 3D basée sur l'image. Le capteur de profondeur se compose d'un projecteur laser infrarouge combiné à un capteur CMOS monochrome. Ce capteur capture des données vidéo en 3D dans toutes les conditions de lumière ambiante. Le rayon de détection de ce capteur est réglable, et le logiciel de Kinect est capable de calibrer automatiquement le capteur en fonction des spécificités du jeu vidéo ou de l'environnement physique du joueur, pouvant accueillir la présence des meubles ou d'autres obstacles. Parmi les caractéristiques de ce traqueur, celles relatives au champ de vision du traqueur sont les suivantes :

- Champ de vision horizontal :  $57^\circ$
- Champ de vision vertical :  $43^\circ$
- Marge de déplacement du capteur :  $\pm 27^\circ$
- Portée du capteur : 1,2 m à 3,5 m ;

Cette technologie est destinée à l'origine au grand public avec un prix d'environ 150 €. Etant donné son faible prix, l'utilisation de ce traqueur s'est propagée dans le monde industriel et de la recherche notamment en robotique. Cela a suscité le développement d'une multitude de programmes informatiques et de pilotes en Open source notamment sous Windows afin d'utiliser les potentialités de ce traqueur.

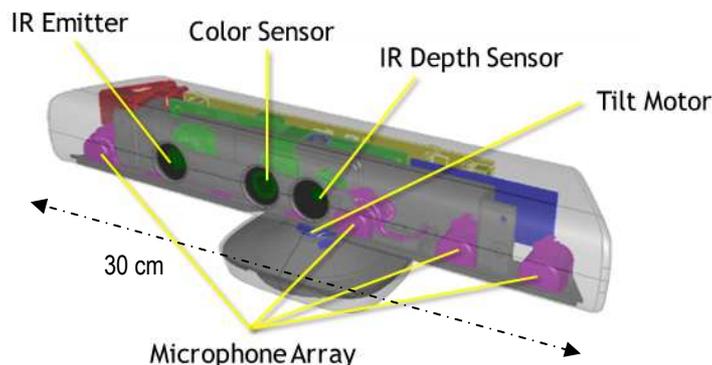


Figure 46 : Traqueur Kinect et ses capteurs, [www.msdn.microsoft.com](http://www.msdn.microsoft.com) (26/03/2013)

Khoshelham et Elberink [27] étudient l'exactitude et la résolution de profondeur fournie par le traqueur Kinect. L'erreur aléatoire de la mesure de la profondeur augmente en fonction de la distance du traqueur et varie de quelques millimètres jusqu'à 4 cm à la distance maximale de fonctionnement.

---

#### 1.1.4.8. Spécificités de traqueur dédié au Son3D

Emploi de traqueur : Pour rappel, la restitution au moyen d'un casque du son 3D en dynamique à des auditeurs nécessite l'asservissement de la présentation des informations sonores aux mouvements de tête. Un traqueur de mouvement de tête est donc nécessaire.

Lors d'expérimentation dans le domaine du Son3D, une autre application du traqueur concerne l'évaluation des performances de localisation des auditeurs en réponse à un stimulus sonore. Ces dernières peuvent être évaluées par la désignation de la position du son perçu. A cette fin, la source sonore virtuelle perçue peut être pointée par le sujet soit directement au moyen d'un viseur de casque dans l'espace de l'expérimentation soit indirectement en transposant la perception de la source sonore virtuelle sur une petite sphère au moyen d'un stylet. Dans ces deux méthodes, un ou plusieurs traqueurs de position sont nécessaires.

Contrainte angulaire et volumique : Dans le cadre de l'application du son 3D dans un poste de pilotage d'aéronef, le volume d'emploi du capteur de position de tête est restreint. D'après une expérimentation de Guillaume *et al.* [28] menée à l'IMASSA, la tête d'un sujet assis peut atteindre un angle en flexion-extension de  $-55^\circ$  à  $+70^\circ$ , un angle en inclinaison latérale de  $\pm 50^\circ$ , et un angle en rotation axiale de  $\pm 80^\circ$ . Le traqueur de position de tête doit donc pouvoir fonctionner à ces amplitudes d'angles.

Dans le cadre d'expérimentation en laboratoire, la désignation au moyen d'un stylet de la source sonore virtuelle perçue par la transposition sur une sphère est contenue dans un volume inférieur à  $\frac{1}{8}$  de  $m^3$ . Par contre les angles du stylet ne sont pas utilisés. Dans le cadre de l'utilisation de deux traqueurs, l'un pour l'écoute et l'autre pour la désignation, le volume nécessaire de la portée du traqueur est étendu à  $\frac{1}{4}$  de  $m^3$ .

Contrainte temporelle : D'après une étude de Brungart [29], une augmentation du temps de réponse et de l'erreur de position angulaire (écart entre la position jouée de la source sonore virtuelle et la position perçue par le sujet) apparaît lorsque la latence du système de poursuite est supérieure à 70 ms. C'est une contrainte temporelle car latence du traqueur ne représente qu'une partie de la latence totale du système Son3D. Par conséquent la durée des traitements en temps réel des mesures de positions et d'orientations ne devra pas dépasser typiquement 10 ms.

Exactitude requise : Les performances binaurales chez l'homme sont au mieux de  $\pm 1^\circ$  en gisement. Pour la tâche de désignation, cette incertitude se traduit sur la sphère par une incertitude de mesure de  $\pm 8$  mm pour les coordonnées cartésiennes. Comme nous souhaitons pouvoir mesurer cette valeur de  $\pm 8$  mm, il faut que l'incertitude de mesure du traqueur soit inférieure. D'après les premiers essais de reproductibilité en pointage sur la sphère, nous fixons cette incertitude à  $\pm 3$  mm.

---

Contraintes expérimentales : Pour la partie de l'étude Pertia en laboratoire, l'évaluation des performances de localisation du Son3D des auditeurs équipés d'un casque de vol se déroulera dans une chambre réverbérante avec un bruit de cabine d'hélicoptère (100dB) et dans la pénombre.

Contrainte budgétaire : Le coût d'un traqueur varie de 300 € à 300 k€, et la majorité des traqueurs expérimentaux proviennent des Etats-Unis. La contrainte budgétaire de cette étude est de moins de 10 k€ pour l'acquisition du traqueur.

Type de traqueur : Le but n'est pas de développer un nouveau type de traqueur. Dans le domaine de la restitution du son 3D en dynamique, le traqueur employé est généralement de type électromagnétique. A notre connaissance, aucun traqueur optique n'est employé en pratique pour la restitution du son 3D. Des traqueurs hybrides commencent à être développés et utilisés par certaines entreprises.

### **1.1.5. Comparatif entre les différents traqueurs**

Les caractéristiques métrologiques et les critères à comparer dans le choix des traqueurs sont notamment les suivants :

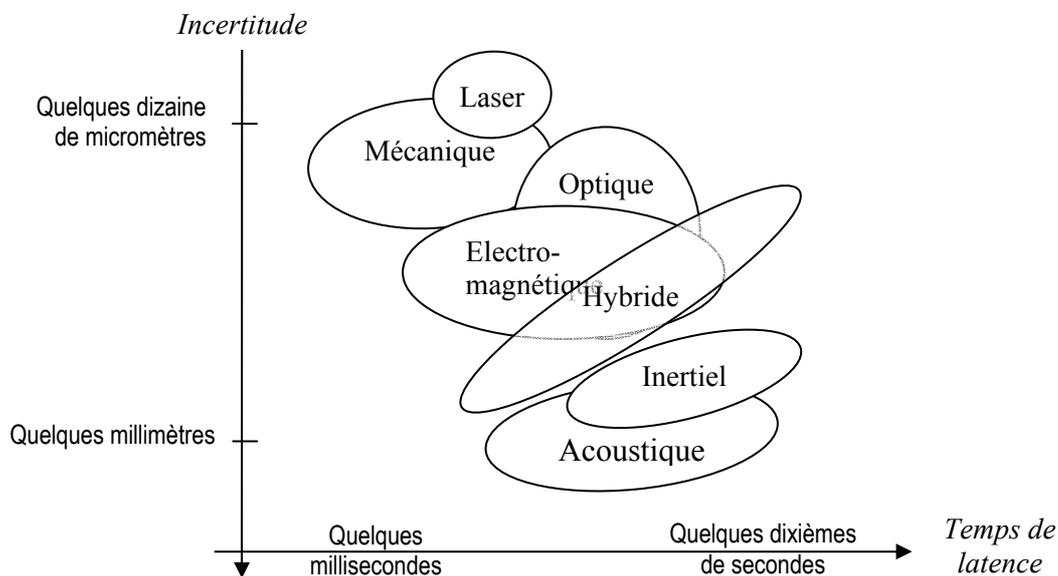
- le temps de réponse global (latence)
- les précisions obtenues
- la fréquence de transmission des mesures à l'ordinateur
- l'étendue de mesure
- les contraintes d'utilisation
- la qualité ergonomique et la compatibilité aux intégrations sensori-motrices et mentales

En annexe 1, le lecteur trouvera un tableau renseigné selon de multiples critères qui permet de comparer les caractéristiques d'un grand nombre de traqueurs et de capteurs de position.

D'après Fuchs *et al.* [11], d'un point de vue métrologique, les traqueurs mécaniques mesurant des distances sont intrinsèquement les meilleurs. Le schéma (Figure 47) illustre de façon relative et approximative le domaine d'incertitude en fonction du temps de latence pour chaque type de traqueur. Par manque de qualité ergonomique, ces traqueurs ne sont pas développés et les rares prototypes sont peu employés. Les traqueurs à champs gravitationnels n'offrent pas une grande exactitude. Les traqueurs électromagnétiques sont performants mais ces appareils ne peuvent être exploités dans un environnement métallique sans précaution. Les traqueurs à ultrasons ont une exactitude faible. Ils sont influençables par la température et l'humidité ambiantes et sont perturbés par les bruits ultrasonores parasites. La zone d'étendue de mesure pour les orientations est plus limitée que pour les traqueurs électromagnétiques. Les traqueurs optiques présentent le même inconvénient que les traqueurs à ultrasons

concernant l'espace limité de mesure. Les traqueurs optiques sont réservés en général à des applications spécifiques et non à la réalité virtuelle.

Kindratenko [30] réalise une étude comparative des incertitudes de deux systèmes de traqueur, l'un électromagnétique Bird (FoB), l'autre hybride à base d'ultrason et inertiel IS-900 dans un grand volume d'essai. Les résultats relatifs aux points de mesure à une distance de  $\pm 1,25$  m montrent une meilleure exactitude pour le système hybride : erreur moyenne sur l'ensemble des points mesurés en position de 19 mm contre 33 mm même après étalonnage. Par contre, en orientation l'erreur moyenne est de  $3^\circ$  avec l'IS-900 contre une erreur moyenne inférieure à  $1^\circ$  avec le système FoB étalonné). L'incertitude en fonction de la configuration des émetteurs de l'IS-900 est par ailleurs étudiée. Les traqueurs hybrides semblent une solution d'avenir qui demande à être encore développée et améliorée en exactitude.



**Figure 47 : Domaine d'incertitude en fonction du temps de latence pour chaque type de traqueur.**

---

## 1.2. **Étalonnage des traqueurs de position en laboratoire**

Ce chapitre est rédigé en grande partie d'après une étude des techniques d'étalonnage des capteurs électromagnétiques de position par Kindratenko [31]. Les traqueurs électromagnétiques sont principalement étudiés parce qu'ils sont le plus souvent employés dans le domaine du son 3D qui nous intéresse. Ce chapitre est organisé de la façon suivante : premièrement le principe d'étalonnage est expliqué. Les facteurs d'erreurs des traqueurs électromagnétiques sont identifiés. Ensuite, une description détaillée de l'ensemble des techniques de correction d'erreur de position et d'orientation est présentée et synthétisée dans tableau. Puis, les techniques et moyens d'acquisition de données employées par les différents auteurs sont décrits. La partie finale traite des applications logicielles.

### 1.2.1. **Principe de l'étalonnage**

Plusieurs technologies [32] peuvent être utilisées pour déterminer la position d'un utilisateur dans les applications de la réalité virtuelle tel que le CAVE [33]. Jusqu'ici, les systèmes électromagnétiques de poursuite de position ont été la technologie la plus largement utilisée. Ils sont relativement peu onéreux, offrent un espace de travail assez vaste, comportent une assez bonne résolution avec une acceptable stabilisation, sont faciles à utiliser, et ne souffrent pas du problème de ligne de vue directe. Cependant, ils présentent un problème inhérent de précision à cause de la dépendance des mesures au champ proche électromagnétique qui peut être aisément déformé. De plus, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur augmente, l'incertitude augmente. Un moyen d'améliorer le système est de l'étalonner de telle sorte que les erreurs de capture de position peuvent être efficacement compensées.

D'après Zachmann [34], sur l'image de gauche (voir Figure 48) le véhicule virtuel est déformé en l'absence de correction du champ magnétique cartographié. Cet effet est accentué lors de mouvement. Sur l'image de droite, après application d'une correction la perspective est correcte même en dynamique.

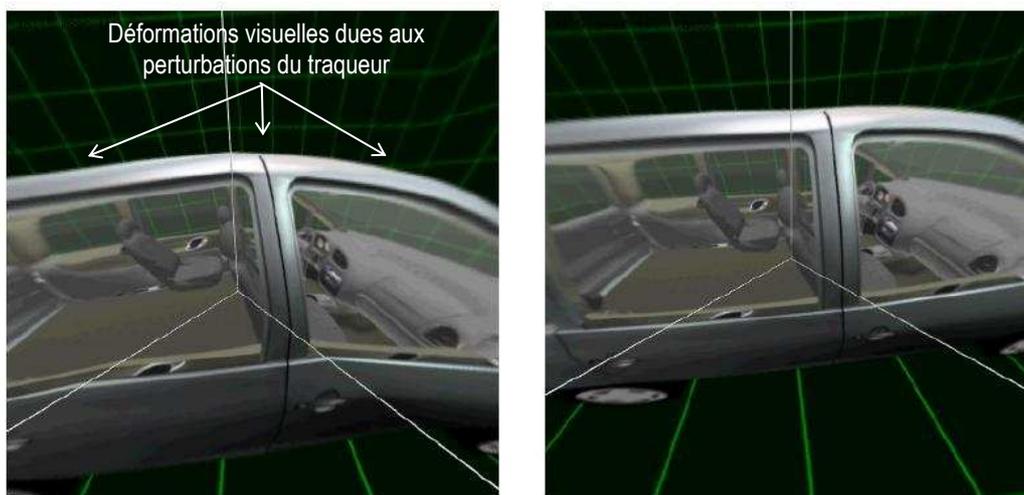
Une solution pour annuler les erreurs statiques dans les systèmes de traqueur électromagnétique est de compenser les erreurs de mesure au moyen des relations établies expérimentalement entre la position et l'orientation réelle du récepteur et celle donnée par le système de poursuite de position. Cette procédure est communément appelée « étalonnage du traqueur ». En postulant que la position de l'émetteur est fixe et que l'environnement métallique n'évolue pas, l'erreur statique est fonction uniquement de la position du récepteur. La procédure consiste expérimentalement à employer une table d'étalonnage qui comporte les positions exactes du capteur du traqueur et les positions correspondantes enregistrées. Ces positions sont comprises dans le volume opérationnel du système. Ainsi, la fonction de distorsion du champ peut en être déduite numériquement. Plusieurs techniques analytiques permettant de calculer la fonction de distorsion du champ ont été proposées. Elles sont

décrites dans ce chapitre. Une fois que la fonction est connue, elle peut être utilisée pour calculer les erreurs de position et d'orientation à n'importe quel emplacement désigné dans le volume de fonctionnement du système. Cette erreur peut alors être soustraite des valeurs désignées de telle sorte que la position exacte et non déviée soit trouvée.

Plusieurs techniques d'étalonnage ont été proposées pendant la dernière décennie. Chaque auteur définit le problème d'étalonnage du capteur pour sa propre étude dans le cadre d'une application spécifique. Cela rend difficile d'interpréter les résultats et de comparer les différentes techniques. Par conséquent, une revue complète de l'état de l'art dans ce domaine est nécessaire. Il s'agit d'examiner les techniques d'étalonnage des capteurs avec pour objectif de définir une trame commune, identifiant et classant les différentes techniques rapportées dans la littérature.

Jusqu'à récemment, l'étalonnage des capteurs électromagnétiques était rarement effectué en pratique pour deux raisons principales : l'absence de logiciel et des difficultés liées à l'acquisition des données. Cette enquête montre que ce n'est plus le cas. La recherche menée dans la décennie passée aboutit au développement de méthodes améliorées d'étalonnage ainsi que de techniques et logiciels d'acquisition de données. Au moyen d'un logiciel disponible et gratuit ainsi que d'un équipement simple et peu onéreux, on peut maintenant étalonner un système électromagnétique de poursuite juste en quelques heures et avec peu de ressources.

Le problème d'étalonnage d'un traqueur en laboratoire est généralement présenté comme un problème d'interpolation en trois dimensions. Toutes les techniques d'étalonnage répertoriées dans cette étude sont classées selon des méthodes locales ou globales et groupées selon leurs modèles mathématiques associés.



**Figure 48 : Vues de synthèse d'un véhicule avant (image de gauche) et après correction (image de droite) du champ magnétique cartographié, d'après Zachmann [34]**

### 1.2.2. Spécificités des erreurs

D'après Frantz *et al.* [35] en 2001, pour la plupart des systèmes électromagnétiques de poursuite 3D, les erreurs ne sont pas distribuées uniformément dans l'espace et suivent des distributions analytiques. La figure 49 représente plusieurs spécificités des erreurs et la variation de la précision du traqueur Aurora en version Beta. Les graphes du haut montrent les variations des erreurs RMS en distance pour la série de mesures et pour la répartition en histogramme dans tout le volume mesuré (cercles et barres vides). De même l'erreur en distance avec un intervalle de confiance de 95% est représentée (cercles et barres pleins). Les graphiques inférieurs montrent des résultats analogues pour les erreurs d'orientation.

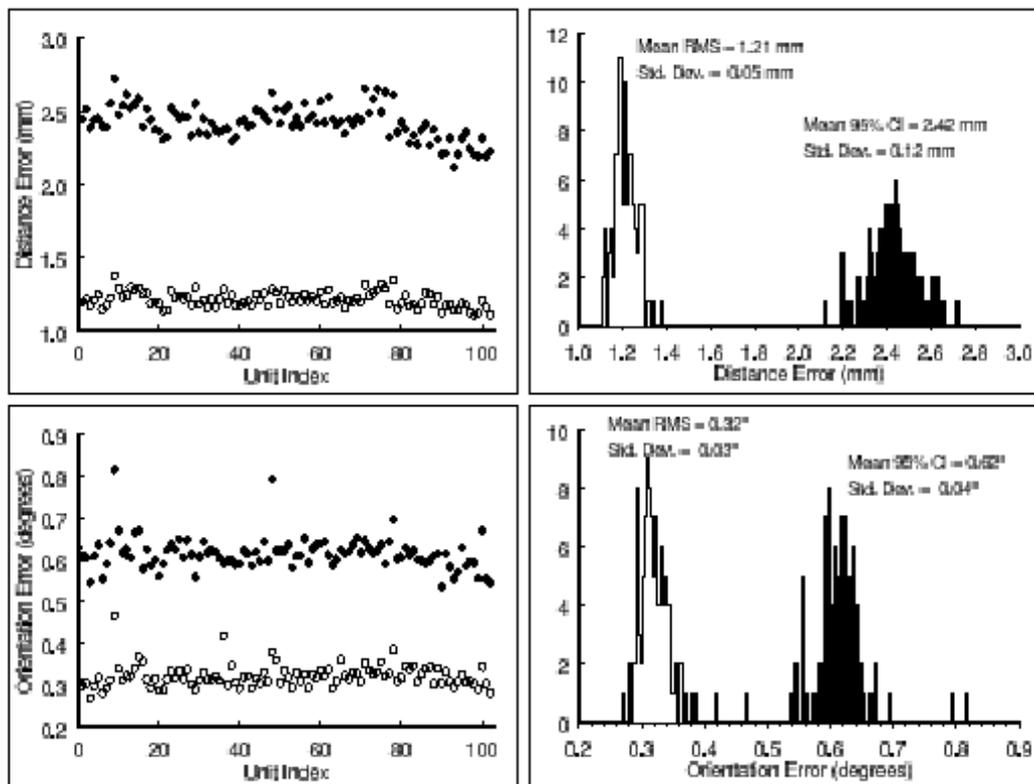


Figure 49 : Différentes représentations des erreurs d'un traqueur, d'après Frantz *et al.* [35],

Tian *et al.* [36] en 2001 étudient l'étalonnage d'un traqueur électromagnétique dans le cas de distorsions non constantes dans le temps et dans une situation relativement dynamique. Les auteurs définissent ces erreurs comme des distorsions quasi-statiques pour la localisation et l'orientation.

Wiles *et al.* [37] en 2004 étudient les systèmes optiques de poursuite notamment le système Polaris de la société NDI. Cette entreprise a développé un système d'amélioration de l'exactitude basé sur une barre étalon ou sur d'autres objets rigides pris comme références. La figure 50 illustre un objet étalon utilisé pour un traqueur optique. Les erreurs de mesure obtenues en distance pour plus de 1500 positions (x,y,z) dans un volume de 1,6 m<sup>3</sup> sont les suivantes : l'erreur moyenne est de 0,19 mm rms et l'erreur élargie avec un intervalle de confiance de 95% vaut 0,45 mm. En orientation, l'erreur moyenne est de 0,38° rms et l'erreur

élargie avec un intervalle de confiance de 95% vaut  $0,71^\circ$ . A noter que la loi de répartition n'est pas normale mais est similaire à une distribution de Maxwell. La figure 51 représente spatialement les erreurs de position mesurées. L'anormalité de la répartition des erreurs y est remarquable.

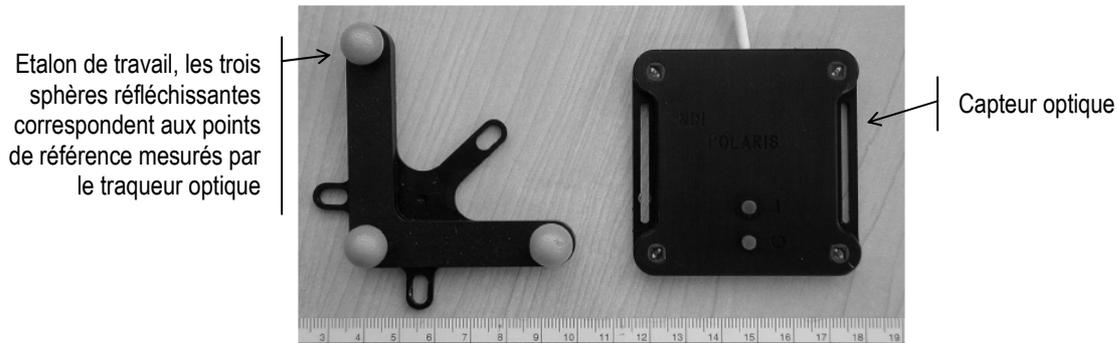


Figure 50 : Objet d'étalonnage optique (Wiles *et al.* [37])

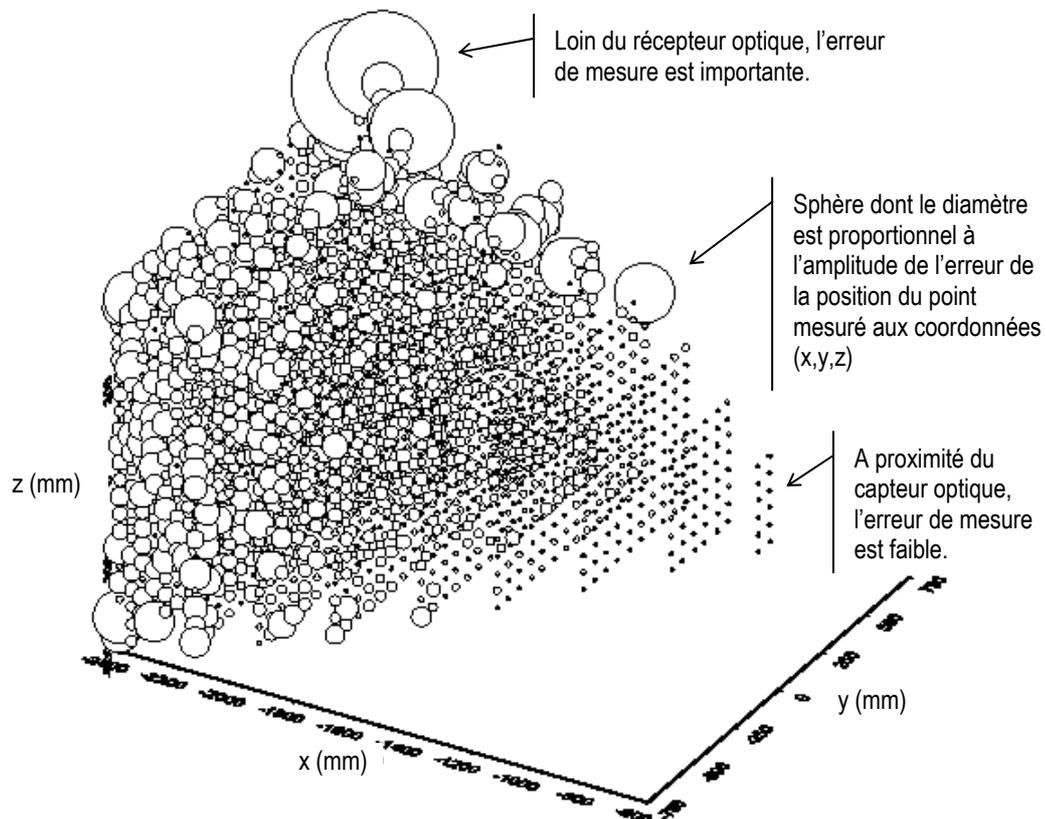


Figure 51 : Représentation spatiale des erreurs de position mesurées avec le système optique Polaris d'après Wiles *et al.* [37]

D'après une étude de Kindratenko [31], la synchronisation du taux d'échantillonnage d'un traqueur électromagnétique avec les fréquences du secteur ou avec la fréquence de l'écran permet via l'application d'un filtrage additionnel, une compensation suffisante pour les erreurs dynamiques. Cette possibilité est accomplie par l'électronique du traqueur. La correction des erreurs statiques, bien qu'elle soit unique pour chaque installation, nécessite une connaissance préalable des origines de la distorsion du champ.

---

### 1.2.3. Facteurs d'erreur électromagnétiques

A cause de la dépendance des mesures dans un champ électromagnétique proche, les systèmes de poursuite sont sensibles à l'environnement voisin électromagnétique. S'il y a du métal, ou d'autres matériaux conducteurs, ou un équipement qui produit un champ électromagnétique à proximité de l'émetteur ou du récepteur du traqueur, les signaux de l'émetteur sont déformés et les mesures résultantes comportent l'ensemble des erreurs statiques et dynamiques. Les erreurs de position en dynamique sont celles qui changent au cours du temps et elles sont principalement dues aux changements des champs électromagnétiques externes. Les erreurs de position en statique sont celles qui restent constantes au cours du temps. Elles sont principalement causées par les distorsions des champs électromagnétiques produites par du métal environnant.

Une étude des effets des métaux et des champs interférant sur les traqueurs électromagnétiques est menée Nixon *et al.* [38]. Les effets de champs interférents présents dans un environnement typique de travail sont étudiés au moyen de plusieurs expériences sur deux systèmes de traqueurs : le modèle Fastrak et le modèle Bird. L'étude montre que les champs extérieurs sont majoritairement dus au secteur du réseau électrique et aux écrans, et que le traqueur FoB est affecté plus sévèrement que l'appareil Fastrak.

#### Effet de la fréquence d'échantillonnage sur l'écart type du bruit de la position du récepteur :

Pour le traqueur Fastrak, l'écart type des positions non filtrées est compris entre 0,2 mm et 0,25 mm selon la fréquence d'échantillonnage sélectionnée entre 20 et 120 Hz. Pour le traqueur Bird, l'écart type des positions non filtrées varie de 30 mm à 70 mm dans les mêmes conditions. L'emploi d'un filtre RIF à deux coefficients réduit significativement l'écart type des positions. Le choix d'une fréquence d'échantillonnage du Bird double de celle du secteur réduit considérablement l'écart type des positions filtrées.

#### Effet de la synchronisation de la fréquence d'échantillonnage du traqueur sur la fréquence secteur ou écran :

Pour une distance inférieure à 300 mm entre l'écran et le récepteur, la synchronisation du traqueur Fastrak à la fréquence de l'écran (70 Hz) réduit les interférences plus efficacement que lorsqu'il est synchronisé aux fréquences du secteur. L'écart type des positions du traqueur Fastrak est d'un ordre 100 fois plus petit que celui du Bird et présente des valeurs minimales de quelques dixièmes de millimètres. Au-delà de 300 mm de séparation entre l'écran et le récepteur et dans les mêmes conditions, l'erreur de position avec le traqueur Fastrak devient 10 fois plus petite.

#### Effet des interférences induites par les câbles du traqueur :

A cause de la proximité du câble de l'émetteur à côté du récepteur, les erreurs de position peuvent atteindre 500 mm. Une séparation d'au moins 400 mm entre le câble de l'émetteur et

---

le récepteur est nécessaire pour réduire les interférences au niveau du bruit électrique ambiant. La proximité du câble du récepteur à côté de l'émetteur est une source d'erreur potentielle jusqu'à une distance de 30 mm avec le Fastrak, par contre le traqueur Bird y reste insensible. Ces interférences sont supposées être produites par le métal des câbles et les couplages électromagnétiques non désirés.

#### Effet sur la distance émetteur récepteur :

On réalise les mesures de bruit électrique en modifiant la distance entre émetteur et récepteur avec les conditions suivantes : fréquence d'échantillonnage double de la fréquence du secteur et filtrage RIF à deux coefficients. Les résultats montrent que l'erreur de position est proportionnelle à la distance à la puissance quatre entre le récepteur et l'émetteur. Bien que l'amplitude de l'erreur pour différents systèmes soit plutôt différente (facteur 10 en faveur du Fastrak), la proportionnalité reste identique. Pour une distance inférieure à 300 mm entre l'émetteur et le récepteur du Fastrak l'écart type du bruit de la mesure est inférieure à 0,01 mm et ne dépasse pas 0,5 mm jusqu'à 900 mm de distance. Dans le manuel utilisateur Fastrak [15], la résolution est spécifiée en fonction de la distance.

#### Effet d'un environnement métallique :

Deux phénomènes liés aux métaux influencent les performances des traqueurs électromagnétiques : les courants de Foucault et le ferromagnétisme. Les courants de Foucault sont induits dans les métaux par un champ magnétique qui varie. Les traqueurs à courant alternatif (CMA) induisent donc des courants de Foucault dans les métaux à proximité pendant chaque période de mesure. Les traqueurs à champ magnétique continu (CMC) ont été développés dans l'intention d'éliminer ce phénomène. Bien que les courants de Foucault soient encore induits par les fronts montants ou descendants des excitations CMC, il est possible de les diminuer significativement en retardant les mesures du champ jusqu'au moment où le front monte. Le traqueur Fastrak est plus sensible aux courants de Foucault que le traqueur Bird. Le traqueur Fastrak est susceptible à tous les métaux. Le traqueur FoB est relativement insensible aux courants de Foucault induits dans tous les métaux excepté dans le cuivre. Avec le traqueur FoB, les effets des aciers inoxydables, du laiton et de l'aluminium sont si faibles qu'ils ne peuvent être mesurés *cf.* [38].

Lorsque le champ de l'émetteur est appliqué, les matériaux ferromagnétiques produisent un champ magnétique dont l'amplitude dépend de la perméabilité du matériau et des fréquences du générateur du champ électromagnétique. De plus les matériaux ferromagnétiques affecteront les deux systèmes CMA et CMC. Pourtant, les traqueurs utilisent des fréquences d'excitation différentes et donc les effets sont différents pour les différents systèmes. Avec le modèle Fastrak, la perméabilité de l'acier est faible et par conséquent les effets ferromagnétiques sont faibles, cependant l'acier est un bon conducteur de courant, donc les effets des courants de Foucault deviennent prédominants. Avec le FoB, les effets des courants de Foucault de l'acier sont faibles, mais la perméabilité de l'acier à la fréquence du système CMC est élevée. Donc, les effets ferromagnétiques sont prédominants.

Ceci est aussi vrai pour la ferrite, un matériau avec une faible conductivité mais une perméabilité élevée pour le champ généré en continu.

La quantité de métal présente dans l'environnement de travail est aussi un facteur d'erreur. L'effet d'un cube métallique de 25 mm<sup>3</sup> d'acier à proximité de l'émetteur et du récepteur est étudié. Il a été trouvé que l'erreur de position augmente proportionnellement avec la dimension de la pièce de métal à la puissance trois dans le cas du Fastrak et à la puissance deux dans le cas du FoB. L'erreur de position pour le système Fastrak varie de 3 à 0,1 mm. Dans les mêmes conditions, l'erreur de position avec le traqueur Bird est supérieure d'un facteur dix. Pour des distances supérieures à 400 mm, l'effet n'est pas significatif. L'erreur de position est indétectable au moyen du traqueur FoB pour les pièces d'aluminium. D'autres effets en fonction de la taille, des matériaux et des distances sont rapportés, l'erreur de position peut atteindre 10 mm et plus avec les deux systèmes de traqueurs.

Les principales différences opérationnelles entre les deux systèmes sont :

- pour le modèle Fastrak l'insensibilité aux interférences du secteur et une susceptibilité aux courants de Foucault et aux effets ferromagnétiques,
- pour le modèle Bird une susceptibilité aux interférences du secteur et une insensibilité aux métaux non ferromagnétiques. Les erreurs de position mesurées sont généralement supérieures d'un facteur dix avec le modèle Bird.

Murry [39] trouve une loi géométrique sur la susceptibilité d'un traqueur de la marque Polhemus en fonction de la distance avec un circuit électrique perturbateur. La figure 52 illustre les distances à prendre en compte. Si la distance  $p$  est supérieure à  $3d$  alors aucun effet du matériel perturbateur n'est décelable. Parfois aucun effet n'apparaît tant que la distance  $p$  reste supérieure à  $2d$ .

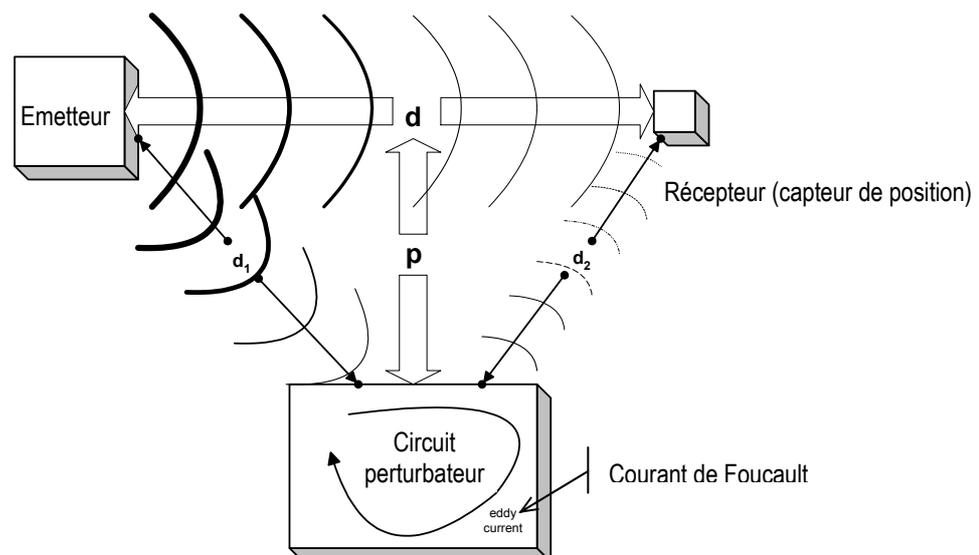


Figure 52 : Distance limite de perturbation de traqueur magnétique [39]

Pour conclure, les champs magnétiques interférant et les métaux présents dans l'environnement de fonctionnement sont clairement des facteurs significatifs qui affectent les performances de n'importe quel système de poursuite électromagnétique.

---

## 1.2.4. Les méthodes de correction d'erreur de position

Dans cette partie, sont étudiées les méthodes de correction des erreurs relatives à la localisation du récepteur, plus précisément celles associées aux coordonnées spatiales. Puis sont décrites les méthodes de correction des erreurs relatives aux orientations du récepteur, plus précisément associées aux angles ou vecteurs d'orientation.

### 1.2.4.1. Les méthodes de correction d'erreur de localisation

Si l'on suppose que l'erreur de localisation est fonction uniquement de l'emplacement désigné, le problème de la correction d'erreur statique peut être décrit comme un problème d'interpolation dans l'espace 3D : donnant deux ensembles restreints de points :

$\{p_i\} \subset P \subset R^3$  et  $\{q_i\} \subset Q \subset R^3$ ,  $i = 1, \dots, n$  on recherche une fonction  $f : P \rightarrow Q$  tel que  $f(p_i) = q_i$  pour  $\forall i = 1, \dots, n$ . Cette fonction devrait être au moins continue et de classe  $C^1$ . Idéalement cette méthode ne devrait pas dépendre du type de topologie des données devant être interpolées de telle sorte que  $\forall p \in P$  il peut être uniquement tracé dans  $Q$ . Ici  $\{p_i\}$  correspond à un ensemble défini de points poursuivis dans l'espace  $P$  déformé enregistré et  $\{q_i\}$  correspond à un ensemble de points exacts dans l'espace non déformé. Leurs coordonnées sont notées  $p_i = (x_i^p, y_i^p, z_i^p)$  et  $q_i = (x_i^q, y_i^q, z_i^q)$ .

Raab *et al.* [13] proposent que la correction des mesures perturbées de la localisation soit représentée par l'addition de vecteurs et soit enregistrée dans un tableau de « correspondance » (LUT) ou par des polynômes. Bon nombre des études réalisées et répertoriées dans cette partie utilisent une évolution de l'une de ces deux méthodes. Toutes les techniques de correction d'erreur de localisation peuvent être classées en deux catégories : méthodes globales qui prennent en compte tous les points afin d'obtenir une fonction globale de cartographie appropriée, et les méthodes locales qui utilisent uniquement quelques points pour obtenir une solution localisée.

### ***Interpolation tri-linéaire***

Czernuszenko *et al.* [40], Ghazisaedy *et al.* [41], et Livingston *et al.* [42] utilisent une technique de correction d'erreur locale basée sur l'interpolation tri-linéaire. L'interpolation tri-linéaire fournit une unique cartographie de n'importe quel point à l'intérieur d'un cube en un point à l'intérieur d'un polyèdre arbitraire. Supposons que nous plaçons un capteur en huit emplacements régulièrement espacés  $\{p_1, \dots, p_8\}$  qui forment un cube dans l'espace traqué et nous déterminons les coordonnées exactes  $\{q_1, \dots, q_8\}$ . Alors, pour n'importe quel point  $p$  à l'intérieur du cube, nous avons d'après Press *et al.* [43] :

$$\begin{aligned}
q &= (1-t)(1-u)(1-w)q_1 + t(1-u)(1-w)q_2 + (1-t)u(1-w)q_4 \\
&+ tu(1-w)q_3 + (1-t)(1-u)wq_5 \\
&+ t(1-u)wq_6 + (1-t)wq_7 + (1-t)uwq_8 + tuwq_7
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\text{avec } u = \frac{y^p - y_1^p}{y_4^p - y_1^p}, t = \frac{x^p - x_1^p}{x_2^p - x_1^p}, w = \frac{z^p - z_1^p}{z_5^p - z_1^p} \tag{2}$$

Pour accomplir cette technique dans l'ordre, le volume complet enregistré devant être étalonné a été divisé en de petits cubes non sécants (grille 3D) dont les verticales forment des ensembles  $\{p_i\}_j, i=1,\dots,8, j=1,\dots,m$ , où  $m$  est le nombre total de cube. Pour chacun des cubes, un ensemble correspondant  $\{q_i\}_j$  doit être connu. Pour n'importe quel point  $p$  dans l'espace enregistré, le cube proche  $\{p_i\}_j$  peut être localisé au moyen de la table LUT. Cette dernière est utilisée pour déterminer  $p$  dans l'espace exacte au moyen de l'équation (1). Cartographier l'intérieur de chaque cube est une application continue de classe  $C^1$ . Pourtant le gradient de la fonction interpolée change de façon discontinue aux limites de chacune des grilles carrées. Peut être que la plus forte contrainte de l'approche d'interpolation tri-linéaire est due aux exigences imposées sur la topologie de l'ensemble des données étalonnées : chaque  $\{p_i\}_j$  doit définir un cube dans l'espace enregistré. La cartographie inverse nécessite d'inverser (1) qui comporte des produits non linéaires et est résolue numériquement.

L'étude de Ghazisaedy *et al.* [41] utilise un capteur de position ultrasonore comme référence afin d'étalonner le traqueur Bird. Un réseau cubique de 3 m de coté avec un pas de 0,3 m sert de guide. Seule l'erreur de position statique est étudiée. 400 points sont mesurés en deux heures par une personne dans un système de réalité virtuelle CAVE. Les mesures des deux capteurs sont enregistrées en même temps au même emplacement. La table de correction est établie en inversant la matrice des erreurs trouvées. Pour une distance inférieure à 0,6 m de l'émetteur, l'erreur du récepteur FoB mesurée ne dépasse pas 0,12 m. Après correction et interpolation, l'erreur du récepteur FoB ne dépasse pas 0,024 m pour une distance inférieure à 0,3 m. Le traitement informatique pour effectuée ces opérations de corrections en 1995 ne dépasse pas 10 microsecondes et est donc négligeable par rapport à la latence du système.

Livingston *et al.* [42] étudient en 2001 la technique de la table de correction pour la localisation et l'orientation en statique du traqueur Bird. L'erreur de position en moyenne est réduite de 79% contre 40% pour l'erreur moyenne d'orientation dans un volume de 2,4 m<sup>3</sup>. Le traqueur de référence employé est de type mécanique. C'est un bras de mesure dimensionnel « Faro » en aluminium, avec 8 bits de précision, l'incertitude est de 0,46 mm en position. Un re-échantillonnage avec un filtrage de type kernel gaussien est effectué sur un réseau rectiligne de 12801 relevés. Chaque relevé est lu 11 fois par le système FoB et lu trois fois par le bras de mesure dans une sphère de 2 m de rayon. Les 1787 lectures aberrantes sont éliminées soit environ 14%. Une expérience montre qu'avant correction l'erreur moyenne de localisation est de 28,7 mm et est réduite après correction à 6,1 mm. Avant correction, l'erreur

moyenne d'orientation est de 3,5°. Elle se réduit à 2,1° après correction. A noter que pour l'erreur de localisation, la correction est très efficace au-delà de 0,6 m. L'erreur de localisation est fortement fonction de la distance, ce qui est moins significatif pour l'erreur d'orientation. La correction peut parfois aussi augmenter l'erreur, cela affecte 3% des localisations et 14% des orientations sur 720 échantillons. Une mesure réalisée à l'extérieur dans un environnement pauvre en métal montre que les valeurs corrigées en laboratoire sont meilleures que les valeurs relevées à l'extérieur (erreur moyenne de position de 9 mm, erreur moyenne d'orientation de 2,3 degrés).

Bryson [44] en 1992 constate un manque de répétabilité pour des mesures de localisation. Des différences de 2 à 5 cm sont observées sur plusieurs jours en localisation. Une forme exponentielle de dérive des erreurs de localisation est identifiée en fonction de la distance. L'étude concerne deux méthodes d'étalonnage : étalonnage polynomial d'ordre 4 par les moindres carrés et étalonnage par deux tables de correction pondérée à 8 poids (linéaire et exponentielle). L'évaluation est réalisée au moyen d'un indicateur de corrélation. A proximité de la source ( $\pm 50$  cm), la méthode locale pondérée exponentiellement est la plus performante.

### ***Fonction forme***

L'équation d'interpolation tri-linéaire qui peut être dérivée analytiquement appartient à une classe de fonction forme dont les équations sont obtenues numériquement. Zachmann [45] discute une possibilité d'employer des fonctions formes pour cartographier un hexaèdre arbitraire dans l'espace mesuré à l'intérieur d'un cube de l'espace réel. En fait, c'est une interpolation tri-linéaire inverse. Bien qu'il n'ait pas essayé cette approche en pratique, cette étude théorique présente un intérêt certain et est donc discutée ici. Supposons qu'un point  $p \in P$  est localisé à l'intérieur d'un hexaèdre défini par  $\{p_i\}$ . Le point correspondant  $q \in Q$  est entouré par un cube défini par  $\{q_i\}$ . La fonction forme qui trace n'importe quel point  $p$  entouré par  $\{p_i\}$  vers un point  $q$  entouré par  $\{q_i\}$  est défini ainsi [45] :

$$q = f(p) = \sum_{i=1}^8 f_i(p)q_i \quad (3)$$

Les fonctions formes linéaires sont estimées ainsi :

$$f_i(p) = f_i(x, y, z) = f_{i1} + f_{i2}x + f_{i3}y + f_{i4}z + f_{i5}xy + f_{i6}xz + f_{i7}yz + f_{i8}xyz \quad (4)$$

où  $f_{ik}$  sont les coefficients des fonctions formes. Ainsi,  $f(p)$  est décrite par une matrice de coefficients  $8 \times 8$ . Si nous définissons  $f_i(p_l)$  comme une fonction  $\delta$  de Kronecker,  $f_i(p_l) = \delta(i, l)$ , alors  $f(p_l) = q_l$ . Ainsi, les coefficients  $f_{ik}$  peuvent être obtenus en résolvant un ensemble de huit équations linéaires  $Af_i = e_i$  ou  $A = [a_1, \dots, a_8]^T$ ,

$a_i = [1, x_i^p, y_i^p, z_i^p, x_i^p y_i^p, x_i^p z_i^p, y_i^p z_i^p, x_i^p y_i^p z_i^p]$ ,  $e_i = [\delta(i,1), \dots, \delta(i,8)]^T$  et les coefficients inconnus  $f_i = [f_{i1}, \dots, f_{i8}]^T$ .

Ellis *et al.* [46] utilisent une technique de correction d'erreur locale basée sur un type plus simple de fonction forme dérivée pour les tétraèdres. Leur étude est basée sur la solution trouvée par Kenwright *et al.* [47] qui n'utilisait pas le principe des fonctions formes. Pourtant, comme montré ci-dessous, l'équation (7) de Kenwright dérivée analytiquement est la fonction forme pour un tétraèdre arbitraire.

Supposons  $\{p_i\}$ ,  $i=1, \dots, 4$  définit un tétraèdre arbitraire dans l'espace enregistré et  $\{q_i\}$  définit un tétraèdre unité  $T^1 = (x, y, z) | x \geq 0, y \geq 0, z \geq 0, x + y + z \leq 1$  dans l'espace réel. La fonction forme du tétraèdre unité est d'après [45] :

$$f_1(p) = x^p, f_2(p) = y^p, f_3(p) = z^p, f_4(p) = 1 - (x^p + y^p + z^p) \quad (5)$$

La fonction d'interpolation linéaire du tétraèdre de Kenwright qu'il utilise pour cartographier les coordonnées naturelles et physiques peut être obtenue de (3) et (5) :

$$f(p) = \sum_{i=1}^4 f_i(p) = q_4 + (q_1 - q_4)x^p + (q_2 - q_4)y^p + (q_3 - q_4)z^p \quad (6)$$

La fonction forme pour un tétraèdre arbitraire T peut être obtenue en appliquant la transformation affine correspondante qui transforme  $T^1$  en T. Au lieu de cela, Kenwright inverse analytiquement (6) [47] :

$$[q]^T = \frac{1}{V} A [p - p_4]^T \quad (7) \quad \text{où } A \text{ est la matrice de transformation affine comme définit par Zachmann [45] et } V \text{ est son déterminant.}$$

Dans l'ordre d'étude pour cette technique, l'espace réel complet qui couvre le volume enregistré à étalonner doit être divisé en tétraèdre dimensionné unité  $\{q_i\}_j$  et leurs tétraèdres correspondants  $\{p_i\}_j$  dans l'espace enregistré doivent être connus. Pour  $\forall p \in P$ , son tétraèdre voisin  $\{p_i\}_j$  est localisé au moyen de la table LUT. Alors  $p$  peut être cartographié dans l'espace réel au moyen de l'équation (7). Comme avec l'interpolation tri-linéaire, la fonction de cartographier l'intérieur de chaque tétraèdre individuel est de classe  $C^1$  continue, bien que le gradient des fonctions interpolées évolue de façon discontinue aux limites de chaque tétraèdre du réseau.

### ***Autres schémas d'interpolation locale***

Bryson [44], Briggs [48], et Kindratenko *et al.* [49] utilisent des techniques de correction d'erreur locale basée sur l'interpolation localisée de points proches. Supposons que le capteur de position soit déplacé à huit emplacements  $\{q_1, \dots, q_8\}$  qui forment un cube dans l'espace réel et les emplacements mesurés correspondants  $\{p_1, \dots, p_8\}$  sont enregistrés. Ils forment un polyèdre dans l'espace cartographié. Pour chaque point  $p_i$ , le vecteur d'erreur d'emplacement

est calculé comme  $v_i = q_i - p_i$ . Alors, pour n'importe quel point  $p$  à l'intérieur du polyèdre défini par  $\{p_1, \dots, p_8\}$ , nous avons [44 ;49] :

$$q = p + \sum_{i=1}^4 w_i v_i \quad (8) \quad \text{où } w_i \text{ sont des poids normalisés associés à chaque point de telle}$$

$$\text{sorte que } w_1 + \dots + w_8 = 1 : \quad w_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^8 r_i} \quad (9)$$

Notons lorsque  $r_1 = \dots = r_8$ , la somme des poids de  $v_i$  dans (8) est égale à la moyenne des huit erreurs des vecteurs.

Bryson [44] utilise deux fonctions pondérées différentes : *linéaire* qui définit chaque poids comme une fonction de la distance et « *impulsive* » qui définit chaque poids comme une fonction exponentielle décroissante de la distance entre  $p$  et  $p_i$ . Les équations exactes sont :

$$r_i = \prod_{j=1, j \neq i}^8 d_j \text{ et } r_i = \begin{cases} e^{-d_i} & \text{si } d_i < d_{\max} \\ 0 & \text{si } d_i \geq d_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

où  $d_i$  est la distance entre  $p$  et  $p_i$  et  $d_{\max}$  est une constante représentant la distance pour laquelle le poids  $r_i$  s'annule ; cela peut être plus petit que la plus petite distance comprise entre deux points quelconques de l'ensemble donné  $\{p_1, \dots, p_8\}$  [44].

Kindratenko *et al.* [49] utilisent trois fonctions pondérées différentes :

$$r_i = \begin{cases} 1 - \frac{d_i}{d_{\max}} & \text{si } d_i < d_{\max} \\ 0 & \text{si } d_i \geq d_{\max} \end{cases} \quad r_i = \begin{cases} 1 - \frac{d_i^2}{d_{\max}^2} & \text{si } d_i < d_{\max} \\ 0 & \text{si } d_i \geq d_{\max} \end{cases} \quad \text{et}$$

$$r_i = \begin{cases} 1 - \ln \frac{d_i}{d_{\max}} & \text{si } d_i < d_{\max} \\ 0 & \text{si } d_i \geq d_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

Dans ce cas  $d_{\max}$  égale la moitié de la plus longue diagonale du polyèdre.

Briggs [48] utilise une fonction pondérée basée sur la distance au carré. Son approche diffère cependant dans la façon d'obtenir  $\{q_i\}$  et  $\{p_i\}$ . Ainsi,  $\{p_i\}$  forme un cube dans l'espace cartographié et  $\{q_i\}$  définit alors un polyèdre correspondant dans l'espace exact. Pour chaque point  $p_i$ , le vecteur d'erreur d'emplacement est calculé tel que  $v_i = p_i - q_i$ . L'équation finale de la correction d'erreur est :

$$q = p - \sum_{i=1}^8 w_i v_i \quad (12) \text{ où } w_i \text{ est la fonction pondérée (supposée normalisée) définie}$$

$$\text{comme [48] : } w_i = \frac{1}{d_i^2} \sum_{i=1}^8 d_i^2 \quad (13)$$

où  $d_i$  est la distance entre  $p$  et  $p_i$ . L'auteur a probablement fait une erreur en reportant le groupe final d'équation parce que l'équation pondérée normalisée ci-dessus ne garantit pas que  $w_1 + \dots + w_8 = 1$  et donc  $v_i$  n'est pas gradué exactement par le résultat de l'estimation de l'erreur la plus grande. La méthode décrite par Briggs nécessite que la topologie de  $\{p_i\}_j$  et  $\{q_i\}_j$  soit similaire à celle employée pour l'interpolation tri-linéaire.

Deux autres techniques nécessitent pourtant le contraire : l'espace réel entier qui couvre le volume cartographié a été subdivisé en petits cubes non sécants dont les verticales forment l'ensemble  $\{q_i\}_j$ . Pour chacun des ensembles, l'ensemble  $\{p_i\}_j$  doit être connu. Pour  $\forall p \in P$ , son polyèdre voisin (ou cube) voisin est localisé au moyen de la table LUT (Look Up Table). Alors  $p$  peut être cartographié dans l'espace exact en utilisant les équations (8) ou (12). L'intérêt de ce type d'interpolation est que des exigences moins strictes peuvent être imposées sur la topologie de  $\{p_i\}_j$  et  $\{q_i\}_j$ . En fait, cela peut être généralisé de telle sorte que  $\{p_i\}_j$  et  $\{q_i\}_j$  peuvent avoir n'importe quelle forme tant qu'ils fournissent un recouvrement total du volume cartographié et sont non sécants. La qualité de l'interpolation est cependant sensible au choix de  $d_{\max}$ . Bien que l'interpolation soit de classe  $C^1$  continue avec chaque polyèdre individuel, il est possible de réduire le saut quand  $d_i = d_{\max}$  parce que la contribution de  $v_i$  disparaît complètement. En conséquence, le gradient de la fonction interpolée peut être changé de façon discontinue même à l'intérieur de chaque cellule.

Une caractéristique commune des schémas d'interpolation locale tri-linéaire et tétraédrique est que tous nécessitent un espace cartographié devant être subdivisé en petits sous espaces d'une certaine dimension et par conséquent leur qualité est dépendante de cette dimension. La sous division dans de grands volumes peut aboutir à une qualité plus faible de l'étalonnage, les plus petits volumes nécessitent un plus grand nombre de mesures à prendre.

### ***Forme polynomiale de degré élevé***

Bryson [44], Kindratenko [50], et Ikits *et al.* [51] utilisent une technique globale de correction d'erreur basée sur une forme polynomiale de degré élevé. Supposons que le capteur soit déplacé sur un réseau rectiligne 3D  $\{q_i\}$  dans l'espace exact  $Q$  et les emplacements correspondant mesurés sont enregistrés en  $\{p_i\}$  dans l'espace traqué  $P$ . Ici  $i=1, \dots, n$  où  $n$  est le nombre total de nœuds de la grille pour lesquels les mesures sont prises. Le vecteur d'erreur de situation  $v_i$  à l'emplacement capté  $p_i$  peut être trouvé comme  $v_i = p_i - q_i$ . Un

vecteur polynomial de degré  $r$  de position  $p \in P$  qui représente l'erreur de position  $v$  peut être formulé comme [50 ;51] :

$$v = f(p) = f(x, y, z) = \sum_{j=1}^R \begin{bmatrix} C_{xj} \\ C_{yj} \\ C_{zj} \end{bmatrix} x^{s_j} y^{t_j} z^{u_j} \quad (14) \quad \text{où } C_{xj}, C_{yj}, C_{zj} \text{ sont les coefficients}$$

polynomiaux,  $R=(r+1)(r+2)(r+3)/6$  et  $s_j, t_j, u_j$  sont les puissance non négatives telles que  $0 \leq s_j + t_j + u_j \leq r$  et toutes les permutations de  $\{s_j, t_j, u_j\}$  sont uniques. Les coefficients inconnus  $C_{xj}, C_{yj}, C_{zj}$  devraient être de telle sorte que le polynôme adapté voisin approxime l'erreur de position à  $\{p_i\}$ . Ils peuvent être trouvés en réduisant la fonction objective suivante

$$[51] : \sum_{i=1}^n \|v_i - f(p_i)\|^2 \quad \text{qui est un problème bien connu de moindre carré par laquelle la}$$

solution peut être trouvée en résolvant les équations suivantes simultanément :

$$\sum_{j=1}^R \begin{bmatrix} C_{xj} \\ C_{yj} \\ C_{zj} \end{bmatrix} \sum_{i=1}^n (x_i^{s_j} y_i^{t_j} z_i^{u_j}) (x_i^{s_k} y_i^{t_k} z_i^{u_k}) = \sum_{i=1}^n v_i (x_i^{s_k} y_i^{t_k} z_i^{u_k}) \quad (15)$$

pour  $k=1, \dots, R$  et  $n > R$

L'intérêt d'utiliser des polynômes de degré élevé est qu'ils fournissent une cartographie continue de classe  $C^1$  sur l'espace entier et sont en fait  $R$  fois différentiables, permettant ainsi une interpolation lisse. La correction d'erreur en dehors de l'espace exploré est aussi possible alors que tous les types d'interpolations sont mal adaptés à cette extrapolation. Bien que toutes les implémentations courantes sont basées sur une certaine topologie de  $\{q_i\}$  et  $\{p_i\}$ , une donnée non uniformément isolée peut aussi être prise en compte. Les polynômes de l'ordre 3 ou 4 sont typiquement les plus adaptés pour l'étalonnage de traqueur [50; 51], des ordres plus élevés engendrent généralement des oscillations indésirables. Il a été noté d'ailleurs [50] que le polynôme d'ordre élevé le plus adapté corrige les grandes erreurs mais introduit parfois des petites erreurs additionnelles quand l'erreur originale est déjà faible.

### ***La méthode multi-quadrique d'Hardy***

Zachmann [34; 45] développe une technique de correction d'erreur globale basée sur la méthode d'interpolation multi-quadrique d'Hardy (HMQ) sur des données éparées. Supposons que le capteur soit déplacé selon un réseau rectiligne 3D  $\{q_i\}$  dans l'espace réel  $Q$  et les emplacements cartographiés correspondant dans l'espace  $P$  mesuré sont enregistrés comme  $\{p_i\}$ . Ici  $i=1, \dots, n$ , avec  $n$  étant le nombre total de nœuds du réseau où sont effectuées les mesures. La forme générale de la fonction interpolation HMQ  $f : \mathfrak{R}^3 \rightarrow \mathfrak{R}^3$  est [34] :

$$f(p) = \sum_{i=1}^n \alpha_j w_j(p) \quad (16)$$

Où les fonctions basiques  $w_j(p)$  sont définies ainsi :

$$w_j(p) = \sqrt{\|p - p_j\|^2 + R^2} \quad (17)$$

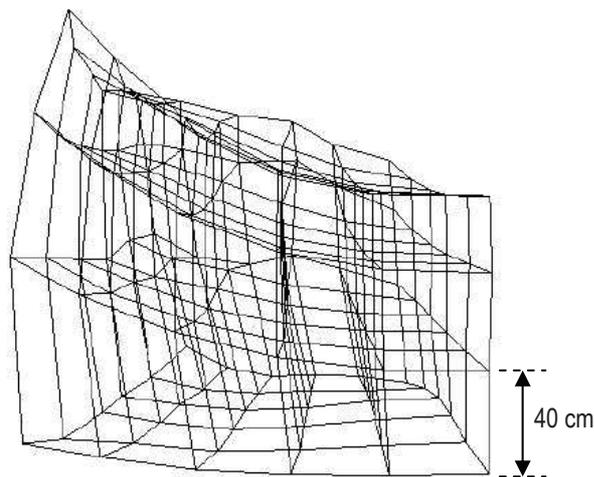
Les coefficients de dilatations inconnus  $\alpha_j$  peuvent être trouvés à partir de la résolution du système à  $n$  équations via la technique de décomposition LUT [43].

$$\sum_{i=1}^n \alpha_j w_j(p_i) = q_i \quad (18)$$

Le lissage de l'interpolation dépend du paramètre  $R^2$ . Il a été trouvé expérimentalement que l'encadrement  $10 \leq R^2 \leq 1000$  est optimal et la valeur exacte de  $R^2$  avec cette dynamique a un très faible impact sur la qualité de l'interpolation [34].

L'intérêt de cette approche est qu'elle fournit une cartographie continue de classe  $C^1$  et permet une interpolation lisse avec l'espace entier cartographié. Bien que l'implémentation de Zachmann nécessiterait une certaine topologie de  $\{q_i\}$  et  $\{p_i\}$ , une donnée isolée non uniformément peut être aussi utilisée.

Dans un article de Zachmann [34], cet auteur présente une méthode rapide afin d'égaliser les distorsions du volume des points mesurés. La figure 53 ci-dessous illustre la distorsion du champ dans le CAVE. Les nœuds de la structure correspondent aux points mesurés d'une structure uniforme de 2 m de longueur. Les irrégularités constatées peuvent atteindre 40 à 50 cm.



**Figure 53 : Représentation de l'erreur de localisation d'un réseau de points formé par des cubes de 40 cm de côté, d'après Zachmann [34]**

L'interpolation HMQ évite les oscillations. Pour les mesures effectuées simultanément avec quatre capteurs dans un volume de  $2,4 \text{ m}^3$  et avec 144 points l'incertitude mesurée est au mieux de 1 cm. Le calcul de l'interpolation de position en 3D pour 144 points prend 0,4 ms

---

pour un processeur de 250 MHz. L'auteur observe une relative stabilité des résultats après six semaines. De meilleures performances sont observées pour le traqueur Bird par rapport au traqueur Polhemus. Dans cette expérimentation, l'erreur des points corrigés ne dépend pas de la distance de l'émetteur.

### ***Méthode basée sur le réseau neuronal***

Saleh *et al.* [52] utilisent une technique de correction d'erreur globale basée sur l'application d'un réseau neural multicouche « feed forward ». Supposons que le capteur soit déplacé sur une grille rectiligne  $\{q_i\}$  dans l'espace réel  $Q$  et les emplacements correspondants cartographiés dans l'espace mesuré  $P$  sont enregistrés comme  $\{p_i\}$ . Ici  $i=1, \dots, n$  où  $n$  est le nombre total de nœuds de la grille où les mesures sont relevées. Les ensembles  $\{q_i\}$  et  $\{p_i\}$  sont utilisés pour établir un réseau neural qui est configuré de telle sorte qu'une fois formé, ce dernier cartographie  $\forall p \in P$  directement en  $q \in Q$ , éliminant ainsi l'erreur de localisation en  $p$ .

Saleh *et al.* [52] emploient une architecture de réseau à quatre couches « feed-forward » avec trois nœuds d'entrée et trois nœuds de sortie, tous utilisant une fonction d'activation linéaire  $f(s) = s$ . La première couche cachée comporte sept à huit nœuds, la seconde couche cachée comporte quatre nœuds, tous utilisant la fonction d'activation sigmoïde  $f(s) = (1 + e^{-s})^{-1}$ . Un biais est inclus par l'absence de connections extérieures et est introduit à chaque nœud de sortie. La justification pour ce choix particulier de l'architecture du réseau est que « n'importe quelle fonction au bon comportement qui cartographie de  $n$  dimensions (avec  $n > 1$ ) vers  $m$  dimensions peut être approximée par un réseau neural de 2 couches cachées [52] ». Bien que le choix du nombre de nœuds dans les couches cachées soit sujet à discussion, ce choix semble principalement être basé sur l'expérience. Pour construire le réseau, un algorithme standard de rétro propagation est employé jusqu'à ce que la moyenne de l'erreur du réseau de sortie chute en dessous de 0,01. Pour restreindre les changements de pondération, le taux d'apprentissage utilisé est déterminé expérimentalement afin d'être compris entre 0,01 et 0,1.

Le réseau neuronal fournit une cartographie lisse continue de classe  $C^1$  à l'intérieur de l'espace entier mesuré. La correction d'erreur en dehors de l'espace mesuré est aussi possible. Bien que l'implémentation courante soit basée sur une certaine topologie de  $\{q_i\}$  et  $\{p_i\}$ , une donnée irrégulièrement isolée peut aussi être prise en compte. L'architecture du réseau employé n'est pas clairement évaluée.

#### **1.2.4.2. Méthode de correction d'erreur de l'orientation**

Si l'on admet que l'erreur d'orientation soit fonction uniquement de la localisation mesurée, on peut résoudre le problème de la correction de l'erreur statique de l'orientation en utilisant une variante de quelques techniques de correction d'erreur de localisation. Il existe une étude

---

[42] qui propose que l'erreur d'orientation soit fonction de la localisation et de l'orientation captée. Pourtant des études plus récentes [45; 49; 51] semblent ne pas confirmer ces constatations.

Supposons que la position du capteur soit connue sur un réseau 3D rectiligne  $\{q_i\}$  dans l'espace réel  $Q$  et que les positions et orientations correspondantes dans l'espace  $P$ , notées comme  $\{p_i\}$  et  $\{o_i\}$ , soient aussi connues ( $i=1,\dots,n$  où  $n$  est le nombre total de nœuds de la grille). Mesurer l'orientation exacte du capteur dans l'espace réel est difficile. Pourtant garantir que l'orientation est la même que celle de l'émetteur est évident. Dans ce cas,  $o_i$  est de fait l'erreur de l'orientation mesurée à la position  $p_i$  donnée. L'orientation du capteur peut être représentée de diverses façons. Jusqu'ici, trois formes avaient été employées dans le cadre d'étalonnage : les angles d'Euler [50], la matrice de rotation [45], et les quaternions [42; 46; 49; 51].

Kindratenko *et al.* [49] construisent un support pour le récepteur qui permet des rotations indépendamment autour des trois axes tout en gardant la même localisation. L'auteur conclut qu'après correction les erreurs dues aux rotations du récepteur sont mineures par rapport à la localisation et peuvent être négligées. Les quaternions sont utilisés pour déterminer la rotation et la correction à apporter. Avant correction, les erreurs de rotation le long de l'axe  $z$  peuvent atteindre  $25^\circ$ . Entre deux points distants de 30 cm de hauteur, l'erreur de rotation est supérieure à  $5^\circ$ . Après correction, l'erreur moyenne d'orientation est de l'ordre de  $1^\circ$ .

### ***Interpolation locale***

Livingston *et al.* [42], Ellis *et al.* [46], et Kindratenko *et al.* [49] utilisent les techniques de correction d'erreur locale de l'orientation basées sur une certaine forme d'interpolation de localisation similaire à celle utilisée pour la correction d'erreur de position. Très peu d'information est fournie au sujet des détails de leur réalisation.

D'après Livingston *et al.* [42] : « La correction de la localisation est réalisée par une interpolation tri-linéaire des vecteurs d'erreurs pour les coins de la cellule dans laquelle l'échantillon se trouve. La correction de l'orientation est réalisée par une interpolation analogue des quaternions d'erreur pour les coins de la cellule. Nous réduisons le problème tri-linéaire par une suite d'interpolations linéaires simples à base de quaternions. Nous utilisons des interpolations linéaires sphériques. »

L'étude de Livingston *et al.* [42] utilise un dispositif spécifique pour établir la table de correction d'orientation. L'opération d'étalonnage en orientation nécessite plus de 14 heures et n'est pas optimisée. L'erreur d'orientation dépend fortement de l'orientation mesurée. La méthode LUT est peu applicable pour la correction d'erreur d'orientation. Les quaternions sont employés pour représenter les rotations.

Ellis *et al.* [46] : « ...l'erreur en orientation était mesurée par le quaternion qui pivoterait à la verticale locale mesurée.... Ces erreurs d'orientation dans chaque cellule étalonnée étaient corrigées par des rotations inverses basées sur des mesures d'erreur aux nœuds adjacents étalonnés de la grille. ».

Kindratenko *et al.* [49] utilisent une approche identique à celle décrite pour la correction d'erreur de position. Une représentation des quaternions  $\{[w, (x, y, z)]_i\}$  de  $\{o_i\}$  a été utilisée. Au lieu d'interpoler le vecteur d'erreur de position  $v$  à la position mesurée  $p$ , le quaternion d'erreur de l'orientation  $\{[w^e, (x^e, y^e, z^e)]_i\}$  est interpolé au moyen des équations (8), (9), et (11). Les poids  $w_i$  sont encore basés sur la distance  $d_i$ , pourtant ils sont utilisés pour mesurer la contribution des quaternions de l'erreur de l'orientation plutôt que les vecteurs d'erreurs de position. Le quaternion de l'erreur résultante est normalisé. Le quaternion mesuré  $[w, (x, y, z)]$  est alors multiplié par l'inverse du quaternion interpolé afin d'obtenir l'orientation exacte du capteur.

Les trois réalisations imposent des limitations obligatoires topologiques sur  $\{q_i\}$ . La cartographie continue de classe  $C^1$  de l'orientation mesurée à l'intérieur de l'orientation exacte est donnée, mais le gradient de la fonction interpolée peut changer de façon discontinue à l'intérieur de chaque cellule du réseau.

### ***Polynôme de degré élevé***

Kindratenko [50] et Ikits *et al.* [51] utilisent une technique de correction d'erreur d'orientation basée sur le polynôme de degré élevé. Kindratenko [50] emploie une représentation des angles d'Euler  $\{(\alpha, \beta, \gamma)_i\}$  pour  $\{o_i\}$ . L'équation polynomiale (14) reste la même excepté que maintenant elle est utilisée pour donner les erreurs des angles d'Euler mesurés à la place de donner les erreurs de la position mesurée  $p$ . Une fois que les coefficients sont déterminés, l'erreur de l'orientation  $\{(\alpha^e, \beta^e, \gamma^e)\}$  pour  $\forall p \in P$  peut être interpolée. Cette erreur pourtant ne peut pas être directement ajoutée à l'orientation mesurée à cause de la nature des angles d'Euler. Au lieu de cela, l'erreur relevée devrait être translatée de l'erreur de l'orientation interpolée. Ceci est effectué en convertissant l'ensemble de l'orientation mesurée  $(\alpha, \beta, \gamma)$  et l'erreur d'orientation calculée  $(\alpha^e, \beta^e, \gamma^e)$  en matrices de rotation  $M$  et  $M^e$ , en multipliant  $M$  par  $M^e$ , puis en convertissant la matrice résultante vers les angles d'Euler.

Ikits *et al.* [51] utilisent une représentation en quaternion  $\{[w, (x, y, z)]_i\}$  pour  $\{o_i\}$ . L'équation polynomiale (14) reste la même exceptée que maintenant elle est utilisée pour fournir les erreurs dans la partie  $(x^e, y^e, z^e)$  du vecteur mesuré de l'erreur du quaternion  $[w^e, (x^e, y^e, z^e)]$  au lieu de donner les erreurs dans la position  $p$  mesurée. La partie scalaire  $w^e$  du quaternion d'erreur  $[w^e, (x^e, y^e, z^e)]$  est alors obtenue de la contrainte d'unité :  $\|[w^e, (x^e, y^e, z^e)]\|^2 = 1$ . Le quaternion de l'orientation corrigée peut être obtenu en

---

multipliant l'inverse du quaternion d'erreur calculée par le quaternion capturé  $[w, (x, y, z)]$  :  $[w^e, (x^e, y^e, z^e)]^{-1}[w, (x, y, z)]$ .

Dans les deux cas, une cartographie lisse de classe  $C^1$  continue de l'ensemble de l'orientation mesurée vers l'ensemble de l'orientation réelle est obtenue. Bien que l'ensemble des réalisations impose des limitations certaines sur la topologie de  $\{q_i\}$  et nécessite au capteur d'avoir l'orientation 0 dans l'espace réel, une donnée irrégulièrement isolée avec une orientation arbitraire connue peut aussi être utilisée.

Pour des distances d'émetteur comprises entre 0,3 m et 0,5 m, Ikits *et al.* [51] trouve des erreurs de position inférieures à 5 mm et des erreurs d'orientation inférieures à  $1^\circ$ .

### ***La méthode multi-quadrique d'Hardy***

Zachmann [45] utilise une technique de correction d'erreur globale d'orientation basée sur l'interpolation multi-quadrique d'Hardy. Une représentation de la matrice d'orientation  $\{M_i\}$  est utilisée pour  $\{o_i\}$ . Les coefficients de dilatation  $\alpha_i$  en (16) sont calculés à partir des contraintes  $f(M_i^p) = M_i^q$ . La fonction d'interpolation résultante HMQ est alors employée pour interpoler l'orientation exacte  $M^q$  à partir de l'orientation mesurée correspondante  $M^p$ . Evidemment  $M^q$  doit être orthogonale et normalisée.

Comme dans la forme polynomiale, une cartographie lisse  $C^1$  continue de l'ensemble de l'orientation mesurée vers l'ensemble de l'orientation réelle est obtenue. Bien que la réalisation de Zachmann impose des limitations sur la topologie de  $\{q_i\}$  et nécessite au capteur d'avoir l'orientation 0 dans l'espace réel, une donnée irrégulièrement isolée avec une orientation arbitraire connue peut aussi être utilisée.

## **1.2.5. Techniques et moyens d'acquisition de données d'étalonnage**

Tous les moyens d'étalonnage, ou au moins leur récente réalisation, imposent certaines restrictions sur la topologie de  $\{q_i\}$  et  $\{p_i\}$  : les mesures doivent être relevées selon un réseau rectiligne soit dans l'espace réel soit dans l'espace mesuré. Cela nécessite un système alternatif de capture (peu onéreux comparativement au traqueur électromagnétique devant être étalonné).

Plusieurs systèmes et démarches d'acquisition de données ont été proposés. Une démarche consiste à déplacer le capteur selon une grille rectiligne en trois dimensions avec les coordonnées des nœuds connus dans l'espace réel tandis que les coordonnées mesurées correspondantes sont relevées. Dans une autre approche, le capteur est déplacé selon une grille virtuelle qui semble rectiligne en trois dimensions dans l'espace cartographié et les coordonnées réelles correspondantes du capteur sont mesurées et enregistrées. Une dernière approche est de déplacer le capteur selon une enveloppe arbitraire irrégulière dans l'espace,

---

de déterminer l'ensemble des coordonnées exactes et mesurées à chaque position, et enfin de les échantillonner dans une topologie désirée.

D'après Bryson [44] : Une table verticale à trous de dimension 1,83 m × 1,22 m sur pied a été réalisée. Celle-ci a été utilisée afin de déterminer un ensemble de positions exactes pour le capteur. Le sol était marqué avec des positions pour la table à trous de telle sorte que le volume 2,44 m × 2,44 m × 1,83 m pourrait être mesuré régulièrement. Certains trous étaient marqués comme points de mesure à des intervalles de 30,5 cm. A chaque point de mesure, 60 mesures étaient relevées avec le capteur du traqueur dans une orientation fixe. Les 60 mesures étaient alors utilisées pour calculer une position moyenne pendant le temps de la mesure et un écart type associé. Bien que cette technique ne nécessite qu'une sorte d'échiquier, elle est relativement précise mais prend beaucoup de temps (plusieurs heures). Un relevé libre de l'orientation n'est pas possible.

Kindratenko [50], Kindratenko *et al.* [49], et Saleh *et al.* [52] utilisent un support de capteur consistant en une plate-forme en bois de 30,5 cm × 30,5 cm × 0,3 cm avec une attache au dessus sur laquelle un ensemble de tubes en plastique de longueur 61 cm, 91,5 cm, 122 cm, 152,5 cm, 183 cm, et 213,5 cm peut être emboîté. Les marqueurs de la grille rectiligne 2D sont placés sur le sol. En déplaçant la plate-forme entre les marqueurs sur le sol et en choisissant les tubes adaptés, on peut placer le capteur aux points dont les coordonnées sont exactement déterminées dans l'espace réel. Après un alignement soigneux, l'incertitude de cette technique de mesure est de l'ordre de  $\pm 1$  cm. Bien que cette technique soit relativement précise, elle prend du temps (30 s au minimum par point) et l'enregistrement d'une orientation quelconque n'est pas possible.

Day *et al.* [53] présentent en 2000 une méthode d'étalonnage en position et en orientation pour un traqueur électromagnétique de type Fastrak. La méthode d'étalonnage consiste dans les étapes suivantes. Premièrement, un support d'étalonnage est employé pour positionner un capteur dans une série d'orientations et de positions reproductibles à l'intérieur d'une grille tridimensionnelle. La figure 54 illustre le support d'étalonnage. La table d'étalonnage peut être positionnée dans chacune des neuf rainures du plancher. Le support capteur peut être placé dans un des 40 trous de la table verticale. Le centre magnétique et les axes coordonnés sont alignés. Les niveaux servent à la précision de l'alignement. 360 positions différentes espacées de 20 cm peuvent être mesurées dans un volume de  $0,8 \times 1,2 \times 1,4$  m<sup>3</sup>. 24 jeux d'orientations dont 12 sur chaque face du tableau vertical sont possibles. Les erreurs de positionnement et d'orientation sont inférieures respectivement à 0,5 cm et à 0,8°. Ensuite, une interpolation des données est réalisée au moyen d'un modèle de régression linéaire locale basée sur une gaussienne centrée afin de prédire la distorsion du champ magnétique en fonction de la position exacte. Une pondération en fonction de la distance entre l'émetteur et le point d'étalonnage est appliquée. Cette interpolation a été utilisée pour corriger les données d'étalonnage puis les erreurs résiduelles ont été calculées pour évaluer la performance de cette interpolation. Le modèle mathématique employé est détaillé dans l'article. Les distances

minimale et maximale de mesure sont respectivement de 20 cm et de 2 m. Dans un environnement de laboratoire, les performances de l'étalonnage réalisé permettent d'obtenir à une distance de 80 cm une erreur moyenne d'orientation et de position respectivement de l'ordre du degré et du centimètre.

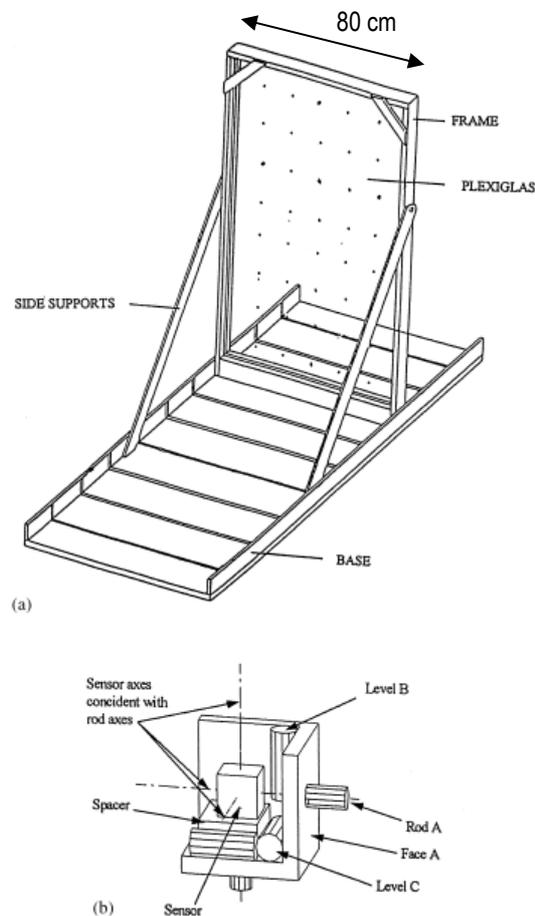


Figure 54 : Système expérimental d'étalonnage d'après Day *et al.* [53]

Tian *et al.* [36] en 2001 étudient l'étalonnage de traqueur électromagnétique dans le cas de distorsions non constantes dans le temps et en dynamique. Le domaine de l'étude concerne un système de réalité augmentée dédié aux soins médicaux. Le traqueur testé est le système FoB. Le moyen de comparaison et de référence est un traqueur optique Optotrack 3020. Un support en Perspex (plexiglass) avec des positions à 10 mm d'intervalle est utilisé. L'erreur moyenne de position est de 9,26 mm et l'erreur moyenne d'orientation est de 1,93° sur 680 points relevés dans un volume inférieur à 0,5 m<sup>3</sup>. Pour l'interpolation de position, les quaternions de position et les polynômes de troisième ordre sont les plus adaptés. Dans ce cas 39% des distorsions d'orientation sont réduites. Les erreurs sont de l'ordre de 3°. Une méthode avec une table d'allocation n'offre pas d'avantage par rapport à celle de l'interpolation polynomiale par quaternion.

Nakada *et al.* [54] en 2003 proposent une méthode rapide d'étalonnage pour un traqueur magnétique Minibird en utilisant un traqueur hybride magnéto-optique Polaris. L'acquisition

---

des données est réalisée en main libre et est destinée au milieu médical. D'après les auteurs, deux problèmes apparaissent avec ce type de technique. L'un est une erreur causée par le délai temporel entre les mesures optiques et magnétiques. L'autre est l'instabilité de l'incertitude de l'étalonnage résultant des variations des données acquises en main libre. L'erreur produite par les distorsions magnétiques est réduite de 40 mm à moins de 2 mm. 30 secondes suffisent pour explorer un volume de  $200 \times 200 \times 20 \text{ mm}^3$ . La distance entre émetteur et récepteur est de 200 mm. La méthode de mesure n'est pas détaillée.

Needham *et al.* [55] en 2003 fournissent un ensemble de métrique pour l'évaluation de la position. Une étude de la comparaison de trajectoires est présentée. On évalue la performance d'un traqueur par exemple en quantifiant les améliorations d'effet d'algorithme. Les métriques spatio-temporelles fournissent une mesure significative pour identifier l'incertitude de la trajectographie délivrée par un traqueur.

D'après Briggs [48] : « Les échantillons sont relevés au moyen d'une potence non ferrique faite de tubes PVC et construite sur un pied carré en bois utilisé pour les déplacements ponctuels. Plusieurs capteurs sont attachés verticalement à la potence et les mesures sont relevées simultanément. » La technique d'étalonnage de Briggs nécessite d'avoir les données acquises sur une grille rectiligne dans l'espace cartographié. Un re-échantillonnage additionnel des données est appliqué à l'intérieur de la grille rectiligne 3D dans l'espace mesuré. Pour chaque point de la grille, un tétraèdre d'un volume le plus petit possible est construit à partir des points voisins mesurés. Les coordonnées des points mesurés sont connues dans l'espace réel et enregistré. Les vecteurs d'erreurs de position peuvent être calculés. Les vecteurs d'erreurs aux points régulièrement espacés dans l'espace mesuré sont alors interpolés en utilisant l'équation (12) et les tétraèdres trouvés. Ceci introduit naturellement des erreurs additionnelles à l'intérieur des tables finales d'étalonnage. Une orientation arbitraire ne peut pas être mesurée.

Zachmann [34; 45] utilisait un matériel analogue constitué d'une plateforme en bois avec une longue barre de bois attachée verticalement. Plusieurs capteurs peuvent être attachés à la barre à des positions bien définies. En déplaçant la barre sur un sol marqué on peut positionner les capteurs à des emplacements connus dans l'espace réel. Cette technique est à la fois relativement fidèle et considérablement plus rapide (30 s au total pour quatre capteurs) que celles utilisées dans [44] et [50]. Une mesure d'une orientation arbitraire n'est pas réalisable.

Hummel *et al.* [56] établissent en 2005 une méthode pour évaluer des traqueurs tels que le NDI Aurora et le microBird. Un système expérimental basé sur un plan carré est fabriqué en polycarbonate et percé de trous espacés de 50 mm de façon rectiligne. Au centre 32 trous supplémentaires sont réalisés et décrivent un cercle. Les capteurs peuvent être placés avec précision au moyen d'un adaptateur qui se fixe dans une paire de trous. La figure 55 illustre à gauche le plan de la table d'étalonnage, à droite (a) le plan du cercle central constitué de 32 trous par pas de  $11,25^\circ$  et le schéma (b) de l'adaptateur positionnant le capteur dans trois axes

possibles. La distance et l'orientation relative d'un capteur peuvent être mesurées. On calcule l'erreur de position en soustrayant la valeur de la distance relative connue à la valeur de la distance relative mesurée par le capteur. Des erreurs de position de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres et de moins d'un degré sont constatées. L'influence d'objets métallique est observée et des erreurs de plus de 100 mm sont mesurées. Deux méthodes, une dite d'Hartov et une autre à base d'une sphère, sont aussi étudiées afin d'étalonner un styilet personnalisé.

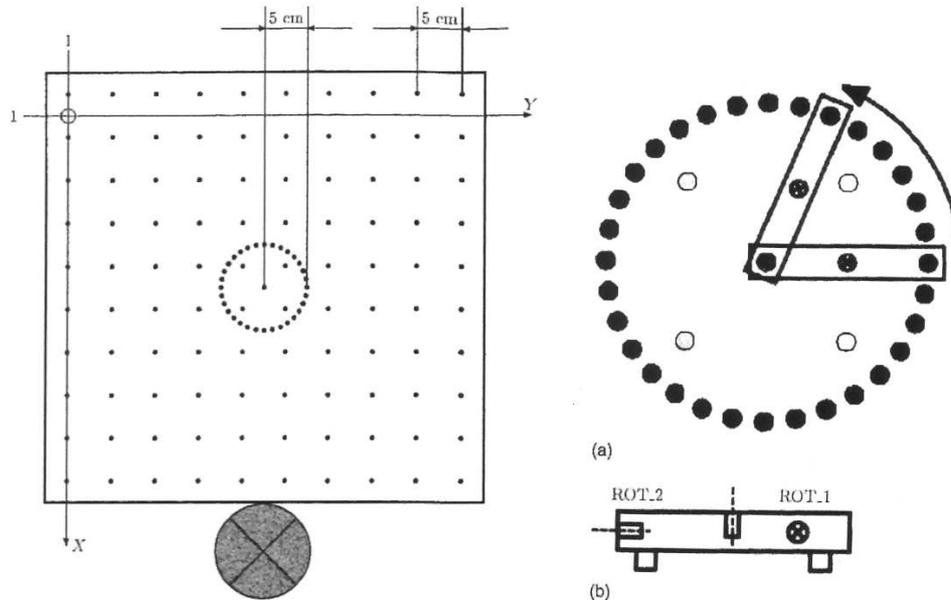


Figure 55 : Système expérimental d'après Hummel *et al.* [56]

Livingston *et al.* [42] utilisent un système de poursuite mécanique Faro Metrecom IND-1 (bras Faro) afin de déterminer la position et l'orientation précise du capteur électromagnétique dans l'espace réel. Dans l'espace cartographié, les mesures sont prises selon un chemin irrégulier puis échantillonnées et transformées en un réseau rectiligne et uniforme. Le traitement de l'échantillonnage utilise une fonction gaussienne centrée sur chaque nœud de la grille et un rayon de coupure égal à la taille triple de la grille. Cela introduit des erreurs additionnelles dans la table d'étalonnage finale. Le relevé au moyen du bras Faro peut être très rapide et exact, une orientation arbitraire est possible, mais son coût élevé (plusieurs dizaines de milliers d'Euros) peut être prohibitif pour beaucoup d'utilisateurs.

Ghazisaedy *et al.* [41] utilisent un matériel de mesure à ultrasons (UMD) comme moyen afin de déterminer la position du capteur dans l'espace réel. L'UMD génère un signal ultrasonore et l'envoie vers un objet. Le son réfléchi par l'objet est détecté et la distance est calculée par la différence de temps entre l'envoi et la réception. Quatre UMD sont assemblés dans le but de déterminer les coordonnées à trois degrés de liberté. Le capteur électromagnétique est fixé au système UMD. Les mesures sont collectées dans l'espace cartographié en déplaçant le capteur sur la grille régulière. Ceci nécessite un logiciel spécifique pour réaliser la méthode d'acquisition de données. Bien que la mesure de l'orientation ne soit pas possible, la technique est relativement peu chère (environ mille Euros), offre une exactitude

raisonnablement suffisante et rapide. Son principal inconvénient est que l'espace mesuré doit être entouré de mur sur lesquels les ultrasons peuvent rebondir. Par conséquent cette technique n'est utilisable que pour des installations semblables aux CAVE.

Ikits *et al.* [51] utilisent un système de capture optique NDI Optotrack 3020 comme moyen d'enregistrement de la position du capteur dans l'espace réel. Le système utilise des marqueurs infrarouges actifs et un équipement vidéo spécifique pour déterminer la position du marqueur. Le capteur électromagnétique et les marqueurs infrarouges sont attachés à une plateforme flexible qui peut être déplacée autour et orientée vers un angle arbitraire mais limité. En relevant les deux systèmes au même moment, on détermine l'ensemble de la position et de l'orientation du capteur et l'on enregistre dans l'espace réel. Cartographier avec l'Optotrack n'est pas aussi rapide qu'avec le bras Faro, mais cette technique est plus rapide et plus précise qu'avec un échiquier ou une potence. Un relevé de l'orientation est possible, mais le prix de ce matériel peut être relativement élevé pour beaucoup d'utilisateurs.

L'approche la plus inhabituelle jusqu'ici a été proposée par Czernuszenko *et al.* [40]. Cette idée est basée sur la superposition d'objets réels et virtuels au même emplacement. L'écartement entre les deux objets est déterminé visuellement au moyen de la position de la tête de l'utilisateur. Au début de la procédure d'acquisition de données on place un objet réel dans la scène à une position connue et en créant un objet virtuel 3D identique au même emplacement. L'utilisateur portant des verres stéréo de capture se déplace à une position arbitraire  $p'_j$  dans l'environnement et regarde les objets. S'il n'y a pas d'erreur du traqueur de tête, les objets devraient coïncider. Pourtant, ce n'est généralement pas le cas à cause d'erreur du traqueur. La distance entre les deux objets est égale au total des erreurs de la position de la tête de l'utilisateur. L'utilisateur utilise alors un joystick pour appliquer une certaine translation  $v'_j$  à l'objet virtuel jusqu'à ce que cela coïncide avec l'objet réel. Ainsi, le vecteur d'erreur  $v'_j$  à la position  $p'_j$  dans l'espace enregistré est trouvé. Cette procédure est répétée en  $m$  positions provenant de non uniformité éparse de l'ensemble des données d'étalonnage. Cette donnée est utilisée pour interpoler un ensemble de vecteur d'erreurs  $\{v_i\}$  de position sur la grille rectiligne  $\{p_i\}$  dans l'espace enregistré :

$$v_i = \sum_{j=1}^m \frac{w_{ij}}{\sum_{k=1}^m w_{ik}} v'_j \quad \text{ou} \quad w_{ij} = \frac{1}{\|p_i - p'_j\|^2} \quad (19)$$

Cette technique nécessite un logiciel spécifique pour guider la procédure d'étalonnage et un affichage d'environnement 3D. Ces avantages sont : un étalonnage rapide et un faible coût d'équipement. Pourtant, l'exactitude est limitée (plus d'un centimètre) et la correction d'orientation n'est pas disponible, bien que cela puisse être ajouté.

---

## 1.2.6. Applications logicielles

Bien que nombre de techniques d'étalonnage de capteur aient été rapportées dans la littérature, elles sont peu disponibles pour la communauté de recherche. La majorité des applications sont de marque déposée et sont étroitement intégrés avec leurs systèmes spécifiques. Depuis 2000, quatre applications logicielles sont disponibles.

Le premier logiciel à offrir des capacités d'étalonnage du traqueur était CAVELib [33]. L'application est basée sur une approche d'interpolation tri-linéaire [40; 41], donc seule la correction de position d'erreur est possible. Ce logiciel est utilisé exclusivement pour une partie de l'application CAVELib. A cause des difficultés relatives à l'acquisition des données d'étalonnage développée pour l'application CAVELib, ce logiciel est rarement employé. Le code source n'est pas disponible.

Le code UNC de l'étalonnage [42] du capteur magnétique est disponible sous la forme du code source téléchargeable gratuitement du site :

<http://www.cs.unc.edu/~us/MagTrack/data.html> (2007)

L'interpolation tri-linéaire pour la correction de l'erreur de position et l'interpolation en quaternion pour la correction de l'erreur de l'orientation sont les seules techniques applicables. Aucun logiciel d'acquisition de donnée n'est fourni.

NCSA libTrCalibr ver. 2.00 [49; 50] est disponible sous la forme d'un code source téléchargeable gratuitement du site <http://www.ncsa.uiuc.edu/~kindr/emtc/libtrcalib.html> (2007). Il implémente un polynôme d'ordre élevé et une technique d'interpolation locale pour l'ensemble de la correction d'erreur de position et d'orientation. Les routines d'étalonnage sont organisées dans une bibliothèque, et comportent un logiciel supplémentaire d'acquisition de données, d'analyse, et de visualisation. La bibliothèque a été essayée sur IRIX, LINUX, et les plateformes Win 32.

Les logiciels en version 4.0 et 5.0 pour le capteur daemon VRCO (VRCO, Inc., [www.vrco.com](http://www.vrco.com)) ont quelques programmes pour intégrer les routines d'étalonnage avec le serveur du capteur daemon. Le capteur daemon fournit une architecture très flexible pour l'intégration de diverses entrées des matériels avec les applications VR utilisant différents systèmes de capture de position. Un objet logiciel partagé en trois parties contenant des routines d'étalonnage peut être chargé par le serveur du capteur daemon pendant l'initialisation et exécuté chaque fois qu'une nouvelle donnée du capteur est relevée. Le logiciel NCSA trackdCalibrator est un exemple d'un tel objet en trois parties. Le code source binaire est disponible à <http://www.ncsa.uiuc.edu/VEG/VPS/emtc/trackd.html> (2007).

---

### 1.2.7. Synthèse sur l'étude de l'étalonnage de traqueurs

En annexe 2, le tableau 1 comporte une synthèse de l'ensemble des articles d'étalonnage de capteurs 3D analysés. Les différentes techniques de correction d'erreur sont synthétisées dans le tableau 2 de l'annexe 2.

L'analyse de modèles mathématiques et des résultats numériques des méthodes existantes montre que les techniques de correction globale d'erreur de position, telle que les polynômes d'ordre élevé ou la méthode multi-quadrique d'Hardy sont susceptibles de réaliser une meilleure cartographie continue lisse de l'espace cartographié vers l'espace réel. Les méthodes d'interpolation locale peuvent réussir aussi bien que les méthodes globales, mais elles ne fournissent pas forcément une cartographie lisse et continue parce que le gradient de la fonction d'interpolation peut changer de façon discontinue. Aussi, la correction de l'erreur d'orientation n'est pas toujours possible avec les méthodes locales.

La technique la plus pratique d'acquisition de données est celle utilisant un support en bois avec de nombreux capteurs, où l'on déplace cet ensemble selon une grille rectangulaire exacte dans l'espace réel, et l'on enregistre les valeurs correspondantes fournies par le traqueur. Bien que l'incertitude associée au positionnement du matériel supportant le traqueur ne soit pas très faible (de l'ordre d'un ou de quelques millimètres), cette technique semble suffisante dans le cadre des étalonnages de traqueurs.

Un re-échantillonnage des données acquises avant que ne soit utilisé l'étalonnage est indésirable parce que cela introduit des erreurs additionnelles.

Toute correction éventuelle à apporter en temps réel au traqueur opérationnel ne doit pas engendrer une latence totale du système de son 3D supérieure à 70 ms.

VRCO trackd en combinaison avec NCSA trackdCalibrator et libTrCalibr ver.2.00 est le logiciel unique qui fournit une solution complète incluant l'acquisition des données, l'étalonnage et l'analyse. N'importe quelle application qui utilise les services VRCO trackd pour obtenir les données traquées peut sans effort profiter du système de capture étalonné.

---

## 2. Etalonnage

### 2.1. Dispositif à étalonner et caractéristiques de l'étude

#### 2.1.1. Choix du traqueur

Après la présente revue bibliographique des différents traqueurs de position et de leurs contraintes d'emploi, la sélection d'un type de traqueur pour les applications relatives au son 3D peut être établie.

D'un point de vue métrologique, les traqueurs mécaniques mesurant des distances sont les meilleurs avec une répétabilité de quelques dizaines de micromètres et avec un temps de latence de quelques millisecondes. Par manque de qualité ergonomique, ces traqueurs ne sont pas développés et les rares prototypes sont peu employés. Ce système n'est donc pas adapté à notre besoin.

Les capteurs à champs gravitationnels présentent des incertitudes qui peuvent atteindre 5 mm et les capteurs inertiels peuvent dériver dans le temps. Or nous allons travailler dans une chambre réverbérante en béton armé et sur plusieurs années, ces contraintes pourraient engendrer des difficultés de mise en œuvre ou une dérive de la fidélité des mesures au cours du temps. Nous ne pouvons pas prendre ces risques avec ce type de capteur.

Les traqueurs acoustique plus précisément à ultrasons sont influençables par la température et l'humidité ambiantes et sont perturbés par les bruits ultrasonores parasites. Les conditions atmosphériques ne sont pas maîtrisées à l'IRBA surtout entre les différents lieux d'essai disponibles et selon les saisons. Notre environnement de travail ne permet pas l'utilisation de ce type de traqueur.

Les traqueurs optiques présentent l'inconvénient d'avoir une zone d'étendue de mesure limitée à  $\pm 60^\circ$  à l'horizontale et  $\pm 50^\circ$  en verticale. Ces limites sont incompatibles avec nos spécifications énoncées relatives à l'amplitude des mouvements de tête.

Les traqueurs hybrides comportent plusieurs types de capteurs employés dans les traqueurs précédents, donc pour les mêmes motifs ils ne peuvent pas non plus convenir à notre besoin. De plus, l'incertitude de mesure peut atteindre 10 mm voir plus pour certains modèles.

Les traqueurs électromagnétiques sont relativement performants, incertitude inférieure au millimètre en champ proche, mais ces appareils ne peuvent être exploités sans précaution dans un environnement métallique. La résolution dépend de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Les câbles peuvent entraver le mouvement.

Malgré des contraintes assez fortes, le choix du traqueur électromagnétique s'impose par défaut.

Les modèles Fastrak ou Liberty de chez Polhemus de type électromagnétique sont les plus adaptés aux besoins de l'équipe Audition de l'IRBA. Ces modèles offrent un bon compromis entre exactitude, dynamique et latence de mesure (voir annexe n°1). Un autre modèle (Bird produit par Ascencion) a pu être testé et a permis de réaliser des pré-validations

de méthodes. Cependant, le modèle Bird n'a pas été retenu notamment en raison de ses fonctionnalités logicielles réduites. Finalement le modèle Fastrak (voir figure 56) a été choisi pour réaliser les essais en laboratoire dans le cadre de l'étude PERTIA. Pour rappel (voir §1.1.4.2), ce traqueur est composé d'un cube émetteur et d'un récepteur (capteur de position), l'ensemble étant distant d'environ un mètre. L'émetteur et le récepteur sont reliés de façon filaire au boîtier de mesure. Ce boîtier électronique permet de transmettre à un PC via une RS 232 les coordonnées (X, Y, Z) et les angles d'orientation ( $Az=V$ ,  $El=N$ ,  $Rl=C$ ) en temps réels. Dans le menu du logiciel, une fonction permet d'aligner le repère du traqueur Fastrak sur un repère physique de l'environnement proche.

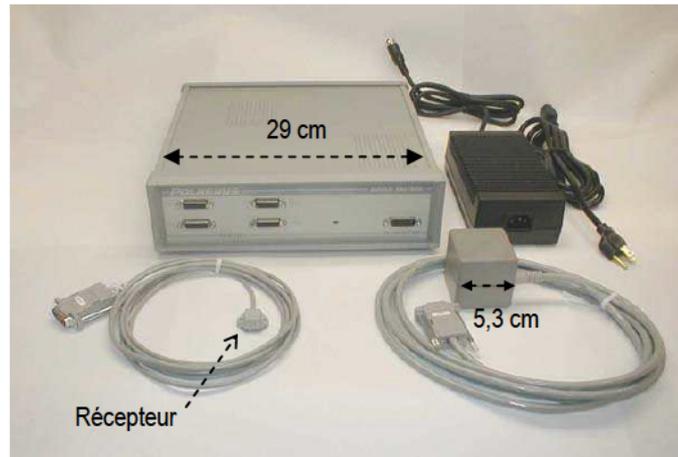


Figure 56 : Traqueur Fastrak composé du gros cube gris émetteur, du petit capteur de position (récepteur), du boîtier gris d'interface et d'une alimentation secteur, d'après le manuel d'emploi Fastrak (2007).

### 2.1.2. Périmètre et originalité de l'étude

Les articles répertoriés dans la bibliographie décrivent en majorité des études de distorsion du champ électromagnétique sur des distances émetteur récepteur variant d'une trentaine de centimètres à plusieurs mètres avec un pas au minimum d'une trentaine de centimètres. Mais peu de mesures ont été réalisées avec un pas plus petit de l'ordre de quelques centimètres et sur des distances plus courtes, inférieures au mètre. De même, peu d'études traitent des erreurs d'orientations détectées avec un pas angulaire de l'ordre du degré. Or dans un cockpit d'aéronef militaire, le volume d'évolution du récepteur monté sur le casque est restreint et les mouvements angulaires peuvent être faibles pour certains axes. Dans le cas de son spatialisé au travers des écouteurs du casque du pilote, les faibles variations de la position (au plus quelques dizaines de centimètres et de degrés) du capteur situé sur le casque doivent pouvoir être déterminées avec la plus faible erreur possible. En effet, dans le cas d'une menace présentée par une alarme spatialisée, quelques degrés suffisent pour percevoir cette menace dans le bon quadrant de l'aéronef. En cas d'erreur, la décision prise peut être erronée et la tactique d'évitement appliquée est alors difficilement rectifiable en raison de la vitesse élevée et de la trajectoire de l'aéronef.

Le système d'étalonnage à concevoir doit permettre de réaliser des mesures dans un volume de l'ordre de  $0,125 \text{ m}^3$ . Un des objectifs est de pouvoir, avant toute expérimentation mettant en œuvre le capteur de position, décider ou non d'appliquer une correction et même de renoncer à l'expérimentation en cas de fortes perturbations aléatoires du champ électromagnétique dans la zone de mesure. C'est pourquoi l'objectif principal est de mettre en évidence une erreur importante de quelques millimètres (inférieure à 10 mm) et de quelques degrés (supérieure à  $5^\circ$ ). Etablir les performances métrologiques du traqueur n'est pas notre priorité. Par contre, nous essayerons de réaliser un système d'étalonnage le plus répétable et reproductible possible avec une forte fidélité. L'exactitude et la justesse du système d'étalonnage par rapport à des valeurs nominales ne sont pas la priorité non plus car nous travaillons par comparaison. En effet, les coordonnées, celles du traqueur et celles du système d'étalonnage sont fournies dans le même repère de référence après alignement. La mesure des coordonnées est donc relative au repère de référence et liée au repère physique du système d'étalonnage. Ce qui importe, c'est la différence obtenue par comparaison entre les valeurs du traqueur et celles du système d'étalonnage.

## 2.2. Méthode par comparaison directe

La méthode d'étalonnage choisie repose sur la comparaison directe d'une position connue exactement (étalon de travail ou référence) et la même position mesurée (mesurande) par le traqueur. A partir des coordonnées de position, cette méthode doit permettre de connaître l'écart ou erreur de mesure. Le défi est donc de positionner le capteur dans une position connue.

Que ce soit en statique ou en dynamique, l'expression « Mesurer c'est comparer » illustre pleinement la méthode d'étalonnage choisie.

L'égalité ci-dessous illustre l'objet de la mesure : le point mesuré par le traqueur a-t-il les mêmes coordonnées que le point de référence dans le même repère orthonormé ?

$$M_{\text{réf.}}(x_{\text{réf.}}; y_{\text{réf.}}; z_{\text{réf.}}) = M_{\text{mes.}}(x_{\text{mes.}}; y_{\text{mes.}}; z_{\text{mes.}}) ?$$

Il en est de même pour les angles d'orientation du récepteur :

$$\Psi_{\text{réf.}} = \Psi_{\text{mes.}} ? \Theta_{\text{réf.}} = \Theta_{\text{mes.}} ? \Phi_{\text{réf.}} = \Phi_{\text{mes.}} ?$$

## 2.3. Moyens

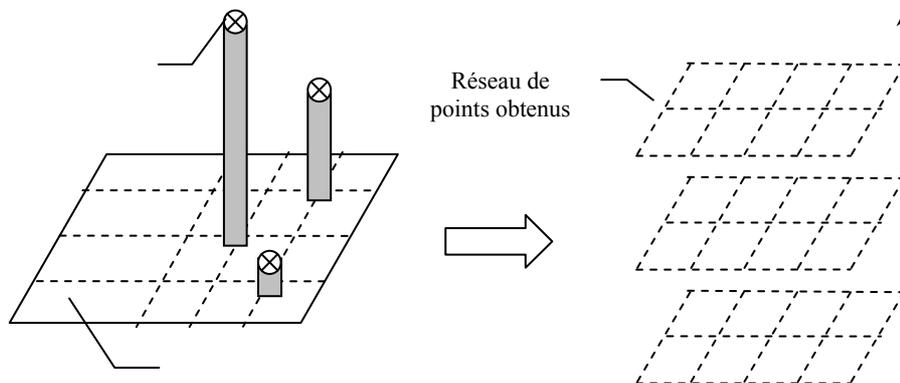
Pour l'étalonnage statique en localisation et en orientation, compte tenu des coûts et de la faisabilité dans le temps imparti, le choix s'est porté sur la conception et sur la réalisation d'un moyen mécanique d'étalonnage à déplacement manuel en matériau amagnétique. Ce moyen d'essai doit permettre d'appliquer la méthode précédente de comparaison. Le choix d'un système d'étalonnage robotisé ou d'un bras de mesure dimensionnel a été écarté en raison du coût et des perturbations du champ électromagnétique sur le traqueur induites par la présence de parties métalliques ou par l'effet des motorisations ou des axes du robot.

L'étalonnage dynamique n'a pas été réalisé. Cependant, le lecteur trouvera au §2.3.2 une réflexion sur cette problématique.

### 2.3.1. Dispositif d'étalonnage statique

Pour usiner le dispositif d'étalonnage, le matériau amagnétique (PVC type industrie qui répond aux exigences ASTM-D 1784-78 type 1) est sélectionné. Le choix de ce matériau est un compromis entre la facilité d'usinage, l'exactitude désirée (quelques dixièmes), la dilatation en température et la robustesse requise (comparativement au bois). Le moyen d'étalonnage à réaliser doit permettre d'appliquer la technique de comparaison entre la position connue et la position mesurée par le traqueur. La définition du système d'étalonnage a été conçue par l'auteur en s'inspirant des différents systèmes existants rapportés dans la revue bibliographique précédente. Par priorité, le dispositif d'étalonnage pourra d'abord traiter les coordonnées de position cartésiennes. Puis, un second dispositif d'étalonnage qui pourra s'adapter au premier, mesurera les angles d'orientation.

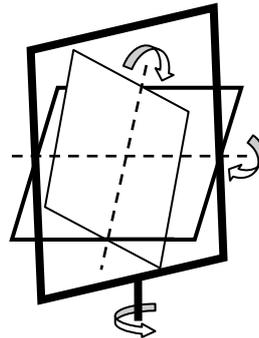
Le premier système est composé d'un plateau horizontal et d'un ensemble de colonnes sur lesquelles se fixe le capteur. Les colonnes se positionnent selon des pas réguliers sur le plateau. Un support pour le capteur se fixe précisément sur chaque colonne. L'ensemble permet au capteur de décrire successivement les points d'un réseau. L'intérêt de ce dispositif est d'utiliser la dimension verticale pour le positionnement du capteur afin d'éviter la dérive de flambage des éléments de positionnement dans la dimension horizontale. Les pas fixes de positionnement permettent de connaître la position exacte ou en tout cas répétable de chaque point mesuré. La figure 57 illustre le projet du système d'étalonnage. Des tenons entre le plateau horizontal et les colonnes sont prévus afin d'obtenir une répétabilité optimale des positionnements et des ajustements.



**Figure 57 : Schéma de principe du dispositif d'étalonnage des coordonnées cartésiennes afin d'obtenir un réseau de points reproductible**

Le second système dédié au positionnement en orientation est composé de deux dispositifs différents. Le premier est un ensemble de support de capteur avec des pentes fixes qui peuvent s'adapter sur chaque colonne. Les pentes choisies en élévation sont de  $1^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $30^\circ$  et  $45^\circ$  plus une autre avec  $15^\circ$  d'élévation et  $25^\circ$  de roulis. Un second dispositif, appelé « orientateur », est imaginé à partir d'un système à cardans dans les trois axes. Ce système

doit permettre des variations de l'ordre du degré. La figure 58 représente le projet de l'orientateur.

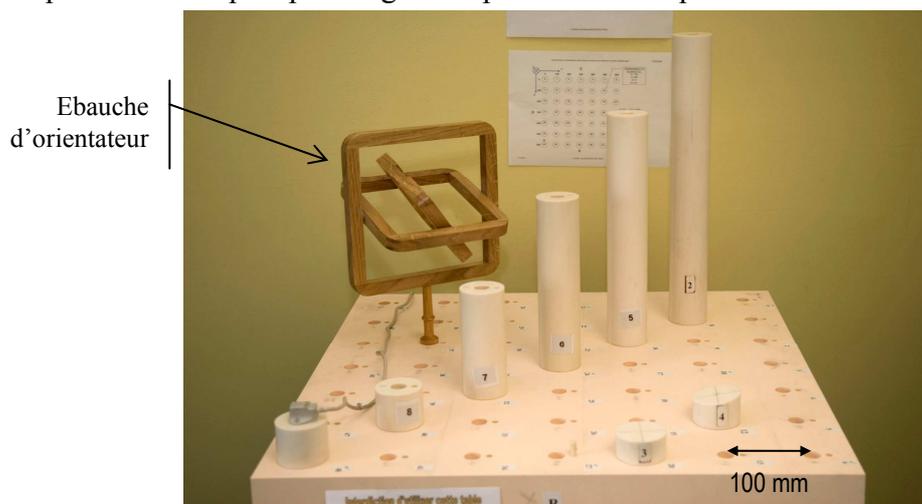


**Figure 58 : Schéma de principe du dispositif d'étalonnage à cardans des coordonnées angulaires**

La réalisation de la pièce principale, l'échiquier, en raison de sa dimension, a été sous-traitée à la société AMC Automation. Les autres pièces, plus petites, ont été fabriquées à l'atelier mécanique de l'IRBA. Le dispositif d'étalonnage comporte plusieurs systèmes de mesure en PVC (échiquier, colonnes, pentes, orientateur), une table pour supporter ces équipements et une potence pour supporter l'émetteur du traqueur et le boîtier d'interface. Chaque élément du dispositif est décrit dans les paragraphes suivants. Les schémas d'origine dessinés pour les pièces mécaniques par l'auteur se trouvent en annexe 3.

### **2.3.1.1. Table d'étalonnage et colonnes**

La table d'étalonnage (Figure 59 et annexe 3) réalisée est une sorte d'échiquier horizontal de 70 cm × 70 cm à 49 trous espacés régulièrement de 10 cm. Cet échiquier reçoit la pièce servant de support au capteur ou les colonnes plus le support. Son épaisseur importante (5 cm) permet d'une part d'effectuer des trous profonds de positionnement pour les colonnes avec un jeu minimal et aussi de réduire le flambage de l'échiquier. Trois pieds réglables en hauteur avec un pas de vis fin (1 mm par tour) permettent d'obtenir le niveau horizontal. Une clé spécifique a été fabriquée pour régler les pieds de l'échiquier.



**Figure 59 : Vue de l'échiquier, des colonnes et support de capteur, photo IRBA 2009**

Une petite colonne plane, support du récepteur du traqueur, peut être emboîtée sur chaque colonne. Une croix centrée est gravée sur la face supérieure de cette colonne. Cinq colonnes

de différentes hauteurs de 5 à 45 cm peuvent recevoir la pièce support et permettre ainsi d'atteindre différents étages de mesure. Des tenons repositionnables permettent de fixer et de détromper la position des colonnes.

L'intérêt de ce type de système d'étalonnage est qu'il est facilement transportable et aisément mis en œuvre, comme dans une soute d'aéronef. Ce système d'étalonnage peut aussi être décliné en une version plus réduite pour l'échiquier. Malgré un temps relativement long de relevé des mesures (30 s par mesure), le recueil des données a été réalisé par série ou de façon individuelle. L'utilisation d'un logiciel de recueil automatisé des données d'acquisition a été écartée car cela n'offre pas de souplesse suffisante dans le recueil. Pour une mesure exacte et absolue, le principal défi est de pouvoir caler le centre électromagnétique du récepteur avec précision au centre de la colonne support. En mesure relative par comparaison, ce problème est évité grâce à l'alignement des repères, du moins pour la localisation. La figure 60 présente l'ensemble des supports, des colonnes et des tenons fabriqués.

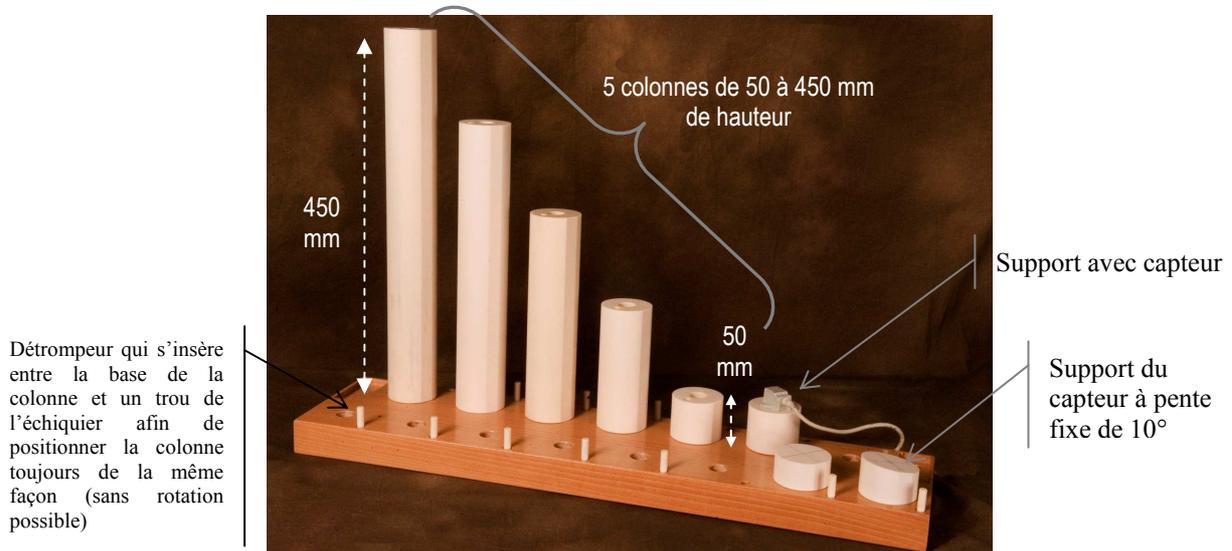


Figure 60 : Pièces du système d'étalonnage en localisation et en orientation fixe

### 2.3.1.2. Pentes fixes

Plusieurs supports de capteurs avec des pentes fixes et différentes ont été fabriqués et sont compatibles avec les colonnes précédentes. Ces supports permettent de tester la réponse en orientation du traqueur. La pente de  $10^\circ$  et la croix de la pente à  $1^\circ$  sont visibles sur la figure 61.

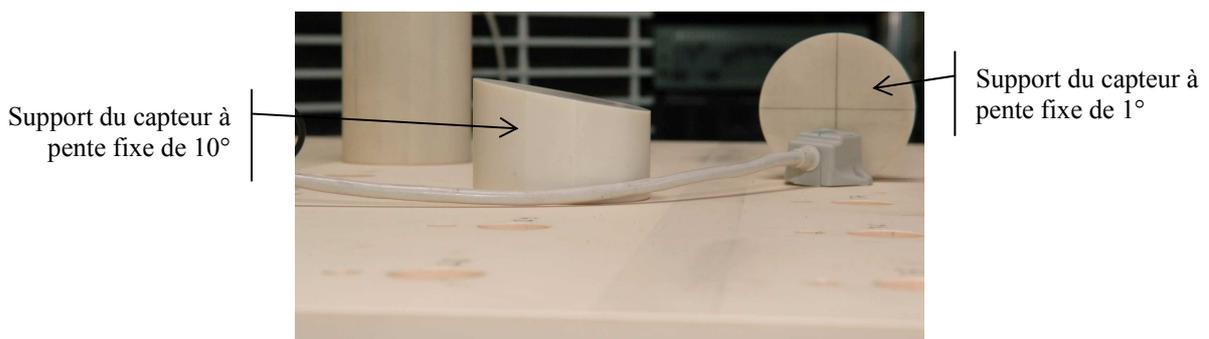


Figure 61 : Supports de capteur à pente fixe

### 2.3.1.3. Positionneur angulaire : « Orientateur »

De plus, afin de positionner le capteur dans une orientation quelconque un système à cardans suspendus est imaginé et réalisé. Une première ébauche en bois a été réalisée afin d'étudier la faisabilité du système notamment concernant le volume nécessaire, le positionnement du capteur, et le cheminement du câble. En annexe 3 se trouve le projet de schéma et la photo de l'ébauche. Le système à cardan a été aussi réalisé (voir figure 62).

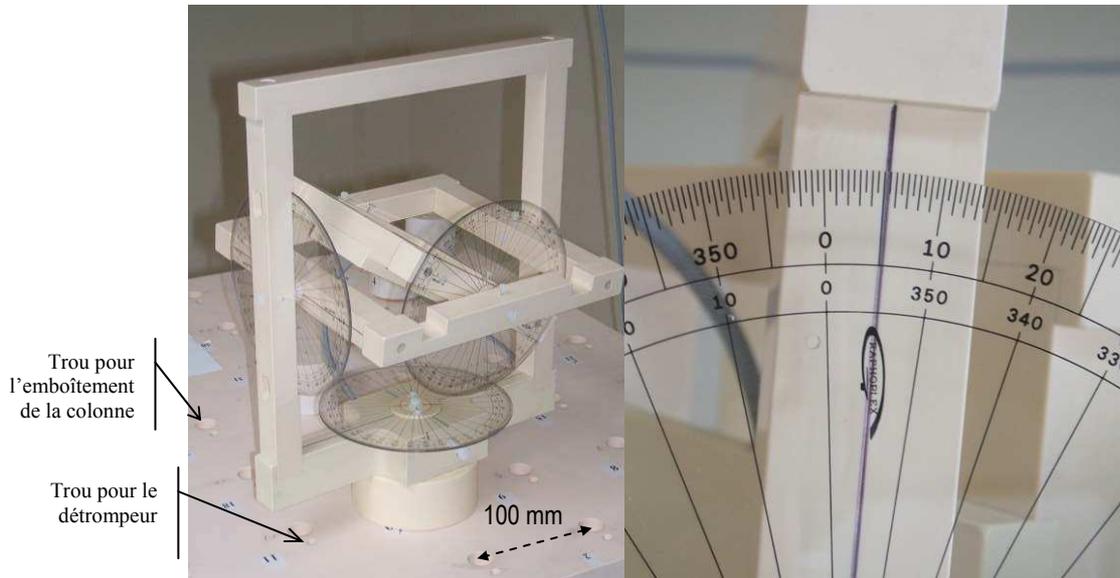


Figure 62 : Vue d'ensemble et zoom sur la graduation de l'orientateur

### 2.3.1.4. Support et conditions de mesure

A défaut de pouvoir disposer d'une chambre anéchoïque électromagnétique, nous avons utilisé une pièce du hall d'essai. Evidemment, la structure métallique du bâtiment et les réseaux électriques et informatiques peuvent influencer sur les mesures. Les mesures ont été réalisées dans une zone de surface au sol de 2 m × 3 m, libre d'accès pour cette expérimentation. La température était relativement stable ( $20^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$ ) pendant la période d'utilisation. Nous avons pris le soin de choisir des meubles en plastique sans partie métallique à proximité de l'espace d'expérimentation. Une sorte de potence associée à un plancher, permet de supporter l'émetteur Fastrak ainsi que le boîtier d'interface. L'ensemble de la potence en bois contreplaqué est assemblé sans la moindre partie métallique. Pour travailler à une hauteur ergonomique d'environ un mètre, une table supportant l'échiquier a été réalisé en bois massif et assemblé en tenon mortaise par l'atelier de menuiserie.

Tous les emplacements (sol, table, échiquier, potence) ont été repérés afin de révéler tous les déplacements accidentels (voir figure 63). Le cheminement des câbles a été établi afin d'éviter des boucles ou des croisements entre les câbles. Comme recommandé dans le manuel d'installation et dans la revue bibliographique, un soin particulier a été apporté au positionnement des câbles, de l'émetteur et du récepteur. Toutes ces précautions ont été prises afin de réduire les effets perturbateurs sur les mesures, en particulier vis-à-vis des interférences ou des couplages électromagnétiques éventuels.

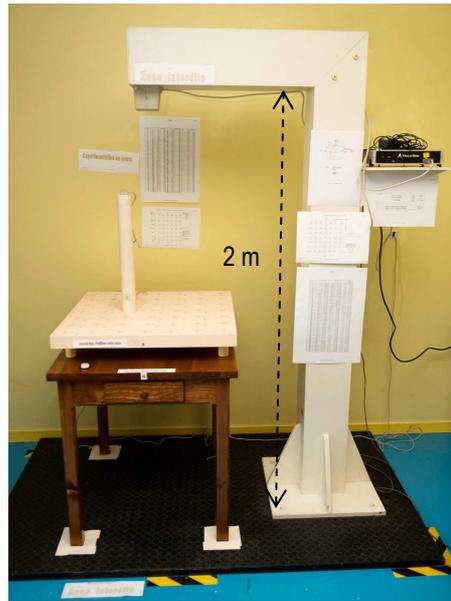


Figure 63 : Dispositifs d'étalonnage statique en localisation

### 2.3.2. Réflexion sur l'étalonnage en dynamique

Etant donné que le système Fastrak ne met pas en œuvre de pièces mobiles pour réaliser la mesure de position, celui-ci n'est donc pas sensible aux problèmes relatifs à l'inertie mécanique. Par conséquent, les grandeurs mesurées en dynamique ne devraient pas être affectées par la vitesse ou l'accélération du récepteur. Les grandeurs mesurées en statique devraient donc être transposables en dynamique. Cette affirmation suppose que les bobines restent bien collées entre elles et que leur positionnements intrinsèques n'évoluent pas au cours du déplacement du récepteur. Dans ce cas, seul le débit des données pourraient limiter l'actualisation des positions mesurées et engendrer une latence. La latence maximale du système Fastrak est de 8,5 ms ce qui semble *a priori* suffisant dans le cadre de nos mesures (décalage de 0,85 mm pour une vitesse de l'ordre de 10 cm/s).

Toutefois, si l'on souhaite vérifier les caractéristiques de mesure en dynamique, l'idéal serait de mouvoir le récepteur avec un système amagnétique d'excitation en mouvement et comparer l'excitation en mouvement délivrée et la réponse fournie par le traqueur en fonction du temps, en synchronisant évidemment l'excitation et la réponse. Pour cela, on fixerait le récepteur sur l'excitateur puis on comparerait la tension associée de l'excitation à celle associée à la mesure du récepteur en les visualisant, par exemple, sur un oscilloscope. Pratiquement, un pot vibrant amagnétique (excitateur) serait une solution mais qui est difficile à concevoir du fait de déporter la motorisation électrique.

Une autre solution serait d'utiliser un bras de mesure dimensionnel amagnétique comme référence. De même, le récepteur étant collé sur le bras de mesure référent, la comparaison de l'excitation et de la réponse serait obtenue directement. Les atouts du bras de mesure sont sa grande exactitude et les possibilités de son logiciel d'obtenir le vecteur vitesse en temps réel, de calculer la latence en différé et si besoin de réaliser un étalonnage en continu, ce que ne permet pas un échiquier d'étalonnage.

## 2.4. Résultats

### 2.4.1. Caractérisations du système d'étalonnage

L'objectif des paragraphes suivants est de connaître l'exactitude finale du système d'étalonnage qui servira de référence pour l'étalonnage du traqueur. Les différents éléments ont pu être caractérisés. Le lecteur trouvera les caractéristiques de chaque pièce en annexe 4, ne sont présentés ici que les principaux résultats.

#### 2.4.1.1. Caractérisation de l'échiquier

La vérification de l'emplacement des 49 trous de l'échiquier a fait l'objet d'une prestation réalisée par la société « Dimension 3 » dont le matériel de mesure est fourni et vérifié par des sociétés accréditées ISO/IEC 17025 : 2005. Les mesures ont été réalisées au moyen d'un bras de mesure dimensionnel ROMER avec une répétabilité de  $\pm 0,017$  mm. Les 49 points de mesure sont numérotés de 0 à 48. Un repère orthonormé XYZ est établi avec pour origine le point 0 de l'échiquier (voir Figure 64) et les parallèles aux arêtes C et D passant par les points de l'échiquier. Pour le point 0, les coordonnées mesurées correspondent de fait aux coordonnées théoriques, soit (0, 0, 0). La synthèse des écarts entre les valeurs nominales (définies à la conception) et les valeurs réelles mesurées est présentée (Tableau I et Figure 64). L'ensemble des valeurs est consultable en annexe 4. Afin d'apprécier « l'écart global » entre la position mesurée et la position théorique, le calcul suivant est réalisé pour chaque point :

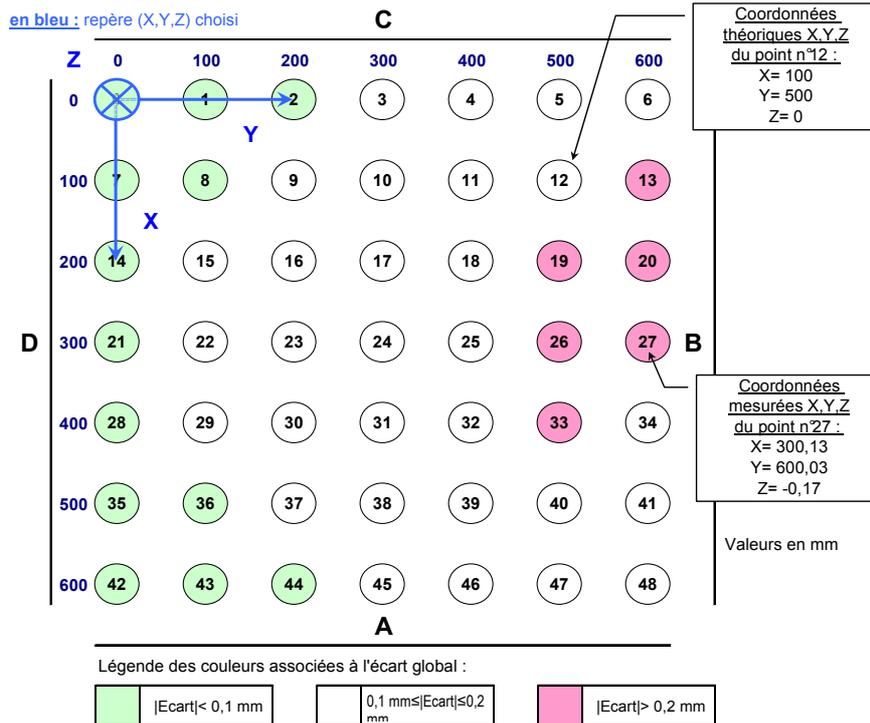
$$Eg = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (20)$$

où  $E_x$ ,  $E_y$  et  $E_z$  correspondent aux écarts mesurés respectivement selon les axes X, Y et Z.

**Tableau I : Synthèse de la caractérisation de l'échiquier de 49 trous**

Ecart des valeurs mesurées par rapport aux valeurs nominales				
	Ecart en X	Ecart en Y	Ecart en Z	Ecart global
Moyenne (mm)	0,07	0,01	-0,10	0,14
Médiane (mm)	0,09	0,01	-0,11	0,16
Maximum (mm)	0,18	0,07	0,04	0,22
Minimum (mm)	-0,09	-0,04	-0,18	0,00
Nombre d'écarts en valeur absolue < 0,1 mm	<b>28</b>	<b>49</b>	<b>21</b>	<b>13</b>
Nombre d'écarts en valeur absolue < 0,2 mm	<b>21</b>	<b>0</b>	<b>28</b>	<b>30</b>
Nombre d'écarts en valeur absolue > 0,2 mm	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6</b>
Nombre d'écarts positifs	<b>39</b>	<b>33</b>	<b>4</b>	<b>s.o.</b>
Nombre d'écarts négatifs	<b>10</b>	<b>16</b>	<b>45</b>	<b>s.o.</b>

D'une façon globale, l'échiquier présente une conformité acceptable au plan de définition : écart global maximum d'environ 0,2 mm. La distribution des écarts n'est pas homogène mais est centrée à  $\pm 0,1$  mm.



**Figure 64 : Identification et écarts des points de mesure de l'échiquier**

De façon plus détaillée, en ce qui concerne les écarts  $E_X$ ,  $E_Y$  et  $E_Z$ , l'écart maximum en valeur absolue observé est de 0,18 mm. Pour les trois axes, tous les écarts sont inférieurs à 0,20 mm. Pour l'axe Y, les écarts  $E_Y$  en valeur absolue sont inférieurs à 0,1 mm. A noter que les écarts  $E_Z$  sont quasiment tous négatifs. Les écarts globaux sont majoritairement situés entre 0,1 et 0,2 mm. La figure 64 montre des zones qui peuvent être délimitées selon les trois gammes choisies d'écarts. Cette caractérisation est évidemment dépendante du choix du repère orthonormé.

#### 2.4.1.2. Caractéristique du support de capteur

Le support de capteur (Pièce n°1) est un élément important du dispositif car il positionne au final le capteur et est commun à toutes les mesures de position. La caractérisation de cet élément a fait l'objet d'une prestation réalisée par la société « DIM 3 ». Les mesures ont été réalisées au moyen d'un bras de mesure dimensionnel ROMER avec une répétabilité de  $\pm 0,017$  mm. La caractérisation de cet élément est présentée dans le tableau suivant (Tableau II).

**Tableau II : Caractéristiques dimensionnelles du support de capteur**

Hauteur du support de capteur	49,90 mm
Ecart de la croix de centrage par rapport au centre du diamètre du support	0,15 mm
Ecart angulaire de parallélisme des 2 faces du support	0,05°

### 2.4.1.3. Caractérisation des colonnes

La caractérisation des cinq colonnes a fait l'objet d'une prestation réalisée par la société « FELIN SA ». Les mesures ont été réalisées au moyen d'un bras de mesure dimensionnel LK avec une incertitude annoncée par le prestataire de  $\pm 0,003$  mm. La synthèse des mesures réalisées est rapportée dans le tableau suivant (Tableau III).

**Tableau III : Caractéristiques dimensionnelles des colonnes classées par ordre croissant des hauteurs**

	Pièce n°8	Pièce n°7	Pièce n°6	Pièce n°5	Pièce n°2
Hauteur de la colonne mesurée	49,98 mm	150,01 mm	250,05 mm	350,05 mm	449,97 mm
Ecart par rapport à la valeur nominale	-0,02 mm	0,01 mm	0,05 mm	0,05 mm	-0,04 mm
Ecart angulaire de parallélisme des 2 faces de la colonne	0,04°	0,06°	0,05°	0,03°	0,07°

Par rapport aux valeurs nominales et aux tolérances fixées ( $\pm 0,2$  mm), les pièces réalisées sont conformes au plan de définition.

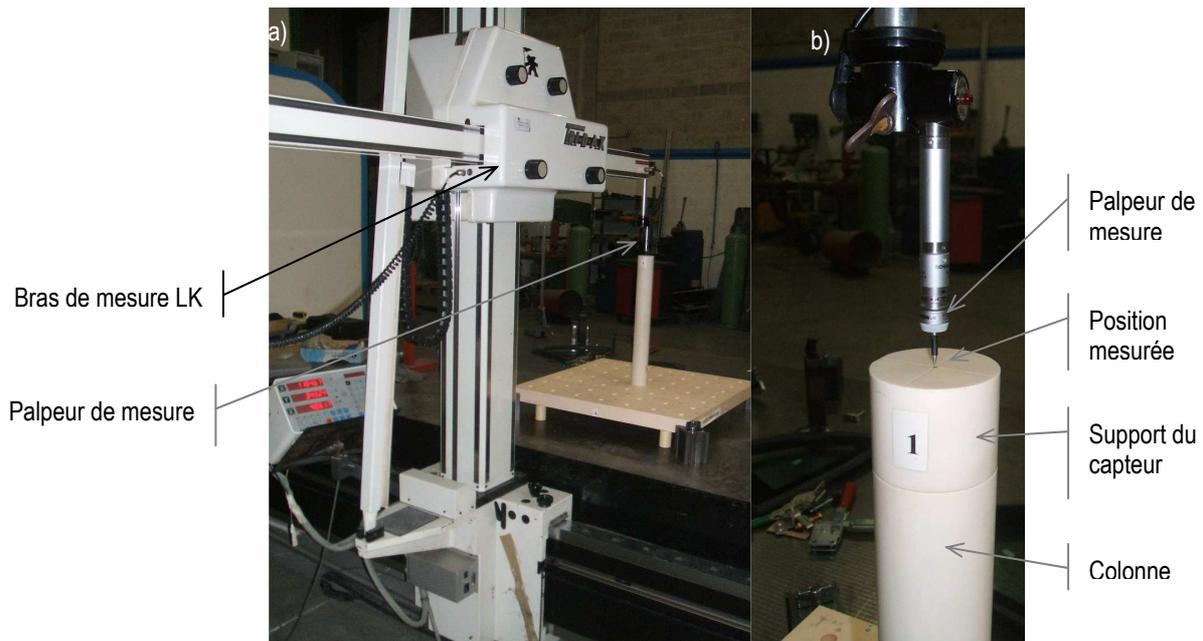
### 2.4.1.4. Caractérisation du système d'étalonnage statique en localisation

La caractérisation individuelle de chaque élément montre une conformité par rapport aux tolérances fixées. Le plus grand écart constaté pour les colonnes est de 0,05 mm, ce qui est inférieur aux écarts de l'échiquier. Qu'en est-il de l'ensemble final qui constitue le système d'étalonnage de référence ? En effet, le jeu inhérent à l'assemblage des différentes pièces doit être pris en compte. Quel réseau de points faut-il définir ? Par rapport aux deux principales applications envisagées avec le traqueur à savoir la détermination de la position de la tête ou le pointage avec un stylet, et en accordance avec l'étude bibliographique, un réseau de points de mesures servant de référence a été défini. Ce réseau de 294 points a été établi par l'assemblage successif des différentes colonnes. Cet assemblage est décrit dans le tableau suivant (Tableau IV). Ce réseau de points est constitué à partir de chacune des 49 positions de l'échiquier et est construit par hauteur correspondante à chaque colonne, soit au total six hauteurs.

**Tableau IV : Construction du réseau de 294 points de référence**

Pièce n°	1	2	5	6	7	8	
Type	Support du capteur	Colonne	Colonne	Colonne	Colonne	Colonne	
Hauteur nominale	50	450	350	250	150	50	
Assemblage des pièces							nombre de points
Hauteur relative 50	X						49
Hauteur relative 100	X					X	49
Hauteur relative 200	X				X		49
Hauteur relative 300	X			X			49
Hauteur relative 400	X		X				49
Hauteur relative 500	X	X					49
Total :							294

La caractérisation de l'ensemble, c'est-à-dire du système d'étalonnage en localisation statique a fait l'objet d'une prestation réalisée par la société « FELIN SA ». Les mesures ont été réalisées au moyen d'un bras de mesure dimensionnel LK (voir figure 65) avec une incertitude annoncée par le prestataire de  $\pm 0,003$  mm.



**Figure 65 : a) Vue générale du banc de mesure LK utilisé pour constituer le réseau de points de référence, b) zoom sur le palpeur pointant sur le centre du support pour l'une des 294 positions mesurées**

Le repère (X,Y,Z) défini par le prestataire correspond au niveau du plan de l'échiquier au repère orthonormé passant par les points n°0, n°6 (à 600 mm en Y) et n°42 (à 600 mm en X) et ajusté au sens des moindres carrés. L'horizontalité du repère est établie à partir des cercles correspondant aux trous de l'échiquier. Après ajustement, l'écart le plus grand constaté entre le repère réel de l'échiquier et le repère virtuel exact est de -0,04 mm. L'ordre de relevé pour chaque sous-ensemble de 49 points commence par la hauteur la plus basse (Pièce n°1) jusqu'à la hauteur la plus haute (Pièce n°2). Les tenons sont insérés systématiquement dans chaque pièce. Après relevé, pour une raison de commodité, un changement de repère est effectué et le nouveau repère est centré au point n°24 afin d'obtenir un réseau de points équilibrés en X et Y par rapport à la valeur nulle. Afin d'apprécier la distance d'erreur entre la position mesurée et la position nominale, « l'écart global » est calculé selon la formule (20). La synthèse des écarts entre les valeurs nominales et mesurées est présentée dans le tableau suivant (Tableau V). L'ensemble des données brutes est consultable en annexe 5. Cette caractérisation est comme précédemment liée au repère orthonormé choisi.

**Tableau V : Synthèse de la caractérisation du réseau 294 de points de référence**

nb=294 points mesurés	Ecart en X	Ecart en Y	Ecart en Z	Ecart global
Moyenne (mm)	0,12	0,18	-0,38	0,60
Médiane (mm)	0,01	0,07	-0,40	0,49
Ecart-type (mm)	0,35	0,40	0,14	0,37
Maximum (mm)	1,20	1,86	0,19	2,14
Minimum (mm)	-1,18	-0,55	-0,62	0,08
<b>Nombre d'écarts tel que <math> \text{Ecart}  &lt; 0,1</math> mm</b>	<b>144</b>	<b>119</b>	<b>11</b>	<b>2</b>
<b>Nombre d'écarts tel que <math>0,1 &lt;  \text{Ecart}  &lt; 0,5</math> mm</b>	<b>104</b>	<b>130</b>	<b>231</b>	<b>160</b>
<b>Nombre d'écarts tel que <math> \text{Ecart}  &gt; 0,5</math> mm</b>	<b>46</b>	<b>45</b>	<b>52</b>	<b>132</b>
Nombre d'écarts positifs	<b>163</b>	<b>196</b>	<b>6</b>	<b>s.o.</b>
Nombre d'écarts négatifs	<b>131</b>	<b>98</b>	<b>288</b>	<b>s.o.</b>

---

D'une façon globale, le réseau de point présente une conformité acceptable : écart global moyen de 0,60 mm avec un écart-type de 0,37 mm. En majorité, 160 écarts globaux sont compris entre 0,10 mm et 0,50 mm. La distribution des écarts n'est pas homogène : plus les hauteurs augmentent plus les écarts augmentent (voir les données brutes en annexe 5). Ce constat semble logique car l'écart à la verticalité du système augmente avec la hauteur.

De façon plus détaillée, en ce qui concerne les écarts  $E_X$ ,  $E_Y$  et  $E_Z$ , l'écart maximum observé est de 1,86 mm en Y. Pour les axes Y et Z tous les écarts restent inférieurs à 1,20 mm. A noter que les écarts  $E_Z$  sont quasiment tous négatifs. Au final, le réseau de points de référence a pu être déterminé et est consultable en annexe 5.

Ce réseau est constitué à partir d'une unique mesure relevée à chacune des 294 positions. Les erreurs systématiques et aléatoires ne peuvent donc pas être estimées.

Cependant, afin d'évaluer la dispersion des mesures en reproductibilité, 10 mesures sont répétées avec la plus haute pièce n°2 et au centre de l'échiquier (point n°24). L'assemblage et le positionnement des deux pièces (n°1 et n°2) sur l'échiquier sont effectués à chaque répétition. Le choix de cette position correspond au jeu mécanique parmi les plus importants du système d'étalonnage et peut constituer une majoration de la dispersion observable. La dispersion maximale observée est de  $\pm 0,15$  mm par rapport à la valeur moyenne mesurée.

L'erreur de pointage de la machine LK a été déterminée en positionnant 10 fois de suite le pointeur LK avec la pièce n°1 au point n°24. Cela correspond à la dispersion du pointage réalisé par l'opérateur au centre de la croix gravée du support de capteur (pièce n°1). Sur 10 répétitions, la dispersion de pointage est de  $\pm 0,02$  mm par rapport à la valeur moyenne mesurée. Cette erreur de pointage est aussi incluse dans la valeur de la dispersion observée en reproductibilité.

Au final, et en première approche pratique pour chaque position mesurée, la dispersion élargie de  $\pm 2 \times 0,15$  mm est probablement conservatrice par rapport à la valeur exacte de référence. Mais seule la réalisation du budget des incertitudes permettra de se prononcer sur la significativité des écarts constatés. En toute rigueur, pour estimer la « vraie » grandeur de chaque point du réseau, encadrée par une incertitude et pour un niveau de confiance choisi, il faudrait réaliser la mesure de reproductibilité pour tous les points. De plus, afin de se rapprocher d'une distribution gaussienne ou d'une autre à identifier, il faudrait étendre à 50 le nombre de répétitions, soit au total 14700 mesures et manipulations. Mais le lecteur en conviendra, cela représente un volume horaire (à raison de 30 s par mesure) et un coût qui seraient démesurés au regard de notre problématique et de nos exigences dans cette étude.

#### 2.4.1.5. Caractérisation des pentes fixes

Deux supports de capteurs à pentes fixes ont été mesurés : pièce n°3 à 1° et pièce n°4 à 10°. Les mesures ont été réalisées au moyen d'un bras de mesure dimensionnel LK avec une incertitude de  $\pm 0,003$  mm annoncée par le même prestataire que précédemment. La synthèse des mesures réalisées est rapportée dans le tableau suivant (Tableau VI). Le lecteur trouvera en annexe 4 des détails sur la position des points de mesures effectuées.

**Tableau VI : Synthèse de la caractérisation des supports de capteurs à pentes fixes**

	Pièce n°3	Pièce n°4
Valeur nominale de la pente par rapport à l'horizontal	1,00°	10,00°
Valeur mesurée	1,07°	10,11°
Ecart angulaire	0,07°	0,11°

Par rapport aux valeurs nominales et aux tolérances fixées ( $\pm 0,5^\circ$ ), les pièces réalisées sont conformes au plan de définition.

#### 2.4.1.6. Caractérisation de l'orientateur

Les angles d'orientation indiqués par le positionneur angulaire ont été mesurés. Cent-trente orientations ont été mesurées selon les trois axes et avec des pas différents afin de couvrir les zones les plus employées et de réduire le nombre de points à mesurer. Les mesures ont été réalisées au moyen d'un bras de mesure dimensionnel LK. Les emplacements réels sont connus avec une précision de  $\pm 0,02$  mm. Le Tableau VII présente les caractéristiques globales des mesures effectuées. La moyenne des écarts en valeur absolue est de  $0,14^\circ$ , résultat acceptable, étant donné que la valeur d'orientation est obtenue par lecture visuelle. L'intérêt final est évidemment de connaître pour chaque orientation mesurée l'estimation de l'écart par rapport à chaque valeur nominale indiquée par le système d'orientation. Ce système permet donc de pouvoir orienter le capteur avec un pas minimal de l'ordre du degré. Un extrait des valeurs mesurées se trouve en annexe 4.

**Tableau VII : Synthèse de la caractérisation de 130 angles du positionneur angulaire**

nb=130 points mesurés, valeurs en degré	Ecart angulaire
Moyenne	0,05°
Ecart-type	0,16°
Médiane	0,03°
Maximum	0,47°
Minimum	-0,39°
Nombre d'écarts en valeur absolue < 0,1°	54
Nombre d'écarts en valeur absolue < 0,2°	47
Nombre d'écarts en valeur absolue > 0,2°	29
Nombre d'écarts positifs	92
Nombre d'écarts négatifs	38

### 2.4.1.7. Synthèse des caractérisations des systèmes d'étalonnage

Le système complet permettant des étalonnages statiques en position et en orientation répond aux spécifications fixées. La réalisation de ce système a été relativement peu onéreuse (inférieur à 1000€ en matière première et moins d'une centaine d'heure pour la main d'œuvre). Ce système mécanique est simple d'emploi, adaptable et n'impose pas de contraintes particulières. Les caractérisations dimensionnelles établissent une base des valeurs de références plus exactes que les valeurs nominales, nécessaire à l'étalonnage du traqueur. Notre objectif de fournir un système d'étalonnage en localisation, capable de déceler pour un traqueur les erreurs de l'ordre du millimètre, est atteint.

### 2.4.2. **Etalonnage en position**

Le système réalisé et caractérisé en position permet d'étalonner le capteur de position électromagnétique par rapport à un réseau de points de référence. L'évaluation des écarts angulaires du traqueur avec l'orientateur n'a pu être conduite en raison d'autres priorités pour l'étude PERTIA. Afin de limiter le volume du présent rapport, l'étalonnage en localisation statique sera principalement traité dans les chapitres suivants. L'objet de ce paragraphe est de décrire comment a été réalisé l'étalonnage et quels sont les résultats obtenus.

#### 2.4.2.1. Fixation du capteur

Le positionnement et la fixation du capteur de position sont primordiaux pour l'étalonnage :

- le positionnement du capteur sur son support doit être repérable et reproductible,
- le capteur ne doit pas se déplacer de son support pendant les 294 mesures.

A cette fin, une cale carrée en PVC de 35 mm de côté et de 6 mm d'épaisseur a été réalisée en atelier mécanique. Le capteur est fixé par deux vis plastique sur la cale carrée et selon les axes (X,Y) définis par le constructeur. Cette cale est ensuite collée par un morceau de scotch double face en faisant correspondre chaque coin au repère tracé sur le support de capteur (voir figure 66). L'intérêt de la cale est :

- de positionner et de fixer de façon reproductible le capteur
- d'assurer une surface suffisante de collage entre la cale et le support qui avait fait défaut pendant les premiers essais réalisés directement entre le capteur et son support.
- de déplacer la cale sur d'autre support de capteur dans le cadre d'autres étalonnages, comme par exemple sur le support d'orientation.

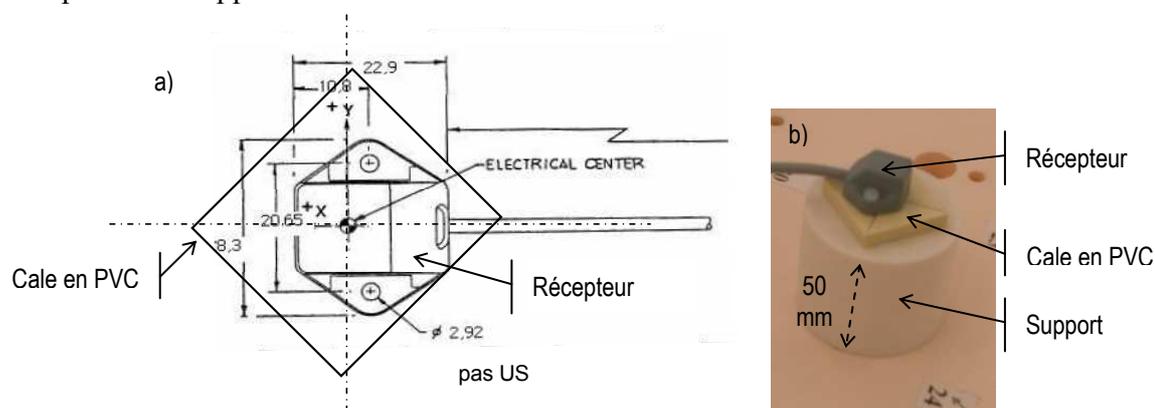


Figure 66 : a) Plan du positionnement, b) vue du capteur électromagnétique sur sa cale

### 2.4.2.2. Positionnement de l'émetteur

Le système Fastrak autorise en pratique de positionner l'émetteur dans n'importe quelle position du volume de fonctionnement étant donné que le logiciel Fastrak d'alignement permet au final de travailler dans le repère de son choix. Cependant, nous avons choisi par commodité de positionner l'émetteur afin que ces axes correspondent logiquement avec ceux de notre plan de travail et aussi pour que l'émetteur n'entrave pas la zone de mesure (cf. figure 67). L'orientation du repère d'origine du Fastrak est inscrite sur le cube de l'émetteur (cf. figure 68). Quelques mesures X, Y, Z sont effectuées avec le Fastrak, et successivement, l'émetteur est déplacé afin de faire coïncider les axes de travail. Le cheminement du câble de l'émetteur le long de la potence ainsi que le choix de la suspension de l'émetteur imposent que les axes Z (Fastrak et plan de travail) soient finalement inversés. L'émetteur est orienté afin de faire correspondre son hémisphère de travail à celui de notre échiquier. Puis l'émetteur est suspendu en bout de la potence et est fixé par quatre vis plastique à cette dernière. La distance de l'émetteur par rapport à une table de travail est de l'ordre de 80 cm.

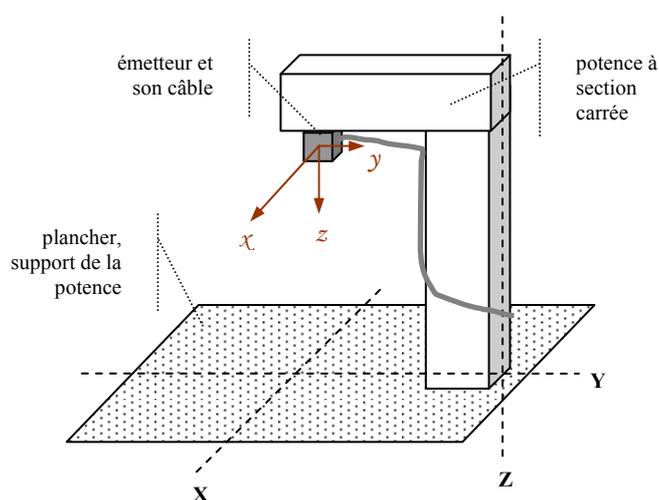


Figure 67 : Positionnement de l'émetteur

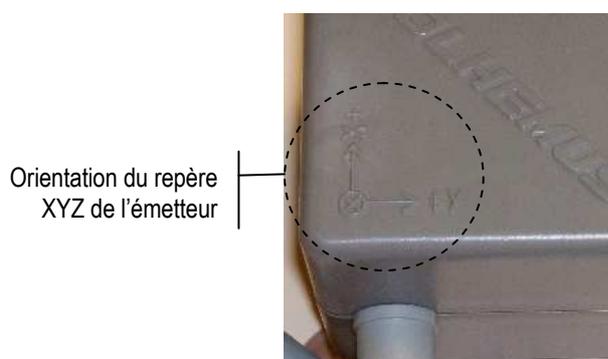


Figure 68 : Vue du repère XYZ gravé sur le cube de l'émetteur Fastrak

### 2.4.2.3. Configuration du traqueur Fastrak

L'interface Fastrak offre plusieurs configurations possibles d'utilisation. Une configuration a été établie puis optimisée en fonction de nos besoins vis-à-vis de l'étalonnage et aussi des dysfonctionnements rencontrés au cours de l'utilisation. Le tableau suivant (Tableau VIII)

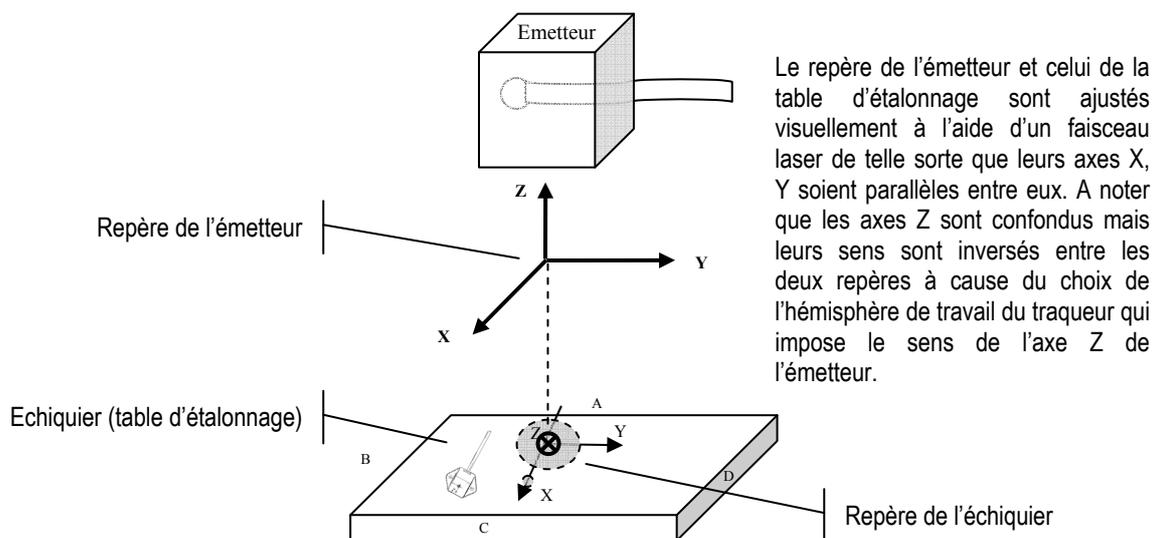
indique les principaux paramètres sélectionnés ainsi quelques consignes d'emploi. L'un des paramètres important est le choix de l'hémisphère de travail de l'émetteur. L'émetteur du Fastrak est positionné afin de faire correspondre son orientation de repère avec celle de l'échiquier. A noter que les orientations des axes Z sont opposées. La figure 69 illustre la disposition des repères.

**Tableau VIII : Configuration du système Fastrak**

Options à configurer	Sélectionner	Commentaires
Hyperterminal :	Polh.ht	
Port série RS232:	COM 4	Attention COM 1 et 2 n'existent pas sur le PC VAIO
Port USB:		Ne fonctionne plus depuis retour de réparation, il faut utiliser la RS 232
Baud:	115200	
Branchement des récepteurs (Receivers):	Stylus	ONE
	R1	TWO
Menu Options du logiciel FT Gui :	métrique	
Upper Hemisphere	0 0 -1	
Alignment & sans boresight P24		
Enregistrement des données	Fichier : conf2201aav1.ftg	
Position des cavaliers	<p><u>Switch</u></p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8</p>	<p><u>Position</u></p> <p>UP UP UP DOWN UP DOWN DOWN UP</p> 

**Figure 1-7 Default I/O Select Dip Switch Settings**

Attention : Ne jamais débrancher la connection RS232 ou USB ou ôter le portable de la station d'accueil lorsque le traqueur Fastrak est en fonctionnement



**Figure 69 : Repères du traqueur Fastrak et de l'échiquier**

#### 2.4.2.4. Mode opératoire

En première étape, un alignement du système Fastrak est d'abord nécessaire. Pour cela, on fait correspondre trois points de mesures sur l'échiquier au repère intrinsèque du Fastrak. Le menu d'alignement du logiciel Fastrak est renseigné (voir figure 70). L'altitude zéro correspond au plan de l'échiquier avec le support (pièce n°1). Ensuite, un repère relatif de travail est établi en prenant le point n°24 comme origine (0 ;0 ;0).

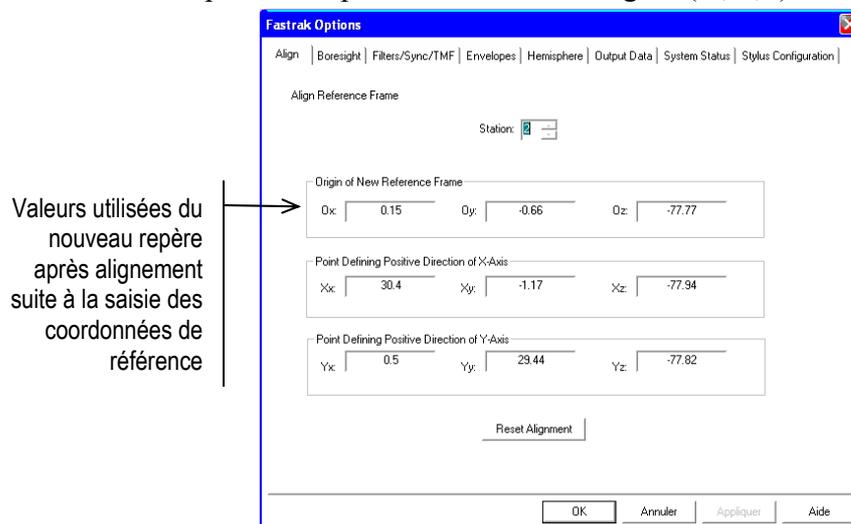


Figure 70 : Menu d'alignement du repère Fastrak avec les valeurs saisies

La seconde étape est le recueil des positions délivrées par le système Fastrak. Pour cela on suit le même ordonnancement que lors du relevé des positions de références. A savoir, pour l'altitude zéro, le récepteur du traqueur est fixée sur son support (pièce n°1) puis déplacé successivement des points n°0 à 48. Ensuite la pièce n°8 est assemblée et les points n°49 à 97 sont mesurés et ainsi de suite...jusqu'à la sixième hauteur (pièce n°2). Nous enregistrons dans un fichier « .txt » pour chaque hauteur de colonne, l'ensemble des coordonnées fourni par le système Fastrak correspondant aux 49 positions de l'échiquier. Au total, les 294 positions sont donc enregistrées dans six fichiers.

#### 2.4.2.5. Résultats

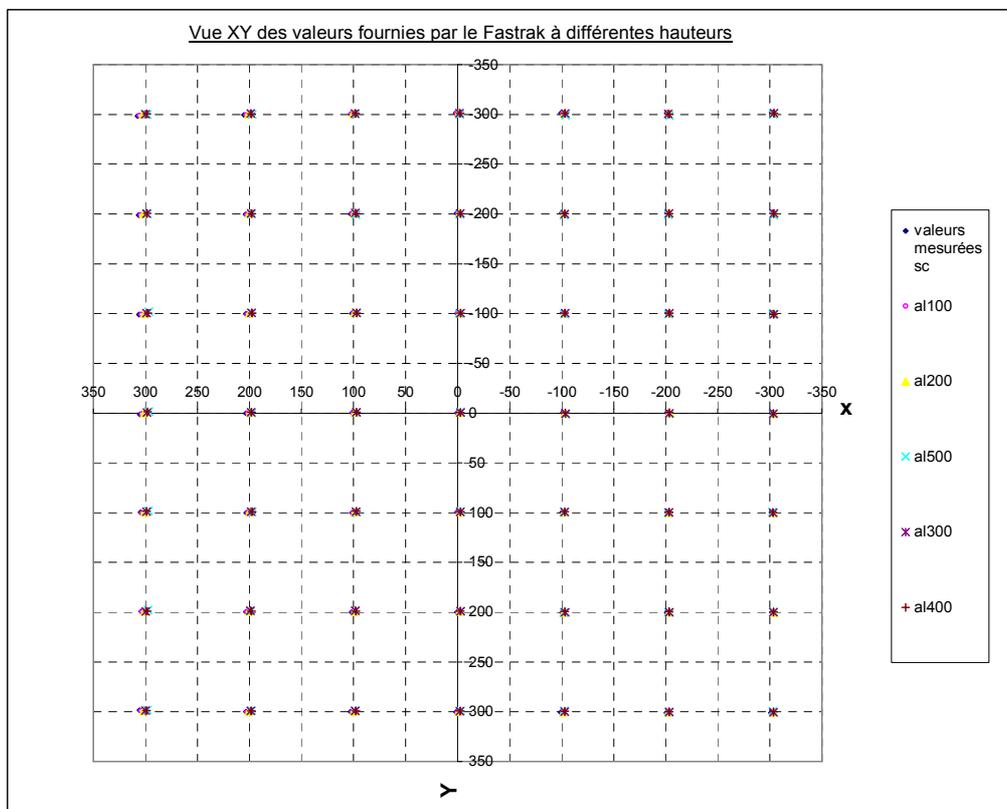
Les données recueillies par le système Fastrak sont ensuite comparées au réseau de point de références. Pour cela, la hauteur de la cale et celle du support de capteur sont prises en compte. Les données sont traitées avec le tableur Excel 2003. En annexe 6, l'ensemble des données est rapporté et constitue l'étalonnage pour chacune des 294 positions mesurées. Le tableau suivant (Tableau IX) synthétise les résultats obtenus. En plus des indicateurs classiques descriptifs (moyenne, écart-type,...) sont indiqués les nombres d'écarts par classe d'écarts. Le calcul de l'écart global a déjà été précisé par la formule (20). Les constats énoncés ci-après sont fortement liés aux conditions de mesures (notamment la distance entre l'émetteur et le récepteur).

D'une façon générale, l'écart global moyen est de 3,05 mm avec un maximum de 8,48 mm. L'écart-type associé est relativement faible : 1,25 mm. Les écarts globaux (81%) sont en majorité supérieurs à 2,00 mm et rarement (6%) dépassent 5,00 mm.

De façon plus détaillée, les écarts ont nettement une tendance négative selon les axes X et Y, positive selon l'axe Z. Les écarts en valeur absolue pour X dépassent souvent (65%) 2,00 mm. Par contre, les écarts en Y et en Z sont en partie inférieurs à 1 mm, respectivement 72% et 55%. Seuls les écarts en X sont supérieurs à 5,00 mm. Ce sont donc les mesures selon l'axe X qui induisent au final les plus grandes valeurs d'écart. L'écart maximum en X atteint plus de 7 mm et engendre un écart global de 8,48 mm. En analysant les mesures en annexe 6, nous remarquons que les positions n°42 à 45 et voisines délimitent une zone de grands écarts (au moins 4 mm).

**Tableau IX : Synthèse de l'étalonnage du réseau de 294 points**

Ecart des valeurs mesurées par le système Fastrak par rapport aux valeurs de référence				
nb=294 points mesurés	Ecart en X	Ecart en Y	Ecart en Z	Ecart global
Moyenne (mm)	-1,50	-0,58	1,15	3,05
Médiane (mm)	-2,30	-0,62	0,92	3,09
Ecart-type (mm)	2,36	0,68	0,96	1,25
Maximum (mm)	7,24	1,43	4,99	8,48
Minimum (mm)	-4,55	-2,64	-0,34	0,38
<b>Nombre d'écarts tel que <math> Ecart  &lt; 1</math> mm</b>	<b>47</b>	<b>211</b>	<b>163</b>	<b>11</b>
<b>Nombre d'écarts tel que <math>1 \text{ mm} \leq  Ecart  &lt; 2</math> mm</b>	<b>56</b>	<b>81</b>	<b>87</b>	<b>45</b>
<b>Nombre d'écarts tel que <math> Ecart  \geq 2</math> mm</b>	<b>191</b>	<b>2</b>	<b>44</b>	<b>238</b>
<i>Nombre d'écarts tel que <math> Ecart  &gt; 5</math> mm</i>	7	0	0	17
Nombre d'écarts positifs	<b>65</b>	<b>52</b>	<b>279</b>	<b>s.o.</b>
Nombre d'écarts négatifs	<b>229</b>	<b>242</b>	<b>15</b>	<b>s.o.</b>



**Figure 71 : Vue XY des valeurs mesurées**

La figure 71 illustre l'ensemble des points mesurés vus de dessus. L'échelle ne permet pas d'avoir une vue précise des écarts, ces derniers étant relativement faibles. Cependant, on peut constater nettement que plus les mesures s'éloignent du centre de l'échiquier, plus les mesures s'écartent des positions de référence. Ce constat est logique car l'exactitude et la résolution du système Fastrak diminuent avec l'éloignement au centre électromagnétique.

#### 2.4.2.6. Perspectives d'application pour l'étude PERTIA

Dans le cadre de notre étude PERTIA, un stylet traqueur doit permettre de désigner sur une sphère de 100 mm de rayon l'origine de la source son 3D perçue (voir figure 72). Quel serait l'impact d'une erreur majorée sur les coordonnées ? Pour déterminer l'angle d'erreur  $\theta$  correspondant (voir figure 73), nous utilisons la formule (21) issue du produit scalaire.



Figure 72 : Application du traqueur pour l'étude PERTIA, méthode GELP

$$\theta = \text{Arccos} \left( \frac{\overrightarrow{OR} \cdot \overrightarrow{OF}}{\|\overrightarrow{OR}\| \|\overrightarrow{OF}\|} \right) \quad (21)$$

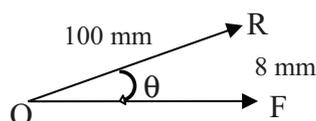


Figure 73 : Angle d'erreur entre la position de référence (R) et la position délivrée par le système Fastrak (F)

L'application numérique avec les valeurs des maximums constatés en X, Y et Z donne un angle d'erreur maximale de  $1,3^\circ$ . Ce résultat est de l'ordre des meilleures performances humaines obtenues en localisation. Les données directes du système Fastrak pourraient donc suffire pour cette application spécifique. Toutefois, l'étalonnage demeure indispensable pour s'assurer de la conformité du réseau de points et améliorer l'exactitude des résultats dans un environnement expérimental électromagnétique plus bruyant.

#### 2.4.2.7. Estimation des incertitudes

Le système d'étalonnage conçu permet d'estimer directement les deux grandeurs mesurées : la localisation et l'orientation du récepteur. La localisation et l'orientation exacte du traqueur peuvent être définies comme des mesurandes de notre processus de mesure : l'étalonnage.

---

Les unités de ces mesurandes sont le mètre pour la mesure de la position et le degré (angulaire) pour la mesure de l'orientation. A noter que si le mètre fait partie des sept unités de base du système international (SI), le degré est en dehors du SI mais son usage est accepté avec le SI [57]. Dans cette étude, nous exprimerons les résultats en millimètre et en degré (système décimal).

Le lecteur pourra se reporter à la norme XF appelée communément VIM [58] pour connaître la définition du vocabulaire métrologique employé.

Le guide qui est défini par la norme NF ENV 13005, appelée communément GUM [59] permet d'estimer l'incertitude de mesure. Cinq étapes importantes peuvent être distinguées :

- Identification et réduction des sources d'erreurs
- Détermination du modèle mathématique
- Estimation des incertitudes types
- Calcul de l'incertitude-type composée
- Expression de l'incertitude élargie

### ***Identification des sources d'erreurs***

Nous appliquons la méthode dite des « 5M » afin d'identifier les sources d'erreurs. Cette méthode établit les facteurs qui interviennent dans le processus de mesure et pour chacune des cinq catégories suivantes :

- moyens (performance des appareils de mesure),
- méthode (mode opératoire),
- milieu (environnement de la mesure),
- matière (mesurande),
- main d'œuvre (personnel réalisant la mesure).

Dans notre étude, les mesurandes peuvent être influencées par les facteurs suivants :

- Caractérisation du système d'étalonnage (référence)
- Installation des équipements
- Mise en œuvre du système d'étalonnage
- Performances du traqueur
- Configuration du traqueur
- Environnement

Les sources d'erreur et les grandeurs influentes liées à aux cinq catégories sont figurées dans un diagramme « 5M » du processus de mesure (figure 74). Pour certaines catégories comme le milieu ou la méthode, l'influence des sources d'erreurs sur les grandeurs est difficilement quantifiable dans les conditions nominales de la mesure. Au contraire, certaines grandeurs d'influence et caractéristiques peuvent être estimées isolément ou globalement comme la répétabilité, la caractérisation des points de référence.

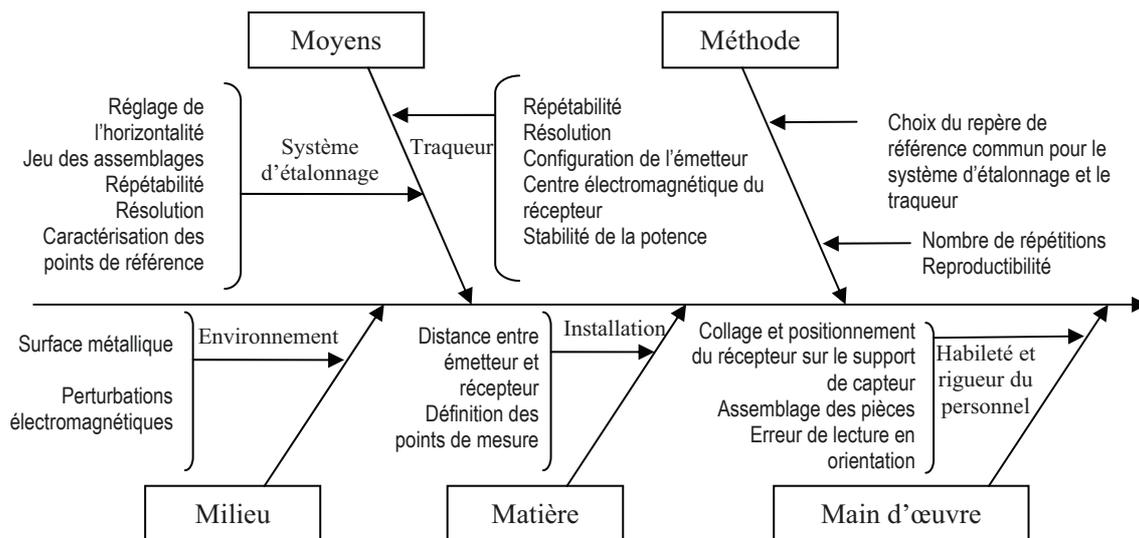


Figure 74 : Diagramme des sources et facteurs d'erreurs, type « 5M »

### Modèle mathématique

Puisque le mesurande est obtenue directement par comparaison avec la valeur de référence indiquée par le système d'étalonnage, il n'y pas de calcul et donc pas de modèle mathématique à attribuer. Par contre, concernant le traqueur Fastrak, les grandeurs fournies sont issues de calculs de propriété industrielle et non diffusés. Ces calculs reposent probablement sur des équations de Maxwell relatives aux champs électromagnétiques.

### Estimation des incertitudes-types

Dans ce paragraphe nous abordons les évaluations de « type A » et de « type B » pour les incertitudes.

#### Evaluation de « type A »

L'évaluation de « type A » est réalisée par l'analyse statistique de séries de mesures en présumant les  $n$  mesures  $m_k$  indépendantes. Si la distribution des mesures suit une loi normale, l'écart-type expérimental (22) est un bon estimateur de l'incertitude.

$$S_{\text{exp}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (m_k - \bar{m})^2} \quad (22)$$

L'incertitude-type associée a pour meilleur estimateur :  $S = \sqrt{\frac{1}{n}} S_{\text{exp}}$  (23)

Dans notre étude, la répétabilité des mesures est une évaluation de type A. Comme pour la caractérisation du système d'étalonnage, l'idéal au sens statistique aurait été de mesurer une cinquantaine de fois chacune des 294 localisations pour connaître l'incertitude spécifique à chaque localisation. Cette opération correspondrait à 14700 mesures et acquisitions manuelles, difficilement réalisable en l'état et dans un court laps de temps. Or les premières mesures de répétabilité sur deux positions distinctes montrent clairement que la dispersion des

mesures est réduite et peu sensible à la position mesurée au regard de nos faibles exigences d'exactitude (quelques dixièmes de millimètre). C'est pourquoi, l'erreur de répétabilité du système Fastrak est estimée en réalisant 12 mesures consécutives à la même position (n°24) et avec la pièce n°1, dans les mêmes conditions. Cette estimation correspond à 12 acquisitions successives des coordonnées en quelques minutes. L'écart-type est l'indicateur de dispersion à observer et ne dépasse pas 0,12 mm (voir Tableau X). La dispersion maximale (maximum-minimum) atteint 0,4 mm en X et approche 0,00 mm en Z.

**Tableau X : Estimation de l'erreur de répétabilité**

12 mesures répétées à la position n°24				
nb=12,	Valeurs (mm)	X	Y	Z
	Moyenne	-0,34	0,05	-0,40
	Ecart-type	0,12	0,08	0,00
	Maximum	-0,10	0,20	-0,40
	Minimum	-0,50	-0,10	-0,40

Il faut remarquer que pour Z les 12 mesures sont identiques au centième de millimètre. Pour observer des variations plus fines il faudrait modifier la résolution du traqueur. L'incertitude-type associée à la répétabilité, conformément à l'équation (23) vaut pour les trois coordonnées de localisation :  $u(X_{\text{rép.}})=0,03 \text{ mm}$   $u(Y_{\text{rép.}})=0,02 \text{ mm}$   $u(Z_{\text{rép.}})=0,00 \text{ mm}$

Cette incertitude-type de répétabilité caractérise en localisation le traqueur dans notre expérimentation.

La reproductibilité est un autre facteur à prendre en compte pour caractériser le traqueur avec le système d'étalonnage. L'erreur de reproductibilité est l'effet du repositionnement de la colonne support car c'est *a priori* un facteur majorant à cause du jeu naturel des pièces mécaniques. L'idéal serait de mesurer les erreurs de reproductibilité pour les 294 points.

A défaut, nous allons commencer par le même point de mesure (n°24) que précédemment. Nous évaluons l'erreur de reproductibilité en effectuant 13 mesures consécutives et en repositionnant à chaque fois le support de capteur à la même position (n°24). Les autres conditions de mesure demeurent identiques. L'écart-type est légèrement supérieur (+0,04 mm) à celui de l'erreur de répétabilité et reste inférieur à 0,18 mm (voir Tableau XI). La dispersion maximale ne dépasse pas 0,5 mm et est toujours la plus faible en Z (0,1 mm).

**Tableau XI : Estimation de l'erreur de reproductibilité**

13 mesures répétées avec remplacement du support de capteur à la position n°24				
nb=13,	Valeurs (mm)	X	Y	Z
	Moyenne	-0,34	0,39	-0,12
	Ecart-type	0,18	0,12	0,04
	Maximum	-0,10	0,50	-0,10
	Minimum	-0,60	0,10	-0,20

L'incertitude-type associée à la reproductibilité, conformément à l'équation (23) vaut pour les trois coordonnées de position :

$$u(X_{\text{repro.}})=0,05 \text{ mm} \quad u(Y_{\text{repro.}})=0,03 \text{ mm} \quad u(Z_{\text{repro.}})=0,01 \text{ mm}$$

Etant donné la dispersion élargie du système d'étalonnage ( $\pm 0,3$  mm), la part de l'erreur de reproductibilité du traqueur à la position n°24 n'est pas nettement identifiable.

D'autres mesures de reproductibilité ont été réalisées avec la plus grande colonne (pièce n°2) dans le but d'obtenir un jeu plus important. Pourtant même dans ce cas, les résultats des erreurs de répétabilité et de reproductibilité restent du même ordre de grandeur que précédemment au centième de millimètre près. Que ce soit pour l'erreur de répétabilité ou l'erreur de reproductibilité (*cf.* écart-type) du traqueur, celles-ci (à peine quelques dixièmes de millimètre selon les axes) sont relativement négligeables par rapport aux grands écarts observés (voir Tableau IX) dans nos conditions de mesure.

L'incertitude liée à la caractérisation du système d'étalonnage doit aussi être déterminée. A cette fin nous utiliserons les données de répétabilité réalisées par la société Felin SA (§2.4.1.4). Sur neuf mesures successives avec repositionnement du pointeur du bras de mesure, les écarts-types expérimentaux calculés sont :

$$S_{\text{expX}}=0,01 \text{ mm} \quad S_{\text{expY}} < 0,00 \text{ mm} \quad S_{\text{expZ}}=0,01 \text{ mm}$$

Pour  $S_{\text{expY}}$ , les 9 mesures sont identiques au micromètre près. L'incertitude-type associée à la répétabilité du système d'étalonnage, conformément à l'équation (23) ne dépasse pas  $4 \mu\text{m}$ . Par conséquent ces incertitudes-types :  $u(X_{\text{répSE}})$ ,  $u(Y_{\text{répSE}})$  et  $u(Z_{\text{répSE}})$  sont négligeables au regard de nos exigences au dixième de millimètre.

#### Evaluation de type B :

Pour l'évaluation de type B de l'incertitude type, les incertitudes sont estimées par un jugement fondé sur les données de l'appareil. Dans le manuel utilisateur [15] du traqueur Fastrak, les spécifications suivantes sont fournies :

- Exactitude de mesure statique : 0,08 cm RMS pour la position du récepteur en X, Y, ou Z et  $0,15^\circ$  RMS pour l'orientation du récepteur,
- Résolution (0,0005 cm/cm de distance), et  $0,025^\circ$  en orientation.

Le constructeur ne précise ni le nombre de mesures ni la loi de distribution ni les conditions expérimentales, comme notamment la distance qui est une grandeur influente.

Dans la littérature dédiée au système de localisation, la formule (24) pour l'exactitude s'apparente à une erreur type  $\Delta_{cE}$ .

$$RMS_{\text{Error}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N Error_i^2}{N}} \quad (24)$$

A défaut d'autre renseignement, nous supposons que cette indication correspond à une distribution normale de largeur  $2\Delta_c$ . Dans ce cas, l'incertitude-type associée est :

$$S_{\text{error}} = \frac{\Delta_{cE}}{\sqrt{3}} \quad (25)$$

Dans ce cas, l'incertitude-type liée aux données constructeur à une position P pour chaque coordonnées X, Y ou Z est  $u(P_c)=0,46$  mm. De même, l'incertitude-type liée aux données constructeur à une orientation O pour chaque coordonnées Az, El ou Rl est  $u(O_c)=0,14^\circ$ .

Pour la résolution, la distance entre le récepteur et l'émetteur varie entre 30 cm et 80 cm environ selon les points mesurés. Dans ce cas, l'erreur de résolution varie de 0,15 mm à 0,40 mm. En toute rigueur, il faudrait calculer l'erreur de résolution associée à chacune des 294 distances correspondant à chacune des positions du récepteur. Pour nos estimations, seule l'erreur maximale de résolution  $\Delta R_{cmax}$  va être prise en compte et nous supposons que cette indication correspond à une distribution rectangulaire de largeur  $2\Delta R_{cmax}$ . Dans ce cas, l'incertitude-type associée se calcule avec la même incertitude que précédemment (25). L'incertitude-type liée à la résolution du traqueur pour chaque coordonnées X, Y ou Z est  $u(RP_{cmax})=0,23$  mm. De même, pour l'orientation, l'incertitude-type liée à la résolution est  $u(RO_{cmax})=0,01^\circ$ .

### ***Incertitude composée***

Il faut combiner les évaluations de type A et de type B pour obtenir une meilleure évaluation de l'incertitude. Pour cela, nous réalisons un budget d'incertitudes. Il semble évident que certaines incertitudes-types sont redondantes ou peut-être corrélées comme l'erreur de répétabilité et l'erreur de reproductibilité du traqueur. Cependant, nous préférons majorer nos incertitudes. C'est pourquoi nous considérons les incertitudes-types comme indépendantes. Le calcul de l'incertitude composée correspond à l'équation (26) et les valeurs prises en compte sont présentées dans le tableau suivant (Tableau XII). Quelle que soit la position en X, Y ou Z l'incertitude composée vaut 0,61 mm. D'après le même tableau, les incertitudes liées à l'exactitude et à la résolution, fournies par le constructeur, contribuent complètement au bilan de l'incertitude composée.

$$u(X, Y, Z) = \sqrt{u(X, Y, Z_{rép.})^2 + u(X, Y, Z_{repro.})^2 + u(R_c)^2 + u(RP_{cmax})^2} \quad (26)$$

**Tableau XII : Budget des incertitudes-types**

Incertitude-type	Désignation	Evaluation de type	Prise en compte	Incetitude-type (mm)		
				en X	en Y	en Z
Répétabilité du traqueur	$u(X, Y, Z_{rép.})$	A	Oui	0,03	0,02	0,00
Reproductibilité du système d'étalonnage avec le traqueur	$u(X, Y, Z_{repro.})$	A	Oui	0,05	0,03	0,01
Exactitude du traqueur	$u(R_c)$	B	Oui	0,46	0,46	0,46
Résolution du traqueur	$u(RP_{cmax.})$	B	Oui	0,40	0,40	0,40
Caractérisation du système d'étalonnage	$u(X, Y, Z_{répSE.})$	B	Non	< 0,00	< 0,00	< 0,00
<i>Incetitude composée</i>	$u(X, Y, Z)$	A&B		<i>0,61</i>	<i>0,61</i>	<i>0,61</i>

### ***Calcul de l'incertitude élargie***

On obtient  $U(X, Y, Z)$  l'incertitude élargie en multipliant  $u(X, Y, Z)$  par un facteur d'élargissement  $k$ :  $U(X, Y, Z)=k.u(X, Y, Z)$ . L'incertitude élargie permet de définir un intervalle à l'intérieur duquel on puisse avoir une large fraction de la distribution des valeurs qui pourrait être raisonnablement attribuée au mesurande. Dans l'intervalle de confiance  $[P(X, Y, Z)-U(X, Y, Z), P(X, Y, Z)+U(X, Y, Z)]$  se trouve la valeur vraie du mesurande, en

---

choisissant le facteur d'élargissement  $k$  sur la base d'un niveau de confiance voulu. Le facteur d'élargissement  $k$  (coefficient de Student  $t(n;x\%)$ ) dépend du nombre de mesures  $n$  et de l'intervalle de confiance ( $x\%$ ) choisi. Comme les seules valeurs de  $n$  connues sont celles de nos données expérimentales, nous choisissons la plus petite valeur connue à savoir  $n=12$  (cf. Tableau X). L'incertitude élargie sur le mesurande se calcule avec la relation :

$$U(X,Y,Z) = t(n ;x\%) \times u(X,Y,Z)$$

Pour nos mesures et un intervalle de confiance de 95 % (généralement choisi), le coefficient d'élargissement (coefficient de Student) vaut  $t(12 ;95\%) = 2,18$ .

L'incertitude élargie sera :  $U(X,Y,Z) = 2,18 \times 0,61 = 1,34$  mm.

Au final pour un point  $pt(X,Y,Z)$  mesuré par le traqueur, les coordonnées en localisation délivrées sont :  $P(X,Y,Z) = (pt(X,Y,Z) \pm 1,34)$  mm.

Ceci n'est valable en toute rigueur que pour le point n°24 avec une distance de 80 cm entre le récepteur et émetteur. Le point  $pt(X,Y,Z)$  peut être entaché d'une erreur par contre l'encadrement des valeurs des coordonnées de la position n°24 est désormais connu ( $\pm 1,34$  mm).

Cette estimation peut être étendue à tout point dont la distance  $d$  est inférieure à 80 cm car la résolution proportionnelle à  $1/d^3$  (plus précisément c'est la tension dans les bobines du récepteur rattachée à la mesure de la position cf. [15]), intervient pour 50% dans le budget des incertitudes. Dans ce cas, cette approche de l'incertitude élargie est une majoration mais qui convient à notre problématique. En toute rigueur, il faut réaliser cette estimation pour chacun des 294 points et calculer les 294 incertitudes élargies correspondantes.

#### **2.4.2.8. Nécessité d'une correction des mesures**

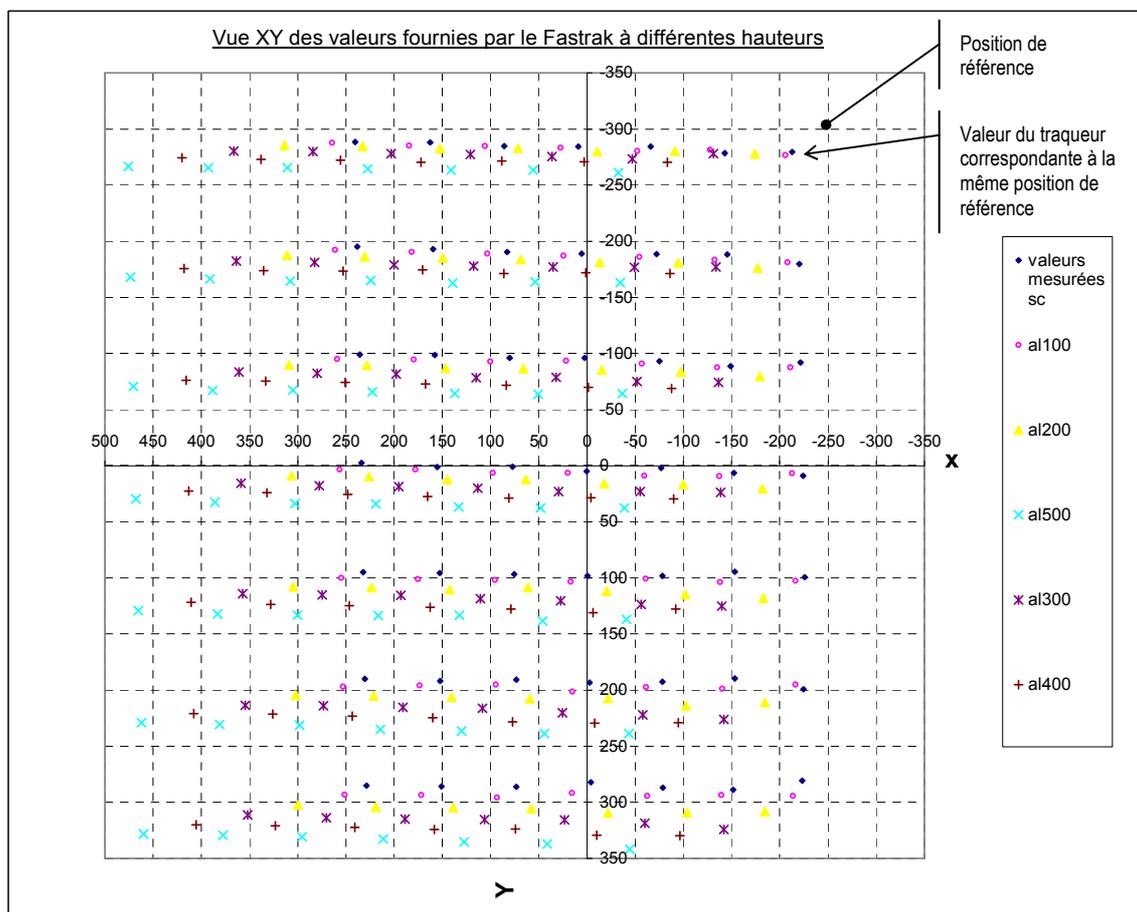
Dans le cadre de l'application spécifique à PERTIA (cf. 2.4.2.6), les résultats obtenus pourraient presque nous satisfaire ainsi car les erreurs restent relativement faibles : quelques degrés par rapport une dispersion attendue d'une dizaine de degré de la part du sujet.

Les conditions de mesures précédentes, sans être idéales sont toutefois optimales dans l'environnement de laboratoire. Les essais PERTIA mettant en œuvre le système Fastrak se déroulent dans une chambre réverbérante à structure métallique et avec plusieurs haut-parleurs de forte puissance sous tension dans un rayon de 3 m. Le rayonnement des électroaimants peut perturber la mesure. De plus la distance entre émetteur et récepteur sera plus importante (au moins 2 m) donc moins optimale vis-à-vis de la résolution du système Fastrak. Les erreurs de mesure seront certainement plus grandes et inacceptables. Afin d'évaluer ces erreurs, nous avons effectué des mesures dans les conditions réalistes décrites plus haut (voir Figure 76). Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tableau XIII). Des écarts importants de plus de 260 mm sont remarqués. La figure 75 montre clairement les écarts mesurés en vue de dessus. Des mesures de répétabilité sur trois positions différentes et

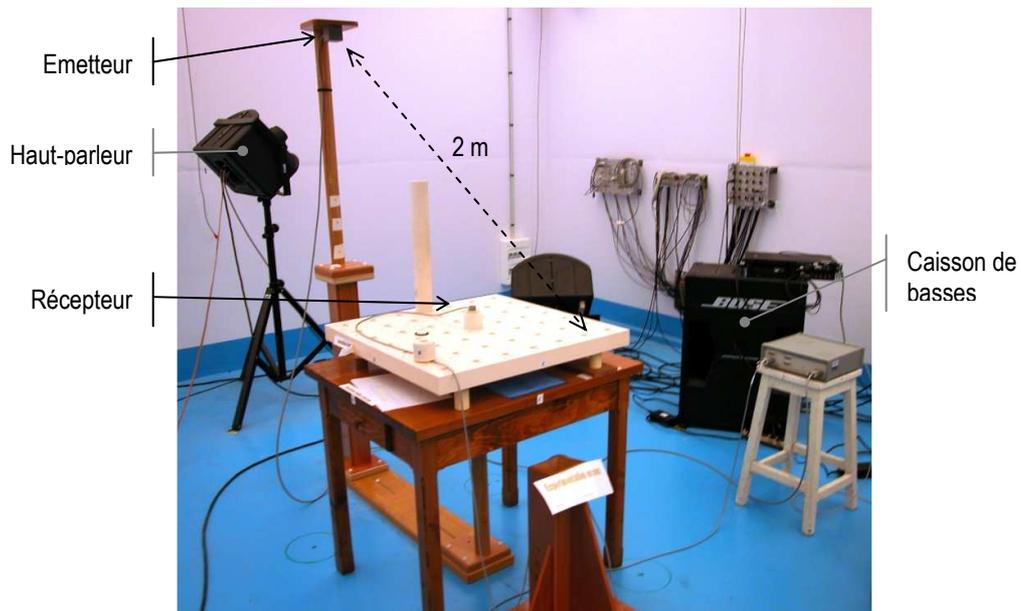
avec 10 répétitions confirment ce constat. Cela n'est plus acceptable et cela montre la nécessité de l'étalonnage. Une solution est donc d'apporter une correction à tous les points contenus dans le volume mesuré. L'étude et l'application de cette solution est l'objet du prochain chapitre.

**Tableau XIII : Synthèse de l'étalonnage du réseau de 294 points en chambre réverbérante**

Ecart des valeurs mesurées par le système Fastrak par rapport aux valeurs de référence			
nb=294 points mesurés, valeurs (mm)	Ecart en X	Ecart en Y	Ecart en Z
Moyenne	96,56	16,44	-5,54
Ecart-type	85,25	12,96	70,33
Maximum	267,30	42,25	134,74
Minimum	-71,54	-19,50	-164,59



**Figure 75 : Vue XY des valeurs mesurées par le traqueur aux positions de références en chambre réverbérante**



**Figure 76 : Evaluation d'une condition d'utilisation du traqueur pour l'étude PERTIA**

---

## 3. Choix d'une méthode de correction

L'étude bibliographique précédente précise plusieurs éléments à prendre en compte pour le choix d'une méthode de correction. A savoir :

- les techniques de correction globale d'erreur de position, telles que les polynômes d'ordre élevé ou la méthode multi-quadrique d'Hardy sont les plus adaptées à notre problématique et sont donc celles à appliquer en priorité,
- un re-échantillonnage des données acquises avant correction est à éviter,
- pour les applications en temps réel, toute correction éventuelle à apporter au traqueur opérationnel ne devra pas engendrer au final une latence totale du système de son 3D supérieure à 70 ms.

### 3.1. Sélection des méthodes de correction

Même si l'aspect temps réel n'est pas traité dans cette étude, il est clair que la méthode comportant le moins de calculs à effectuer serait la plus simple à mettre en œuvre et en théorie la plus rapide à l'exécution. Cependant, aujourd'hui la spécificité des microprocesseurs et de leurs algorithmes ne garantit pas en pratique que le temps d'exécution des calculs soit proportionnel au nombre de calculs et de leurs complexités. La correction comportant le moins de calculs n'engendrera pas forcément la latence la plus courte, sans toutefois excéder probablement 5 ms. L'implémentation des méthodes de correction en temps réel sur un équipement à multi-microprocesseurs comme le matériel Tucker Davis type RX6 fait l'objet d'une autre étude en soi.

#### 3.1.1. Méthode de correction à forme polynomiale

La première méthode sélectionnée est une correction basée sur une forme polynomiale de degré élevé. Les détails de cette méthode sont déjà décrits (voir page 58). Pour rappel, cette méthode supporte un réseau de points non uniforme et traite aussi bien les positions que les orientations. L'intérêt de cette méthode est de pouvoir estimer une position entre les points de référence et même en dehors du réseau de points. Cette méthode requiert le calcul des coefficients de la forme polynomiale à partir des points de référence et pour chaque coordonnée. Pour déterminer formellement les coefficients, il faut établir une matrice triangulaire. Cette opération est longue et coûteuse en calcul. Le fait d'avoir plus d'équations que d'inconnus offre une autre solution. La solution employée au sens des moindres carrés est de se ramener à un système de  $n$  équations à  $m$  inconnus avec ( $n > m$ ). Par conséquent, le nombre de points mesurés doit être très supérieur au nombre de coefficients à calculer.

#### 3.1.2. Méthode de correction basée sur une interpolation

La seconde méthode sélectionnée est à l'origine une méthode d'interpolation locale. L'intérêt d'une méthode d'interpolation est notamment de trouver une fonction décrivant une série de données discrètes. L'interpolation peut aussi être employée comme méthode de correction dans le cadre de notre étude. En effet, dans le cas d'un ensemble de points mesurés

comportant des écarts plus ou moins importants, l'interpolation réalisée sur ces points peut réduire considérablement ou non les plus grands écarts au détriment d'une augmentation des écarts les plus faibles. Cette méthode est donc très sensible à la répartition et au nombre de points mesurés. La méthode choisie est celle décrite par Kindratenko [50] (voir page 56). Cette méthode repose sur la décomposition de l'espace référencé en plusieurs sous cube tétraédrique et consiste à réaliser une interpolation locale des données à base de quaternions.

### 3.1.3. Méthode dite de « proximité »

La troisième méthode envisagée concerne un réseau de points uniforme où la valeur possible mesurée est limitée et forcée à ce réseau de point. C'est la méthode appelée « nearest » ou dite de « proximité » ou encore appelée « voisin le plus proche ». Chaque valeur mesurée prend la valeur du point référence le plus proche dans l'espace  $(X,Y,Z)$ . Cette méthode n'est pas robuste aux écarts supérieurs au demi-pas du réseau et est sensible à la résolution des mesures. La figure 77 illustre l'intérêt ou non d'utiliser cette méthode selon les positions mesurées. L'attribution de la valeur la plus proche peut être obtenue au moyen d'une triangulation de Delaunay et nécessite plusieurs calculs.

Dans certains cas particulier, une autre méthode d'attribution se réduit simplement à des opérations de comparaisons successives et un pointage dans une base de points. Cette méthode a l'avantage de ne pas calculer de correction et est par conséquent très rapide. Cette méthode est par contre limitée à des choix fermées de positions et n'est adaptée qu'aux petits écarts, en pratique inférieurs à un tiers du pas du réseau de référence. Par conséquent, son domaine applicatif est restreint et ne peut correspondre qu'à certaines expérimentations où la réponse en position est discontinue et à choix fermé.

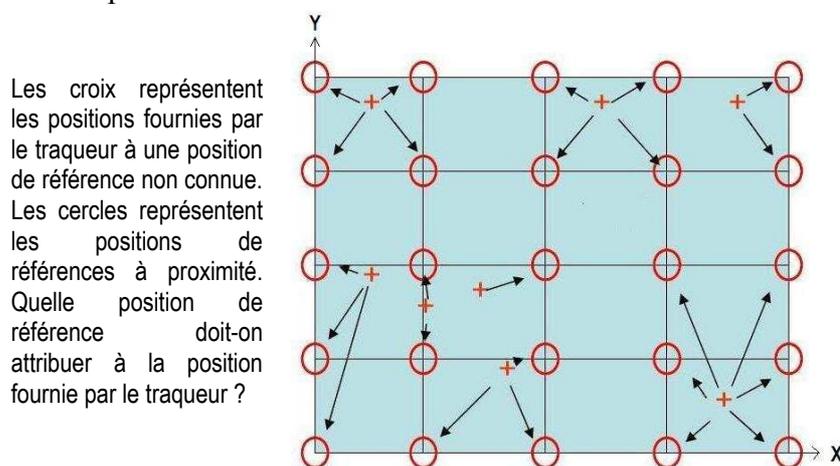


Figure 77 : Problématique de la méthode de « proximité » vue dans le plan XY d'un réseau de points

## 3.2. Moyens logiciels

Pour réaliser les méthodes précédentes, nous pouvons utiliser divers langages informatiques. La recherche bibliographique précédente a permis de trouver quelques programmes répondant à notre besoin. Cette découverte m'a évité la génération d'un code source important. Pour le programme principal concernant les corrections basées sur la forme polynomiale et l'interpolation, la plateforme d'origine supportant le programme est très spécifique et non à

---

notre disposition. Un important travail a donc été réalisé pour pouvoir adapter ce programme sur une plateforme plus répandue à base de PC Windows 32. Pour la méthode de « proximité », nous avons utilisée une des fonctions d'interpolations disponibles du langage de programmation Matlab. Pour tester ces différentes méthodes, un fichier de test a été établi et généré afin de mettre en exergue les avantages et les limites de chacune des méthodes. L'ensemble de ces travaux est détaillé dans les paragraphes suivants.

### 3.2.1. Logiciel de correction à base de forme polynomiale

Pour réaliser la méthode à base de forme polynomiale de degré élevé, nous avons utilisé en grande partie les codes sources du logiciel NCSA libTrCalibr ver. 2.00. Ce logiciel a été développé à l'origine par une équipe universitaire américaine [50] en langage C sur une plate forme Silicone Graphics I (SGI). Les codes sources sont fournis gratuitement et ont pu être récupérés via le site <http://www.ncsa.uiuc.edu/~kindr/emtc/libtrcalib.html> (2007). Ne disposant pas de plate-forme SGI, il a fallu adapter le programme pour le faire tourner sur une plate-forme PC Windows. La première approche a été d'opérer au travers du logiciel Matlab. Pour cela des protocoles « MEX » d'entrées sorties entre le langage C et le langage Matlab sont nécessaires. Ces protocoles étant très sensibles aux versions des langages employés, cette approche a été abandonnée du fait que nous ne disposons pas toujours des versions de licence compatible et en raison de l'aspect non pérenne de cette solution. Finalement, nous avons opté pour l'exportation du programme original en langage C++ version 7.0 de 2002 fourni par Visual studio.net sur une plateforme PC Win 32. Le principal travail a consisté :

- d'abord à s'approprier l'architecture complexe et étrangère du programme,
- puis à harmoniser les librairies et les fonctions.
- enfin à modifier le programme afin de pouvoir traiter un fichier entier de points à corriger et non plus seulement un unique point,
- à formater les données d'entrées pour qu'ils soient compatibles au logiciel.

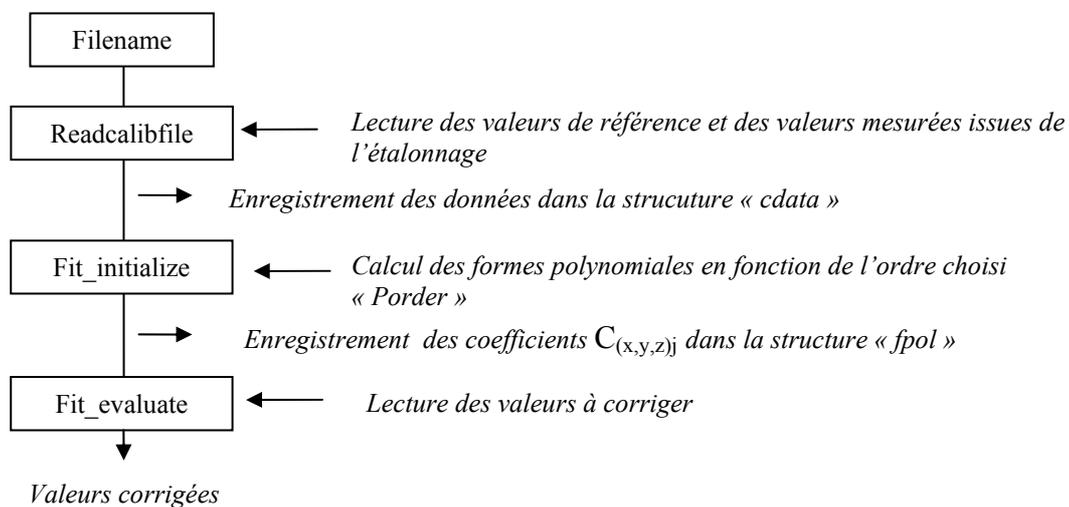
En effet, le programme d'origine ne pouvait pas être exécuté en l'état en raison de nombreuses erreurs de compilation. Par exemple, la fonction « atoi » a été remplacé par « atoi\_ », de même pour la fonction « exit() » remplacée par « exit (0) ». La bibliothèque « stdlib.h » a du être ajoutée avant la fonction « main() ». A noter aussi la configuration particulière du menu explorateur de solutions du langage C++, pour le quel les fichiers « sources » et « headers » doivent déclarés en « .c » et en « .h ». Après de multiples modifications similaires, le projet a été constitué en mode C++ « managé » qui correspond au mode console. L'ensemble de ce travail de débogage a pu être réalisé grâce aux conseils des sites informatiques dédiés au débogage en C++. Deux sous-programmes « Visual error » et « Cave cube » du logiciel de correction n'ont pu être implémentés à cause de la bibliothèque « unistd.h » spécifique à la plate-forme Silicon Graphic. Ces sous-programmes de visualisation étant secondaires et non indispensables à notre étude, ils ont été exclus du programme principal.

Le programme **trCalibrTest\_polyfit** est exécuté en version console (sous DOS). Un tableau comportant les données de références (points exacts issus de la caractérisation) et les données

mesurées (issues de l'étalonnage) est lu. L'ordre de l'interpolation est saisi puis le calcul de l'interpolation est réalisé. Les coefficients de la forme polynomiale sont édités. Dans un second temps, les coordonnées d'un point mesuré, dont on veut connaître les valeurs corrigées, sont saisies. En retour, les coordonnées corrigées du point sont calculées. Le calcul s'effectue point par point pour les valeurs mesurées et pour les six paramètres (positions et angles). Le programme de base ne permet pas de traiter un tableau de valeurs mesurées. Une modification est au programme est nécessaire. La modification qui a été réalisée consiste :

- en une ouverture puis lecture d'un fichier de valeurs mesurées
- puis après le traitement par le logiciel des corrections, à l'écriture et la sauvegarde du fichier des valeurs corrigées.

Les compléments ajoutés au programme principal sont consultables en annexe 7. Le logigramme (Figure 78) illustre les fonctions principales exécutées au cours du programme ainsi que les données d'entrées et de sorties.



**Figure 78 : Etapes du programme de correction « polyfit »**

La fonction principale (main) nommée **trcalibrTest\_polyfit.c** fait appel à « calibfile.h » et à « polyfit.h ». « polyfit.h » fait appel à « stat.h » qui inclut « stat.c ». Le nombre des coefficients  $C_{(x,y,z)j}$  est fonction de l'ordre choisi. Par exemple, 10 coefficients sont déterminés pour un ordre 2, et 56 pour l'ordre 5. La fonction **Projet polyfit\_val** reprend les fonctionnalités de **trcalibrTest\_polyfit.c** et intègre aussi la fonction **Projet interpol\_validation** qui permet d'ajouter des points supplémentaires validés afin d'améliorer l'interpolation. De plus, des statistiques sur chacun des six paramètres comme la moyenne et l'écart-type sont effectuées sur les valeurs mesurées et corrigées. Enfin, un tableau des données traitées est construit.

### 3.2.2. Logiciel à base d'interpolation locale

Pour réaliser la méthode de correction à base d'interpolation locale, nous avons utilisé en grande partie les codes sources du logiciel précédent NCSA libTrCalibr ver. 2.00. Les modifications et ajouts effectués sur le code source sont les mêmes que précédemment et communs. Le programme **Trcalibtest\_interpol** est exécuté en version console (sous DOS). Un tableau comportant les données de références (points exacts issus de la caractérisation) et

les données mesurées (issues de l'étalonnage) est lu. Après lecture du tableau, le type d'interpolation choisie est demandé. Le programme offre le choix de 3 types d'interpolation (linéaire, carré ou logarithmique) qui correspondent au poids attribué aux points (*cf.* équation 11). A partir de ces données, les tétraèdres sont formés, les vecteurs d'erreur et les quaternions sont calculés pour chaque point mesuré. Dans un second temps, les coordonnées d'un point non-mesuré, dont on veut connaître les valeurs interpolées, sont saisies. En retour, les coordonnées interpolées du point sont calculées. Le calcul s'effectue point par point pour les valeurs mesurées et pour les six paramètres (positions et angles). Le logigramme (figure 79) illustre l'essentiel des étapes réalisées au cours de l'exécution du programme. La fonction **itp\_statistics** calcule des statistiques comme la moyenne et l'écart-type des écarts pour chacune des coordonnées à partir des valeurs mesurées et interpolées.

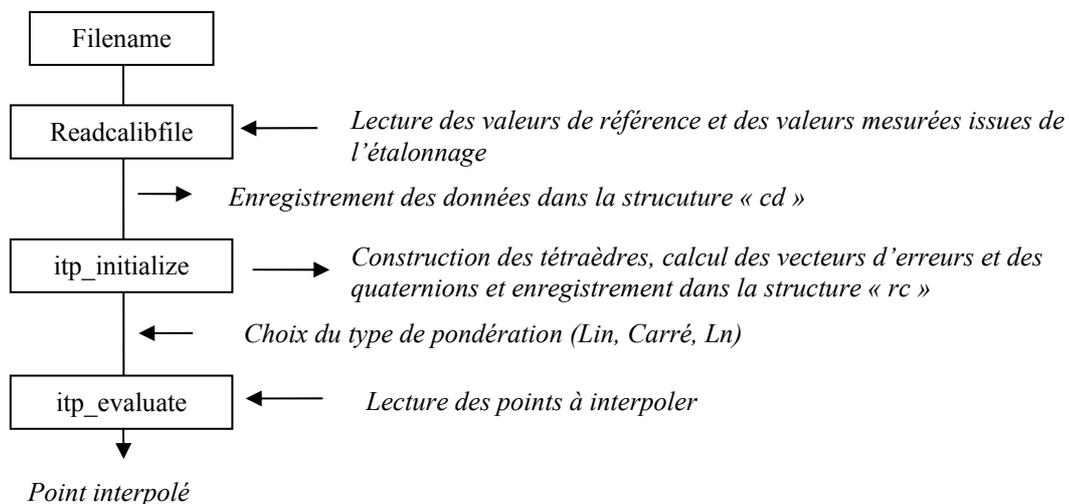


Figure 79 : Etapes du programme de correction « itp »

### 3.2.3. La fonction de « proximité »

Pour réaliser la fonction de proximité, nous utilisons le logiciel Matlab en version 7.5.0 R2007b. La fonction Matlab « interp3 » effectue une interpolation avec différentes méthodes dont la méthode « nearest » correspondant à la méthode de proximité. Nous détournons la fonctionnalité première de cette méthode d'interpolation pour l'utiliser comme une méthode de correction. La fonction Matlab d'origine employée est la suivante :

$VI = \text{interp3}(X, Y, Z, V, XI, YI, ZI, \text{method})$

Cette fonction détermine la valeur VI aux points de coordonnées XI, YI et ZI en interpolant la valeur V correspondant aux points X, Y, and Z.

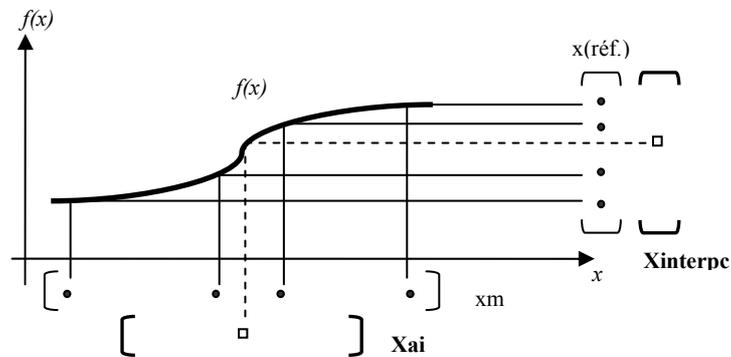
Pour notre application, nous utilisons cette fonction mais avec une logique inverse. Prenons l'exemple de la coordonnée X. La fonction appliquée est la suivante :

$X_{\text{interpc}}(i) = \text{interp3}(x_m, y_m, z_m, x, X_{ai}(i), Y_{ai}(i), Z_{ai}(i), \text{methode}\{\text{choixm}\})$  où

- $X_{\text{interpc}}$  correspond à la valeur interpolée à déterminer sur l'axe X selon la méthode « nearest »,
- $(x_m ; y_m ; z_m)$  correspondent aux coordonnées du point mesuré lors de l'étalonnage et auquel on associe la valeur x (valeur de référence obtenue lors de la caractérisation). En d'autres termes,  $x = f(x_m, y_m, z_m)$ .

- $(X_{ai}; Y_{ai}; Z_{ai})$  correspondent au point à interpoler dont on veut connaître la valeur interpolée de référence.

En d'autres termes,  $X_{interpc}=f(X_{ai}, Y_{ai}, Z_{ai})$ . Nous traitons ainsi séparément chaque coordonnée. La méthode « nearest » employée est discontinue et attribue à toute valeur mesurée une valeur de référence la plus proche. La figure 80 illustre la fonction employée dans une seule dimension afin d'en simplifier la représentation tridimensionnelle.



**Figure 80 : Principe de la fonction « interp3d »**

Seules les coordonnées de positions  $(X, Y, Z)$  ont été traitées.

Toutefois, dans un cas particulier de réseau uniforme, on pourrait se contenter d'un algorithme beaucoup plus simple pour le traitement de la position. Ce traitement est basé sur les comparaisons des coordonnées selon chaque axe pour aboutir sur une détermination du point de référence le plus proche. Des contraintes fortes limitent cette méthode à de faibles écarts compatibles avec le pas du réseau et aussi avec la résolution du traqueur. Cette méthode attribue au final pour chaque valeur mesurée une valeur de référence. Les étapes envisagées pour le programme à réaliser sont les suivantes :

- lecture des valeurs de référence et des valeurs mesurées,
- détermination de l'axe pour lequel les écarts sont les plus faibles par comparaison des statistiques descriptives, en particulier la somme des écarts absolus,
- selon l'axe déterminé précédemment, sélectionner laquelle des deux coordonnées de référence est la plus proche de la coordonnée mesurée,
- allocation du point de référence identifié à la place point mesuré selon la coordonnée de référence déterminée précédemment.

Dans ce cas particulier, il n'y a pas d'interpolation ni de valeurs de correction. C'est un choix forcé de positions mesurées au travers d'un réseau de points de référence.

### 3.2.4. Fichier de test

Le premier objectif des fichiers de test est d'évaluer les limites et les contraintes des méthodes de corrections appliquées ainsi que la compatibilité pratique avec notre système d'étalonnage. Pour évaluer l'efficacité des différentes méthodes de correction, plusieurs fichiers de test à corriger ont été établis. Au final, un unique fichier de test regroupe et optimise l'ensemble des caractéristiques pertinentes des fichiers de tests. L'utilisation d'un seul fichier facilite aussi l'obtention et le traitement des résultats.

Ce fichier de test comporte au total 20 points à corriger. Ces points sont issus de points de mesure acquis dans différentes expérimentations ainsi que des points simulés présentant des distorsions homogènes. Ces 20 points sont répartis sur une étendue de +300 mm à -300 mm et sur trois hauteurs distinctes et faisant partie du réseau initial de 294 points (cf. § 2.4.1.4). Ces 20 points se décomposent en deux groupes de 10 points.

Le premier groupe de points correspond aux mesures réalisées dans des conditions optimales donc avec des écarts faibles ou similaires à ceux observés au § 2.4.2.4. L'intérêt de ces 10 points est de révéler ou non une divergence des résultats. En effet, à cause d'un nombre d'ordre trop grand choisi pour la correction polynomiale, on peut craindre d'obtenir une mesure corrigée plus fautive que la mesure mesurée initiale à cause des oscillations de l'algorithme.

Pour le second groupe on introduit volontairement dans le quadrant inférieur gauche du volume de test des erreurs (équivalente à une distorsion) sur l'axe X et pour trois hauteurs (100, 200, 300). Cette asymétrie principalement sur un seul axe a été constatée au cours des mesures en salle réverbérante. Ces distorsions ont pour valeurs +10 mm et +20 mm sur les 10 points et réparties de façon homogène selon l'axe X.

La figure 81 montre en vue de dessus l'ensemble des 294 points mesurés comportant les 20 points modifiés du fichier de test. Ce fichier de test nommé fvac20pt.txt est consultable en annexe 7. Le tableau suivant (Tableau XIV) présente la valeur des écarts observés.

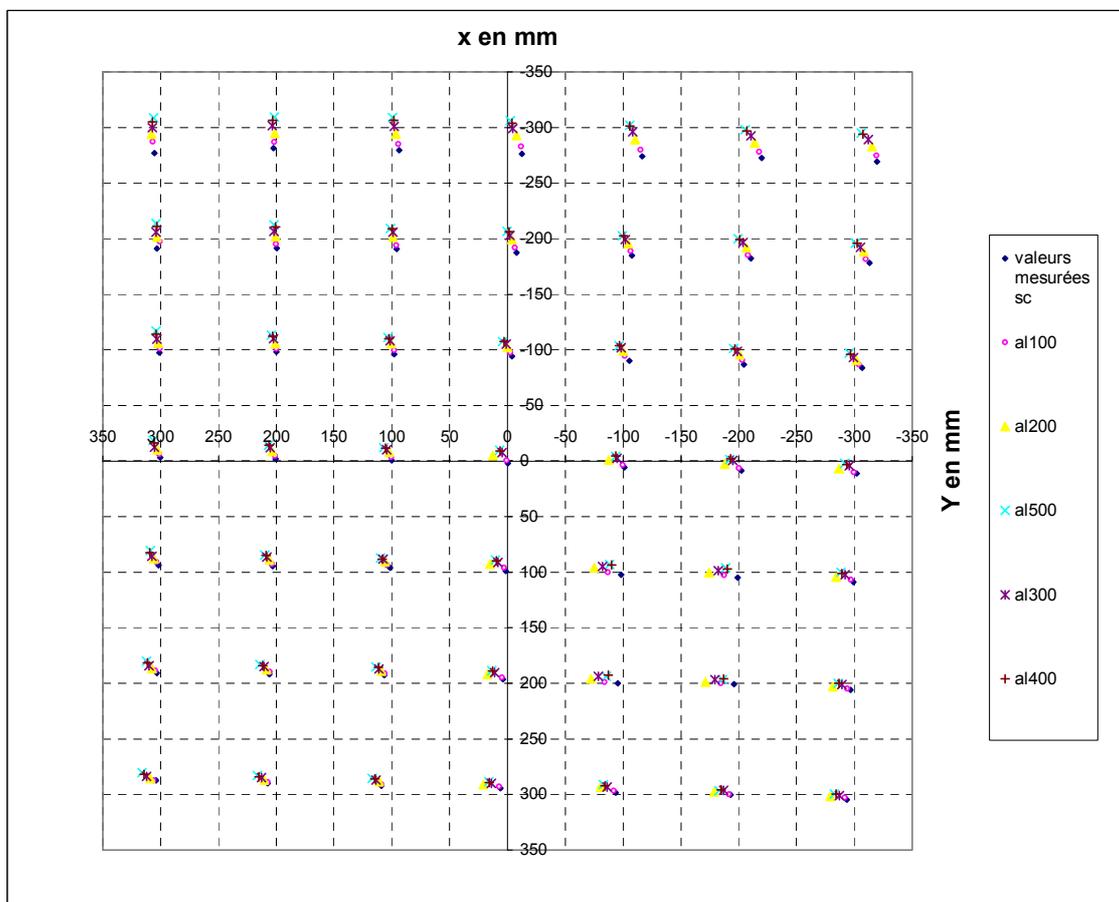


Figure 81 : Vue XY des valeurs mesurées et simulées à corriger

**Tableau XIV : Points de test**

Ecart valeurs de référence moins valeurs à corriger

	n°pos.	X	Y	Z	az	el	rl	
Valeurs de positions mesurées existantes présentant une forte déformation	1	<b>60</b>	-12,77	-2,58	-4,75	-0,7	-1,1	0,7
	2	<b>67</b>	-13,09	0,34	-3,20	-0,8	-1,1	1
	3	<b>108</b>	-11,95	-2,43	-3,27	-0,8	-0,7	0,9
	4	<b>109</b>	-25,67	-0,23	-4,60	-1,1	-1	0,5
	5	<b>110</b>	-28,69	1,17	-5,00	-1,4	-1	0,3
	6	<b>116</b>	-24,87	4,13	-3,25	-1,1	-1	0,5
	7	<b>122</b>	-12,55	5,15	-1,33	-1,1	-0,8	1
	8	<b>124</b>	-17,29	8,25	-1,81	-1,4	-1,2	0,2
	9	<b>158</b>	-17,69	1,25	-4,36	-1	-0,7	0,2
	10	<b>165</b>	-17,46	5,21	-3,60	-1	-0,7	0,2
Valeurs de positions mesurées existantes ne présentant pas de déformation	11	24	0,40	-2,10	-0,14	-0,2	-0,9	1,8
	12	40	-5,94	8,15	0,39	-0,8	-1,4	1,2
	13	73	-0,67	0,60	-0,58	-0,7	-0,8	1,4
	14	89	-5,50	10,54	0,55	-1,5	-1,5	1,1
	15	138	-8,07	12,35	0,28	-1,8	-1,2	0,8
	16	171	-4,69	7,21	-2,18	-0,7	-0,7	0,6
	17	187	-10,73	14,92	0,33	-1,5	-1,2	0,4
	18	220	-5,45	9,05	-2,70	-0,9	-0,6	0,2
	19	236	-11,58	15,58	-0,43	-1,5	-1	0,2
	20	<b>269</b>	-6,23	9,81	-3,20	-1,3	-0,5	0
			(mm)			(°)		

### 3.3. Résultats

Quelle que soit la méthode de correction appliquée, nous obtenons en sortie des algorithmes un fichier de points corrigés. La comparaison de ces points corrigés avec les points de mesure définit les écarts produits par la correction. De même, la comparaison de ces points corrigés avec les points de référence définit les erreurs résultantes de la correction. Ces écarts et erreurs permettent d'évaluer l'efficacité ou non de la méthode de correction appliquée. Cependant, en dehors de la simple comparaison point par point, quelle métrique faut-il mettre en œuvre pour choisir globalement la meilleure méthode ? Autrement dit, quels sont les critères ou les indicateurs à choisir ou à définir pour quantifier l'efficacité d'une méthode ?

#### 3.3.1. Indicateurs

Quel indicateur de corrélation entre 2 séries de mesures peut-on choisir ? Bryson [44] utilise la simple fonction de corrélation comme indicateur. Cependant le coefficient de corrélation ne permet pas de discerner ni un facteur multiplicatif ni une dérive constante (offset). Cet indicateur n'est pas adapté à notre étude en cas de translation éventuelle du repère de travail.

La méthode des moindres carrés semble la plus répandue pour fournir un indicateur de ressemblance qui est appelé le critère quadratique. Mais comment traiter les trois ou six paramètres (positions et angles) au sens des moindres carrés ? Les moindres carrés s'expriment par rapport à deux séries, donc les six paramètres de position seront traités indépendamment. Au final, nous obtiendrons six indicateurs et non pas un unique indicateur. De plus, le critère quadratique utilisé comme résultat final ne représente pas une valeur concrète de l'erreur immédiatement appréciable.

---

Dans notre cas particulier de comparaison du même nombre de points, la somme des écarts absolus observés est un indicateur possible mais dépend fortement du nombre de points et des conditions d'expérimentation. Par exemple, sur 20 points corrigés on constate au total 99 mm d'écarts absolus de positions sur l'ensemble des trois axes. Cet indicateur obtenu pour une méthode est directement comparable et appréciable par rapport aux résultats des autres méthodes. La moyenne des écarts absolus peut être un indicateur relatif pertinent dans le cas de notre étude.

A défaut de pouvoir sélectionner le meilleur indicateur *a priori*, nous utiliserons les deux indicateurs précédents (critère quadratique et somme des valeurs absolues).

### 3.3.2. Tests statistiques

L'objectif est de comparer plusieurs séries d'écarts issus de différentes méthodes de correction. Sous l'hypothèse que la variable étudiée (écart par rapport au point de référence) suit une distribution gaussienne, les tests statistiques que nous allons mettre en œuvre sont issus du test de base Anova. C'est pourquoi nous rappelons succinctement ici son principe. Le test Anova à un facteur (type de méthode de correction) et à variables dépendantes (valeurs de mesures communes) est basée sur l'analyse de la variance. L'intérêt du test Anova est de pouvoir comparer plusieurs moyennes par couple. Pour cela, 2 hypothèses sont émises :

- $H_0$  : Pas de différence entre les méthodes,
- $H_1$  : Il existe une différence.

D'une part on calcule le  $F_{\text{calculé}}$  à partir des variances de nos valeurs. D'autre part en utilisant la distribution de Fisher nous déterminons le  $F_{\text{théorique}}$  est déterminé à partir des degrés de liberté (ddl) de notre expérimentation. Enfin, on effectue une comparaison pour un seuil de risque choisi, habituellement 5% :

Si  $F_{\text{calculé}} < F_{\text{théorique}}$  au seuil choisi on accepte  $H_0$

Si  $F_{\text{calculé}} > F_{\text{théorique}}$  on rejette  $H_0$ .

Pour réaliser les premières analyses statistiques, nous avons utilisé le logiciel « Statview » V5.0 de 1998. Le lecteur pourra consulter un exemple de traitement statistique sur la base des écarts mesurés dans l'annexe 9.

Cependant, dans notre cas, nous souhaitons traiter nos différentes variables (écart par rapport au point de référence) ensemble et non pris par couple. C'est pourquoi dans un premier temps, une analyse de variance multivariée (MANOVA) est préconisée.

Dans un second temps, des comparaisons multiples (test Post Hoc) permettront d'obtenir un classement des corrections selon chaque variable dépendante à l'aide du test HSD de Tukey. Pour réaliser ces analyses statistiques, nous avons utilisé le logiciel « R » V2.15.2 de 2012. Nous avons utilisé la représentation dite « boîte à moustaches » de Tukey (*cf.* Figure 82) ainsi que la matrice de significativité (voir figure 83).

Afin de réduire le biais éventuels des écarts négatifs pour le traitement statistique, nous traitons les valeurs absolues des écarts mesurés.

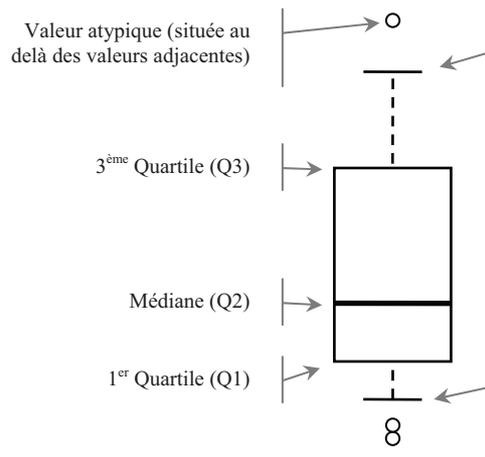
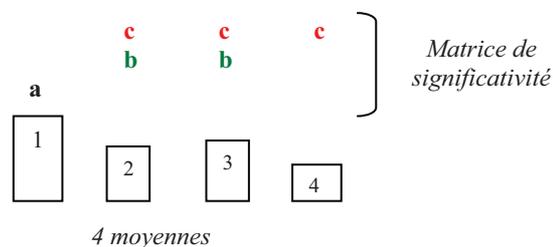


Figure 82 : Boîte à moustaches de Tukey



Lecture de la matrice de significativité (a,b,c) :  
 Pour les moyennes dont les lettres sont communes, leurs différences ne sont pas significatives.  
 Par exemple, la moyenne 1 est significativement différente des moyennes 2, 3 et 4. Les moyennes 2 et 3 ne sont pas différentes. La moyenne 4 est différente des moyennes 1, 2 et 3.

Figure 83 : Lecture de la matrice de significativité

### 3.3.3. Comparaison des corrections

Nous avons appliqué trois méthodes de correction au fichier de test :

- la méthode appelée « polyfit » basée sur une forme polynomiale,
- la méthode appelée « interpolk » basée sur une interpolation,
- la méthode de « proximité » basée sur une triangulation de Delaunay.

Une synthèse et une comparaison sont effectuées en fin de paragraphe.

#### 3.3.3.1. Application de la correction basée sur une forme polynomiale

Dans le programme « trCalibrTest\_polyfit.exe » modifié, après avoir lu les coordonnées de référence et mesurées (fichier simume294.dat) et sélectionné l'ordre du polynôme, le programme calcule les coefficients. Ensuite, les valeurs à corriger sont lues (fichier fvac20ptsim4.txt) et en retour nous récupérons le fichier des valeurs corrigées. Nous faisons

cette opération pour chacun des ordres de 2 à 11. Au final, nous obtenons 11 fichiers distincts de résultats (rsim4kpfo2à11.txt). La figure 84 illustre ces étapes.

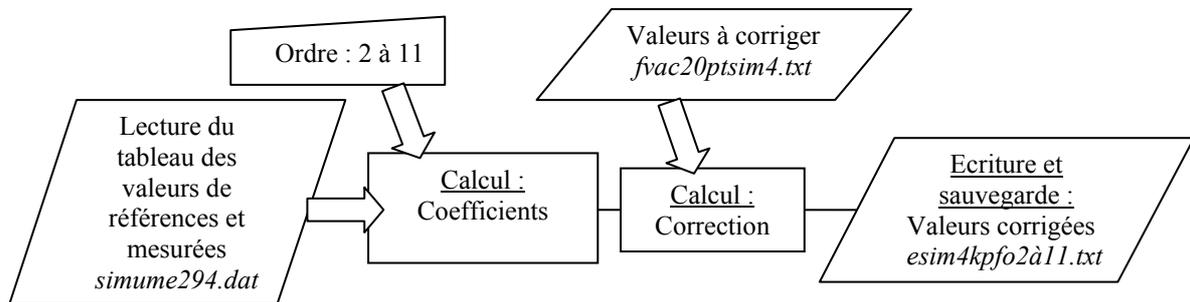


Figure 84 : Schéma de la réalisation de la correction polynomiale

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux (XV&XVI) et les données de bases sont rapportées en annexe 8. De façon globale, la correction apportée est bénéfique surtout pour Y et Z (cf. écart moyen). La correction réduit de près de 95% la somme des écarts absolus en positions et en orientation. De plus, la correction centralise la dispersion (moyenne nulle). La correction semble d'autant plus juste que les valeurs à corriger sont faiblement erronées. La meilleure correction globalement est celle obtenue à l'ordre 10 pour la position et celle obtenue à l'ordre 9 pour l'orientation (cf. Figure 85). Il est à noter qu'à partir de l'ordre 11, la correction diverge. Ceci est logique car le nombre de données devient insuffisant pour calculer les coefficients.

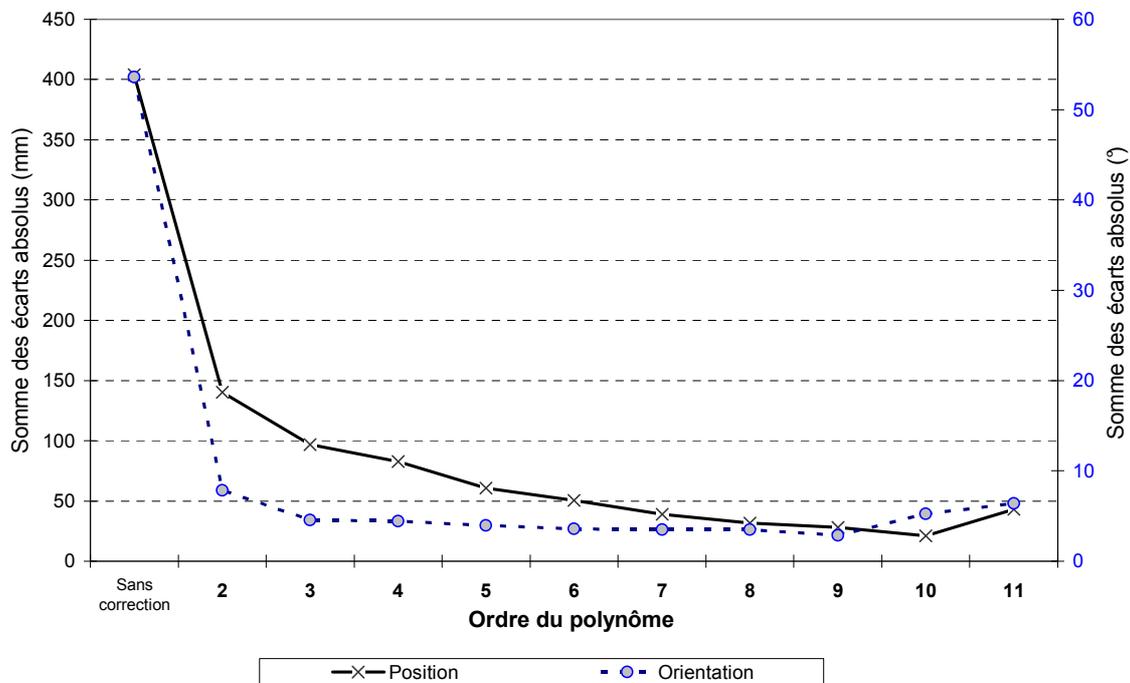


Figure 85 : Evolution des effets de la correction en fonction l'ordre polynomiale

**Tableau XV : Synthèse des corrections pour les ordres polynomiaux de 2 à 6**

Correction apportée par la forme polynomiale		Ordre 2						Ordre 3						Ordre 4						Ordre 5						Ordre 6					
		Différence valeurs de référence moins valeurs corrigées (effet de la correction)						Différence valeurs de référence moins valeurs corrigées (effet de la correction)						Différence valeurs de référence moins valeurs corrigées (effet de la correction)						Différence valeurs de référence moins valeurs corrigées (effet de la correction)						Différence valeurs de référence moins valeurs corrigées (effet de la correction)					
		ΔXe-c	ΔYe-c	ΔZe-c	ΔAze-c	ΔEle-c	ΔRle-c	ΔXe-c	ΔYe-c	ΔZe-c	ΔAze-c	ΔEle-c	ΔRle-c	ΔXe-c	ΔYe-c	ΔZe-c	ΔAze-c	ΔEle-c	ΔRle-c	ΔXe-c	ΔYe-c	ΔZe-c	ΔAze-c	ΔEle-c	ΔRle-c	ΔXe-c	ΔYe-c	ΔZe-c	ΔAze-c	ΔEle-c	ΔRle-c
Statistiques des valeurs relatives aux positions présentant des distorsions (1 à 10)	max	-6,3	0,4	0,9	0,1	0,2	0,2	-3,2	0,1	0,6	0,1	0,0	0,2	-2,1	0,4	1,1	0,1	0,1	0,2	-0,4	0,4	0,9	0,1	0,1	0,2	1,0	0,4	0,9	0,0	0,2	0,2
	min	-17,2	-1,9	-0,5	-0,4	-0,1	-0,1	-12,9	-1,0	-0,6	-0,1	-0,2	-0,1	-11,1	-0,7	0,0	-0,2	-0,1	-0,1	-7,7	-0,9	0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-5,5	-0,6	-0,2	-0,1	0,0	-0,1
	moyenne	-10,2	-1,0	0,3	-0,2	0,1	0,1	-7,0	-0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	-5,6	-0,2	0,5	0,0	0,0	0,0	-3,8	-0,3	0,5	0,0	0,0	0,1	-2,3	-0,3	0,4	0,0	0,0	0,0
	ecart moyen	3,9	0,6	0,3	0,1	0,1	0,1	3,4	0,3	0,3	0,0	0,0	0,1	2,8	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	2,1	0,3	0,2	0,0	0,0	0,1	1,5	0,3	0,2	0,0	0,0	0,1
	écart-type	4,5	0,8	0,4	0,1	0,1	0,1	4,0	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1	3,4	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1	2,5	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1	2,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1
	somme des écarts absolus	101,9	10,6	3,9	2,3	0,8	1,0	69,9	4,6	2,4	0,4	0,5	0,8	55,6	3,8	5,0	0,8	0,5	0,8	38,0	4,7	4,6	0,5	0,5	0,7	27,4	3,8	4,3	0,5	0,4	0,6
critère quadratique	1221	15	2	1	0	0	631	3	1	0	0	0	412	2	3	0	0	0	201	3	3	0	0	0	95	2	2	0	0	0	
Statistiques des valeurs relatives aux positions sans distorsions (11 à 20)	max	2,3	0,7	0,7	0,4	0,1	0,2	2,5	0,4	0,1	0,3	0,2	0,2	2,6	0,4	0,5	0,2	0,1	0,2	2,3	0,7	0,4	0,1	0,1	0,2	1,3	0,6	0,7	0,1	0,1	0,1
	min	-1,4	-1,7	-1,0	-0,4	-0,1	-0,2	-3,2	-0,7	-0,9	-0,2	-0,1	-0,2	-2,2	-0,9	-0,6	-0,2	-0,1	-0,2	-1,0	-0,5	-0,4	-0,1	-0,1	-0,2	-1,7	-0,5	-1,0	-0,2	-0,1	-0,2
	moyenne	0,7	-0,4	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,4	-0,3	-0,4	0,0	0,1	0,0	0,4	-0,1	-0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,3	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0
	ecart moyen	0,9	0,7	0,6	0,2	0,1	0,1	1,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	1,2	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,9	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,8	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1
	écart type	1,1	0,8	0,7	0,3	0,1	0,1	1,6	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	1,5	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	1,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	1,0	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1
	somme des écarts absolus	10,8	7,6	5,5	2,1	0,7	0,9	12,0	4,1	3,7	1,2	0,7	0,9	11,8	3,2	3,6	0,8	0,7	0,8	8,0	2,7	2,7	0,8	0,6	0,8	8,9	3,0	3,1	0,7	0,6	0,8
critère quadratique	17	8	4	1	0	0	25	2	2	0	0	0	21	1	2	0	0	0	12	1	1	0	0	0	10	1	2	0	0	0	
Statistiques des valeurs relatives aux 20 positions avec et sans distorsions (1 à 20)	max	2,3	0,7	0,9	0,4	0,2	0,2	2,5	0,4	0,6	0,3	0,2	0,2	2,6	0,4	1,1	0,2	0,1	0,2	2,3	0,7	0,9	0,1	0,1	0,2	1,3	0,6	0,9	0,1	0,2	0,2
	min	-17,2	-1,9	-1,0	-0,4	-0,1	-0,2	-12,9	-1,0	-0,9	-0,2	-0,2	-0,2	-11,1	-0,9	-0,6	-0,2	-0,1	-0,2	-7,7	-0,9	-0,4	-0,1	-0,1	-0,2	-5,5	-0,6	-1,0	-0,2	-0,1	-0,2
	moyenne	-4,7	-0,7	0,1	-0,1	0,0	0,0	-3,3	-0,4	-0,1	0,0	0,0	0,0	-2,6	-0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	-1,8	-0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	-1,3	-0,1	0,2	0,0	0,0	0,0
	ecart moyen	5,5	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1	3,7	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	3,0	0,3	0,4	0,1	0,1	0,1	2,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	1,5	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1
	écart type	6,5	0,8	0,6	0,2	0,1	0,1	4,8	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	4,0	0,4	0,5	0,1	0,1	0,1	2,8	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	1,9	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1
	somme des écarts absolus	112,8	18,2	9,4	4,4	1,5	1,9	81,9	8,7	6,1	1,6	1,3	1,7	67,4	7,0	8,6	1,5	1,2	1,7	45,9	7,4	7,3	1,3	1,1	1,6	36,3	6,8	7,4	1,2	1,0	1,3
critère quadratique	1238	23	6	1	0	0	656	5	3	0	0	0	434	3	5	0	0	0	213	4	4	0	0	0	105	3	4	0	0	0	
somme globale des écarts absolus		140		7,8			97			4,6			83			4,4			61			3,9			50			3,6			
		en mm		en degré			en mm			en degré			en mm			en degré			en mm			en degré			en mm			en degré			

**Tableau XVI : Synthèse des corrections pour les ordres polynomiaux de 7 à 11**

Correction apportée par la forme polynomiale		Ordre 7						Ordre 8						Ordre 9						Ordre 10						Ordre 11					
		Différence valeurs de référence moins valeurs corrigées (effet de la correction)						Différence valeurs de référence moins valeurs corrigées (effet de la correction)						Différence valeurs de référence moins valeurs corrigées (effet de la correction)						Différence valeurs de référence moins valeurs corrigées (effet de la correction)						Différence valeurs de référence moins valeurs corrigées (effet de la correction)					
		$\Delta X_{e-c}$	$\Delta Y_{e-c}$	$\Delta Z_{e-c}$	$\Delta A_{ze-c}$	$\Delta E_{le-c}$	$\Delta R_{le-c}$	$\Delta X_{e-c}$	$\Delta Y_{e-c}$	$\Delta Z_{e-c}$	$\Delta A_{ze-c}$	$\Delta E_{le-c}$	$\Delta R_{le-c}$	$\Delta X_{e-c}$	$\Delta Y_{e-c}$	$\Delta Z_{e-c}$	$\Delta A_{ze-c}$	$\Delta E_{le-c}$	$\Delta R_{le-c}$	$\Delta X_{e-c}$	$\Delta Y_{e-c}$	$\Delta Z_{e-c}$	$\Delta A_{ze-c}$	$\Delta E_{le-c}$	$\Delta R_{le-c}$	$\Delta X_{e-c}$	$\Delta Y_{e-c}$	$\Delta Z_{e-c}$	$\Delta A_{ze-c}$	$\Delta E_{le-c}$	$\Delta R_{le-c}$
Statistiques des valeurs relatives aux positions présentant des distorsions (1 à 10)	max	0,6	0,4	0,7	0,1	0,1	0,2	0,7	0,6	0,6	0,1	0,1	0,1	0,8	0,2	0,7	0,1	0,1	0,1	1,0	0,4	0,6	0,2	0,1	0,1	2,5	1,2	0,9	0,6	0,2	0,1
	min	-5,4	-0,6	0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-5,2	-0,9	0,1	-0,1	0,0	-0,1	-3,3	-0,4	0,3	-0,1	-0,1	-0,1	-0,9	-0,4	0,3	-0,2	-0,1	0,0	-2,9	-1,3	0,0	-0,3	-0,2	0,0
	moyenne	-1,9	-0,2	0,4	0,0	0,0	0,0	-1,4	-0,2	0,4	0,0	0,0	0,0	-1,0	-0,1	0,4	0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,1	0,4	0,0	0,0	0,0	-0,5	0,0	0,5	0,1	0,0	0,0
	écart moyen	1,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	1,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,9	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	1,1	0,5	0,2	0,2	0,1	0,0
	écart-type	1,8	0,3	0,2	0,0	0,1	0,1	1,6	0,4	0,1	0,0	0,1	0,1	1,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5	0,3	0,1	0,1	0,1	0,0	1,6	0,7	0,3	0,3	0,1	0,0
	somme des écarts absolus	20,3	2,9	4,1	0,4	0,5	0,6	16,2	3,3	4,0	0,5	0,4	0,6	12,3	2,1	4,3	0,6	0,4	0,4	5,4	2,3	4,1	1,1	0,5	0,3	12,7	5,4	4,7	2,1	0,8	0,5
critère quadratique	64	1	2	0	0	0	43	2	2	0	0	0	22	1	2	0	0	0	4	1	2	0	0	0	25	5	3	1	0	0	
Statistiques des valeurs relatives aux positions sans distorsions (11 à 20)	max	0,7	0,6	0,5	0,1	0,1	0,1	0,7	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	1,7	0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	2,6	0,3	0,2	0,3	0,3	0,1	2,7	1,8	0,3	0,3	0,1	0,1
	min	-1,7	-0,6	-0,2	-0,2	-0,1	-0,2	-1,6	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	-1,1	-0,3	-0,3	-0,2	0,0	-0,1	-0,5	-1,5	-0,2	-0,8	0,0	-0,2	-2,0	-1,2	-0,6	-0,2	-0,2	-0,3
	moyenne	-0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	-0,2	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,2	0,3	-0,1	0,1	0,0	0,0
	écart moyen	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,7	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,6	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	1,2	0,7	0,2	0,1	0,1	0,1
	écart type	0,7	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1	0,7	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,9	0,2	0,2	0,1	0,0	0,1	0,9	0,5	0,1	0,3	0,1	0,1	1,5	0,9	0,2	0,2	0,1	0,1
	somme des écarts absolus	6,5	3,3	2,1	0,7	0,7	0,6	4,3	2,2	1,7	0,9	0,5	0,6	6,7	1,3	1,4	0,7	0,4	0,5	5,5	2,9	0,9	2,3	0,5	0,6	11,8	6,9	1,6	1,4	0,9	0,7
critère quadratique	7	1	1	0	0	0	4	1	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	8	3	0	1	0	0	22	8	0	0	0	0	
Statistiques des valeurs relatives aux 20 positions avec et sans distorsions (1 à 20)	max	0,7	0,6	0,7	0,1	0,1	0,2	0,7	0,6	0,6	0,1	0,1	0,1	1,7	0,2	0,7	0,1	0,1	0,1	2,6	0,4	0,6	0,3	0,3	0,1	2,7	1,8	0,9	0,6	0,2	0,1
	min	-5,4	-0,6	-0,2	-0,2	-0,1	-0,2	-5,2	-0,9	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	-3,3	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	-0,9	-1,5	-0,2	-0,8	-0,1	-0,2	-2,9	-1,3	-0,6	-0,3	-0,2	-0,3
	moyenne	-1,2	-0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	-0,7	-0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	-0,4	-0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	-0,2	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0
	écart moyen	1,2	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	1,0	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,9	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,0	1,2	0,6	0,3	0,2	0,1	0,1
	écart type	1,5	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	1,4	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	1,2	0,2	0,3	0,1	0,0	0,0	0,8	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,1
	somme des écarts absolus	26,8	6,1	6,2	1,1	1,1	1,2	20,5	5,5	5,8	1,4	1,0	1,1	19,0	3,4	5,8	1,2	0,7	0,9	10,9	5,3	5,0	3,3	1,0	0,9	24,5	12,3	6,3	3,5	1,7	1,2
critère quadratique	70	2	3	0	0	0	47	2	2	0	0	0	29	1	2	0	0	0	12	3	2	1	0	0	46	13	3	1	0	0	
somme globale des écarts absolus		39		3,5		32		3,5		28		2,8		21		5,3		43		6,4											
		en mm		en degré		en mm		en degré		en mm		en degré		en mm		en degré		en mm		en degré											

### 3.3.3.2. Application de la correction basée sur l'interpolation

Dans le programme « interpolk.exe » modifié, après avoir lu les coordonnées de référence et mesurées (fichier *simume294.dat*) et sélectionné l'option d'interpolation, le programme calcule les quaternions, les vecteurs d'erreur et 278 sous cubes. Ensuite, les valeurs à corriger sont lues (fichier *fvac20ptsim4.txt*) et en retour nous récupérons le fichier des valeurs corrigées. Nous faisons cette opération pour chacune des options d'interpolation. Au final, nous obtenons trois fichiers distincts de résultats (*rinterpolk1à3.txt*). La figure 86 illustre ces étapes.

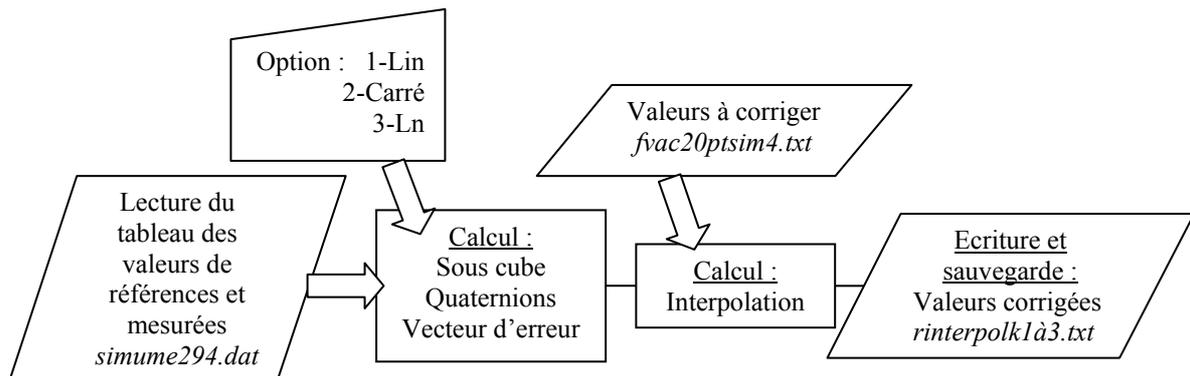


Figure 86 : Obtention des valeurs corrigées via « interpolk »

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant (Tableau XVII) et les données de bases sont rapportées en annexe 8. De façon globale, la correction apportée est bénéfique principalement pour Y et Z (*cf.* écart moyen) et semble similaire quelle que soit l'option choisie. La correction réduit de près de 70% la somme des écarts absolus en positions et de plus de 80% la somme des écarts absolus en orientation. La correction ne centralise pas la dispersion (moyenne non nulle). Il est à noter que pour un point, un angle n'a pu être calculé.

**Tableau XVII : Synthèse des corrections selon trois types d'interpolation**

Correction apportée par l'interpolation à base de quaternions		Différence valeurs de références moins valeurs mesurées (effet des erreurs et incertitudes de mesures)						Option 1 : Interpolation "Lin"						Option 2 : Interpolation "Carré"						Option 3 : Interpolation "Ln"									
		Différence valeurs de référence moins valeurs corrigées (effet de la correction)						Différence valeurs de référence moins valeurs corrigées (effet de la correction)						Différence valeurs de référence moins valeurs corrigées (effet de la correction)						Différence valeurs de référence moins valeurs corrigées (effet de la correction)									
		$\Delta X_{e-m}$	$\Delta Y_{e-m}$	$\Delta Z_{e-m}$	$\Delta A_{ze-m}$	$\Delta E_{le-m}$	$\Delta R_{le-m}$	$\Delta X_{e-c}$	$\Delta Y_{e-c}$	$\Delta Z_{e-c}$	$\Delta A_{ze-c}$	$\Delta E_{le-c}$	$\Delta R_{le-c}$	$\Delta X_{e-c}$	$\Delta Y_{e-c}$	$\Delta Z_{e-c}$	$\Delta A_{ze-c}$	$\Delta E_{le-c}$	$\Delta R_{le-c}$	$\Delta X_{e-c}$	$\Delta Y_{e-c}$	$\Delta Z_{e-c}$	$\Delta A_{ze-c}$	$\Delta E_{le-c}$	$\Delta R_{le-c}$	$\Delta X_{e-c}$	$\Delta Y_{e-c}$	$\Delta Z_{e-c}$	$\Delta A_{ze-c}$
Statistiques des valeurs relatives aux positions présentant des distorsions (1 à 10)	max	-12,0	8,2	-0,9	-0,7	-0,7	1,0	0,8	3,7	0,5	0,6	0,1	0,1	1,2	3,6	0,5	0,6	0,1	0,1	0,2	3,8	0,5	0,6	0,2	0,1				
	min	-28,6	-2,8	-4,6	-1,4	-1,2	0,2	-25,7	-4,2	-4,2	-0,7	-0,1	-0,9	-25,7	-4,3	-4,2	-0,7	-0,1	-0,9	-25,7	-4,2	-4,2	-0,7	-0,1	-0,9				
	moyenne	-18,2	1,9	-3,1	-1,0	-0,9	0,6	-6,1	-0,7	-0,8	0,0	0,0	-0,1	-6,0	-0,7	-0,8	0,0	0,0	-0,1	-6,1	-0,7	-0,8	0,0	0,0	-0,1				
	ecart moyen	<b>4,9</b>	<b>3,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>6,9</b>	<b>1,8</b>	<b>1,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>6,9</b>	<b>1,8</b>	<b>1,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>6,8</b>	<b>1,8</b>	<b>1,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,0</b>	<b>0,2</b>				
	écart-type	<b>6,1</b>	<b>3,6</b>	<b>1,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>8,7</b>	<b>2,4</b>	<b>1,6</b>	<b>0,3</b>	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>8,8</b>	<b>2,4</b>	<b>1,6</b>	<b>0,3</b>	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>8,7</b>	<b>2,5</b>	<b>1,5</b>	<b>0,3</b>	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>				
	critère quadratique	<b>182,3</b>	<b>30,4</b>	<b>31,1</b>	<b>10,4</b>	<b>9,3</b>	<b>5,5</b>	<b>62,9</b>	<b>17,2</b>	<b>11,1</b>	<b>1,7</b>	<b>0,5</b>	<b>1,4</b>	<b>63,4</b>	<b>17,3</b>	<b>11,2</b>	<b>1,8</b>	<b>0,5</b>	<b>1,4</b>	<b>62,0</b>	<b>17,1</b>	<b>11,0</b>	<b>1,7</b>	<b>0,4</b>	<b>1,3</b>				
Statistiques des valeurs relatives aux positions sans distorsions (11 à 20)	max	0,4	15,6	0,6	-0,2	-0,5	1,8	3,4	0,6	0,5	1,1	0,2	0,4	3,4	0,8	0,6	1,1	0,2	0,4	3,4	0,2	0,1	1,1	0,2	0,4				
	min	-11,6	-2,1	-3,2	-1,8	-1,5	0,0	-0,2	-8,0	-1,4	-0,4	-0,1	-0,4	-0,3	-7,9	-1,5	-0,4	-0,1	-0,4	0,0	-8,0	-1,3	-0,4	-0,1	-0,4				
	moyenne	-5,8	8,6	-0,8	-1,1	-1,0	0,8	1,2	-2,1	-0,4	0,2	0,0	0,0	1,1	-2,1	-0,5	0,2	0,0	0,0	1,2	-2,2	-0,5	0,2	0,0	0,0				
	ecart moyen	2,7	4,1	1,2	0,4	0,3	0,5	1,4	2,4	0,6	0,4	0,1	0,1	1,4	2,4	0,6	0,4	0,1	0,1	1,5	2,4	0,5	0,4	0,1	0,1				
	écart type	<b>3,8</b>	<b>5,7</b>	<b>1,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>	<b>0,6</b>	<b>1,6</b>	<b>2,9</b>	<b>0,6</b>	<b>0,5</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>1,6</b>	<b>2,9</b>	<b>0,7</b>	<b>0,5</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>1,6</b>	<b>2,9</b>	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>				
	critère quadratique	<b>471</b>	<b>1030</b>	<b>23</b>	<b>14</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>37</b>	<b>120</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>35</b>	<b>119</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>38</b>	<b>122</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>				
Statistiques des valeurs relatives aux 20 positions avec et sans distorsions (1 à 20)	max	0,4	15,6	0,6	-0,2	-0,5	1,8	3,4	3,7	0,5	1,1	0,2	0,4	3,4	3,6	0,6	1,1	0,2	0,4	3,4	3,8	0,5	1,1	0,2	0,4				
	min	-28,6	-2,8	-4,6	-1,8	-1,5	0,0	-25,7	-8,0	-4,2	-0,7	-0,1	-0,9	-25,7	-7,9	-4,2	-0,7	-0,1	-0,9	-25,7	-8,0	-4,2	-0,7	-0,1	-0,9				
	moyenne	-12,0	5,2	-1,9	-1,1	-1,0	0,7	-2,4	-1,4	-0,6	0,1	0,0	-0,1	-2,4	-1,4	-0,6	0,1	0,0	-0,1	-2,5	-1,4	-0,6	0,1	0,0	0,0				
	ecart moyen	6,2	4,9	1,6	0,3	0,2	0,4	4,9	2,2	0,9	0,3	0,1	0,2	5,0	2,1	0,9	0,3	0,1	0,2	4,9	2,2	0,8	0,3	0,1	0,2				
	écart type	8,0	5,8	1,8	0,4	0,3	0,5	7,1	2,7	1,2	0,4	0,1	0,3	7,1	2,7	1,2	0,4	0,1	0,3	7,1	2,7	1,1	0,4	0,1	0,3				
	critère quadratique	<b>2994</b>	<b>1567</b>	<b>98</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>14</b>	<b>1089</b>	<b>178</b>	<b>33</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1090</b>	<b>176</b>	<b>34</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1090</b>	<b>181</b>	<b>32</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>1</b>				
statistique globale	statistique globale des écarts absolus	404		54		132		9		133		9		130		8													
		en mm		en degré		en mm		en degré		en mm		en degré		en mm		en degré		en mm		en degré									

### 3.3.3.3. Application la correction de « proximité »

Plusieurs corrections ont été effectuées avec le programme *invinterp38.m* réalisé en langage Matlab. Les quatre types de méthodes à savoir *lin*, *cubic*, *spline*, *nearest* ont été testées. Seule les résultats de la méthode « nearest » sont présentés car ils sont les plus pertinents et différents des autres méthodes utilisées précédemment.

Dans le programme « *invinterp38.m* », après avoir lu les coordonnées de référence et mesurées (fichier *simume294.txt*) l'option « nearest » est sélectionnée. Ensuite, les valeurs à corriger sont lues (fichier *fvac20ptsim4.txt*) et en retour nous récupérons le fichier des valeurs corrigées. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau (XIX) et les données de bases sont rapportées en annexe 8. La correction apportée est quasiment totale, 99% de réduction des écarts absolus. Cependant, il faut rappeler que cette méthode ne peut être employée que pour une expérimentation à choix forcé concernant la position.

**Tableau XVIII : Synthèse des corrections par la méthode de « proximité »**

Correction apportée par la fonction interp3 de Matlab avec l'option nearest		Différence valeurs de références moins valeurs mesurées (effet des erreurs et incertitudes de mesures)			Méthode de "proximité" Différence valeurs de référence moins valeurs corrigées (effet de la correction)		
		$\Delta X_{e-m}$ (mm)	$\Delta Y_{e-m}$ (mm)	$\Delta Z_{e-m}$ (mm)	$\Delta X_{e-c}$ (mm)	$\Delta Y_{e-c}$ (mm)	$\Delta Z_{e-c}$ (mm)
Statistiques des valeurs relatives aux positions présentant des distorsions (1 à 10)	max	-12,0	8,2	-0,9	0,1	0,0	0,4
	min	-28,6	-2,8	-4,6	-0,2	-0,4	0,4
	moyenne	-18,2	1,9	-3,1	0,0	-0,1	0,4
	ecart moyen	4,9	3,0	1,0	0,1	0,1	0,0
	écart-type	6,1	3,6	1,2	0,1	0,1	0,0
	somme des écarts absolus	182,3	30,4	31,1	0,6	1,4	4,1
	critère quadratique (mm <sup>2</sup> )	3657	153	110	0	0	2
Statistiques des valeurs relatives aux positions sans distorsions (11 à 20)	max	0,4	15,6	0,6	0,0	0,0	0,0
	min	-11,6	-2,1	-3,2	0,0	0,0	0,0
	moyenne	-5,8	8,6	-0,8	0,0	0,0	0,0
	ecart moyen	2,7	4,1	1,2	0,0	0,0	0,0
	écart type	3,8	5,7	1,4	0,0	0,0	0,0
	somme des écarts absolus	59,3	90,3	10,8	0,0	0,0	0,0
	critère quadratique (mm <sup>2</sup> )	471	1030	23	0	0	0
Statistiques des valeurs relatives aux 20 positions avec et sans distorsions (1 à 20)	max	0,4	15,6	0,6	0,1	0,0	0,4
	min	-28,6	-2,8	-4,6	-0,2	-0,4	0,0
	moyenne	-12,0	5,2	-1,9	0,0	-0,1	0,2
	ecart moyen	6,2	4,9	1,6	0,0	0,1	0,2
	écart type	8,0	5,8	1,8	0,1	0,1	0,2
	somme des écarts absolus	241,5	120,8	41,9	0,6	1,4	4,1
	critère quadratique (mm <sup>2</sup> )	2994	1567	98	0	0	2
	Somme globale des écarts absolus	404			6		

### 3.3.4. Analyses statistiques de l'efficacité des corrections

L'analyse MANOVA est réalisée au moyen du test le Lambda de Wilks qui est une statistique utilisée par l'analyse factorielle discriminante dans le but de tester si plusieurs groupes d'observations multivariées ont des moyennes significativement différentes. En fait cette statistique joue, dans le domaine multivarié le même rôle que la statistique F de l'ANOVA univariée. Les variables dépendantes sont écarts absolus mesurés et la variable indépendante, est la correction effectuée. Un effet significatif de la correction est trouvé pour toutes les corrections :  $F(84, 1567.011)=16,8878$  ;  $p < 0.001$ . Mais à ce stade, le test ne permet pas de déterminer le classement des corrections.

Pour cela, nous pratiquons des tests *post-hoc* et en particulier le test HSD de Tukey. Les résultats de ces tests pour les six coordonnées sont représentés distinctement par six graphiques à boîte à « moustaches » de Tukey (Figure 87 à Figure 92).

Pour l'axe X (Figure 87), l'analyse statistique réalisée sur chaque série de 20 valeurs des écarts absolus, montre une significativité des différences observées pour toutes les corrections par rapport aux écarts à traiter (« aucune »). Les corrections polynomiales aux ordres de 8 à 10 (rpfO8 à rpfO10) et la correction « *mnearest* » sont différentes significativement de la correction à l'ordre 2 (rpfO2). Les autres corrections ne diffèrent pas significativement entre elles. On peut remarquer que la correction à l'ordre 2 ne présente pas de valeurs atypiques. Les corrections « rpfO10 » et « *mnearest* » obtiennent le meilleur classement.

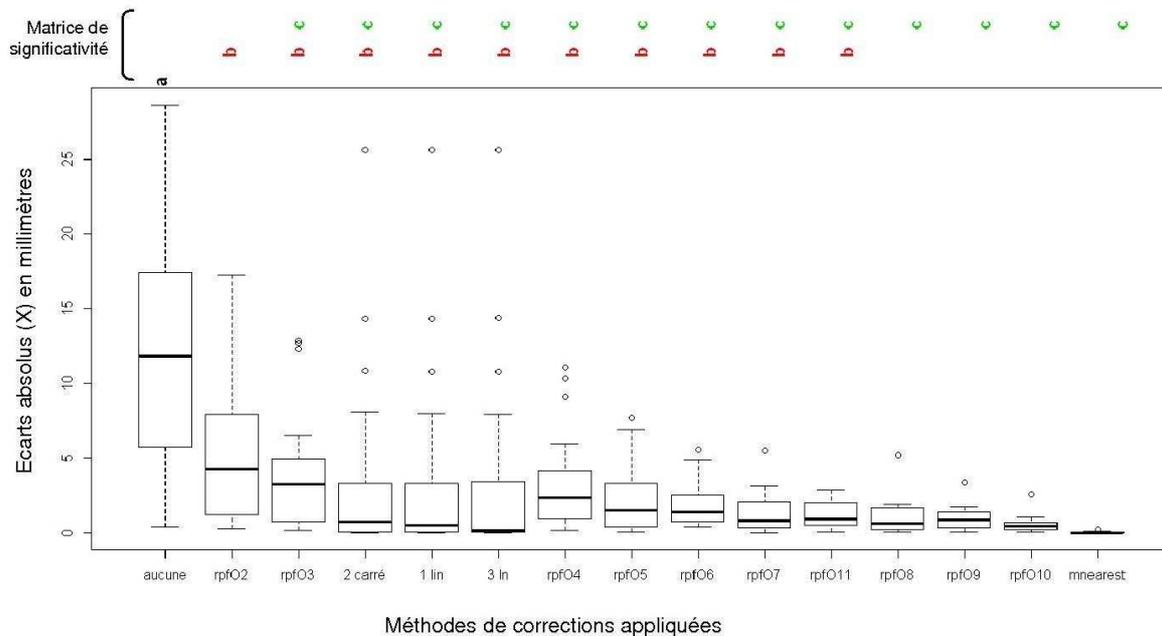
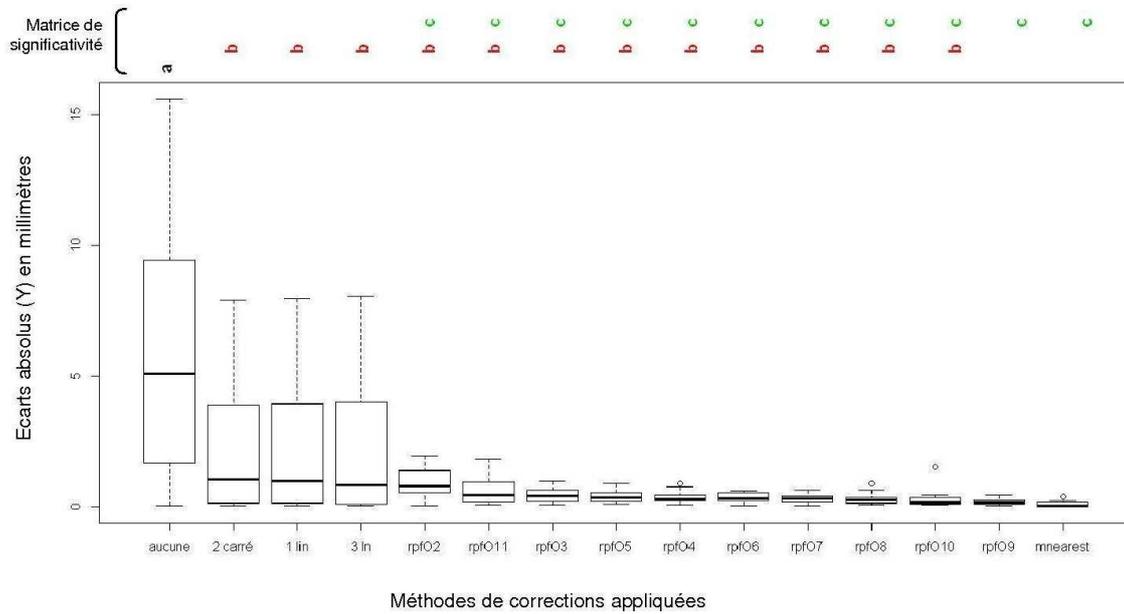


Figure 87 : Classement des corrections pour l'axe X

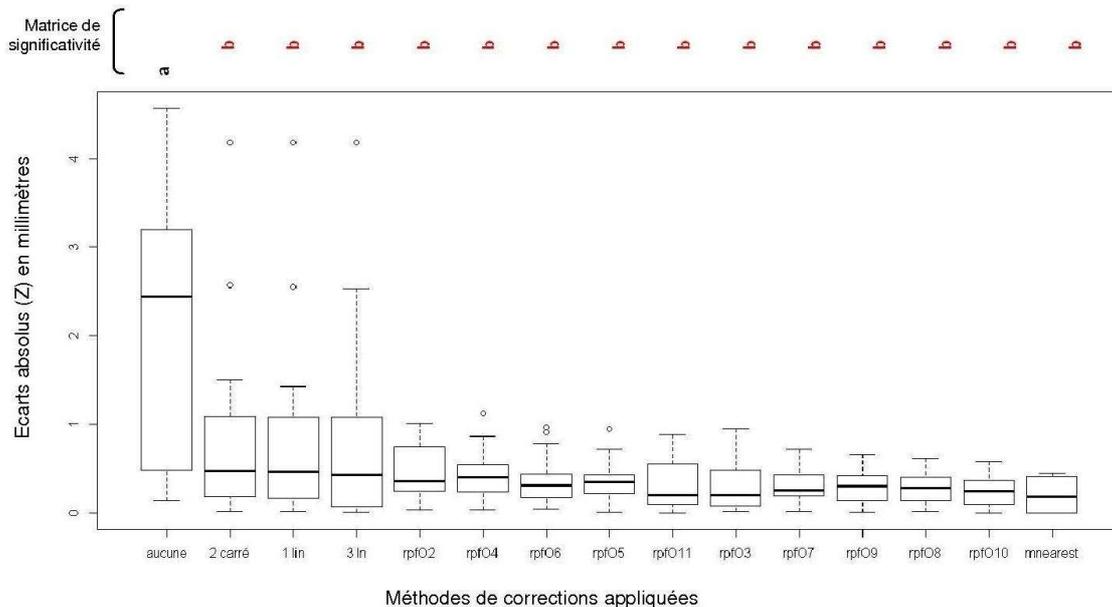
Pour l'axe Y (Figure 88), l'analyse statistique réalisée sur chaque série de 20 valeurs des écarts absolus, montre une significativité des différences observées pour toutes les corrections

par rapport aux écarts à corriger (« aucune »). Les corrections d'interpolation (2 carré, 1 lin, 3 ln) diffèrent significativement de la correction polynomiales à l'ordre 9 (rpfO9) et de la correction « mnearest ». Les autres corrections ne diffèrent pas significativement entre elles. A partir de la correction « rpfO2 », la réduction des écarts est remarquable. Les corrections « rpfO9 » et « mnearest » produisent le meilleur classement.



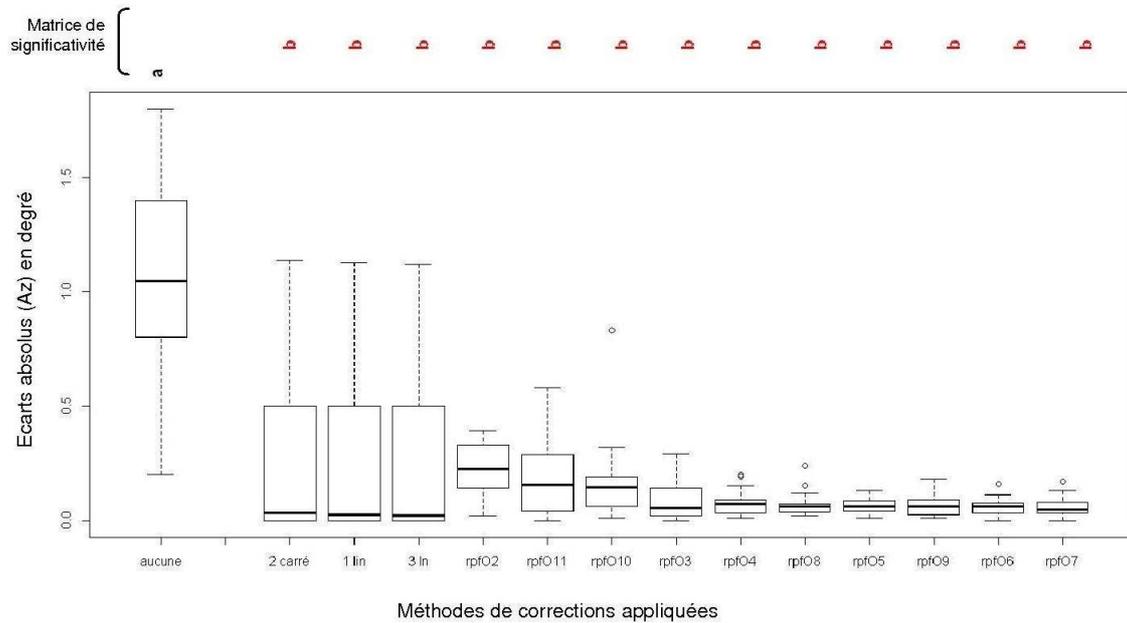
**Figure 88 : Classement des corrections pour l'axe Y**

Pour l'axe Z (Figure 89), l'analyse statistique réalisée sur chaque série de 20 valeurs des écarts absolus, montre une significativité des différences observées pour toutes les corrections par rapport aux écarts initiaux (« aucune »). Toutes les corrections ne diffèrent pas significativement entre elles. Les corrections « rpfO10 » et « mnearest » conduisent au meilleur classement.



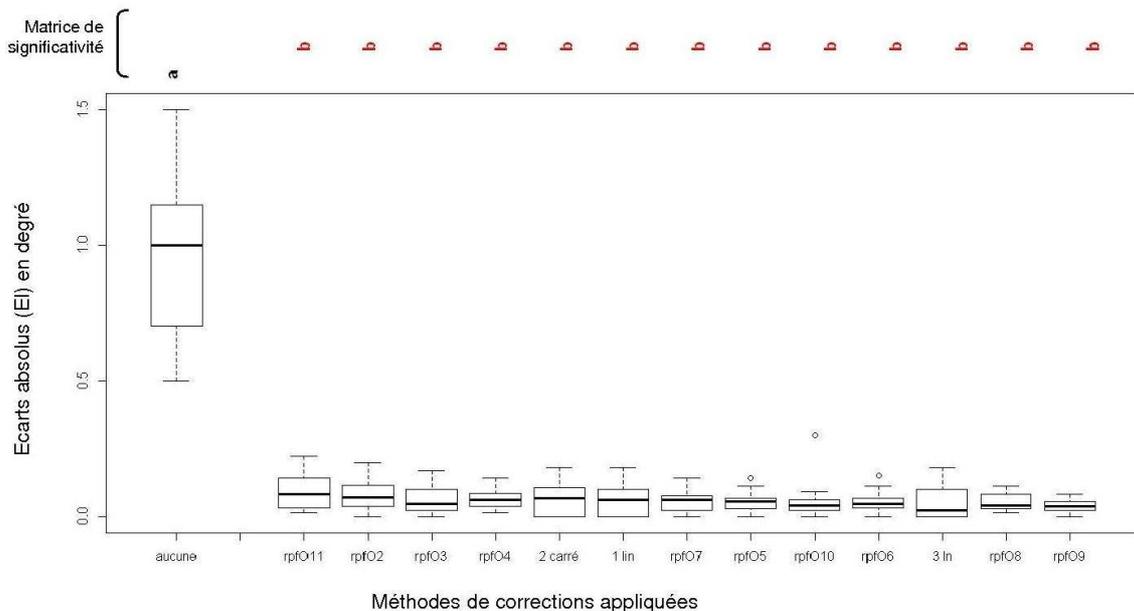
**Figure 89 : Classement des corrections pour l'axe Z**

Pour l'azimut (Figure 90), l'analyse statistique réalisée sur chaque série de 20 valeurs des écarts absolus, montre une significativité des différences observées pour toutes les corrections par rapport aux écarts initiaux (« aucune »). Toutes les corrections ne diffèrent pas significativement entre elles. La correction polynomiale rpfO7 fournit le meilleur classement.



**Figure 90 : Classement des corrections pour l'azimut**

Pour l'élévation (Figure 91), l'analyse statistique réalisée sur chaque série de 20 valeurs des écarts absolus, montre une significativité des différences observées pour toutes les corrections par rapport aux écarts originaux (« aucune »). Toutes les corrections ne diffèrent pas significativement entre elles. La correction polynomiale rpfO9 donne le meilleur classement.



**Figure 91 : Classement des corrections pour l'élévation**

Pour le roulis (Figure 92), l'analyse statistique réalisée sur chaque série de 20 valeurs des écarts absolus, montre une significativité des différences observées pour l'ensemble des corrections par rapport aux écarts à traiter (« aucune »). Toutes les corrections ne diffèrent pas significativement entre elles. La correction polynomiale rpf09 atteint le meilleur classement.

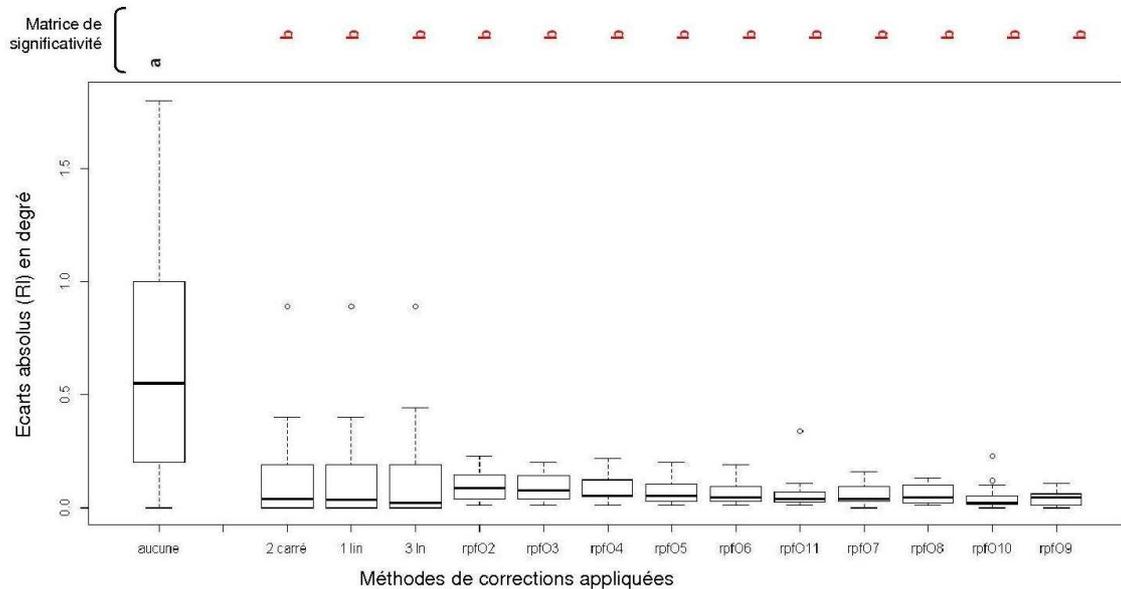


Figure 92 : Classement des corrections pour le roulis

### 3.3.5. Synthèse du classement des méthodes de correction

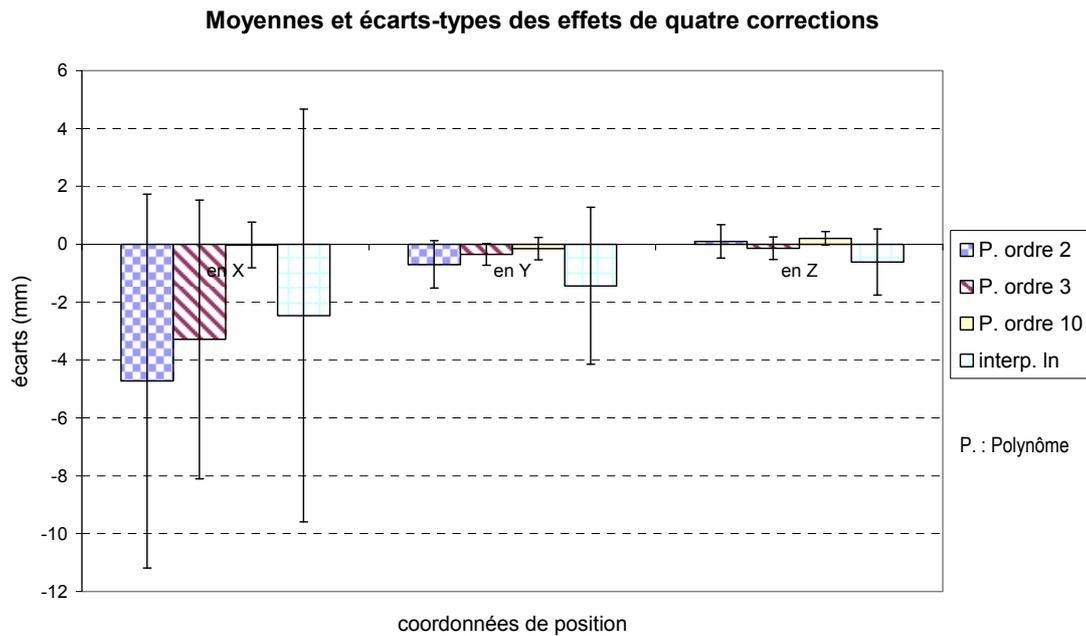
D'une façon globale pour les coordonnées de position, les corrections diffèrent significativement entre elles seulement pour les écarts en X et Y. Or seules les écarts en X présentent de forts écarts (supérieurs à 5mm) à corriger. Pour les coordonnées d'orientation, les corrections ne diffèrent pas significativement entre elles. Or, les angles d'orientation présentent de très faibles écarts (à peine un degré). On peut supposer que les corrections effectuées sont efficaces pour réduire les écarts notamment en X et en Y et de plus ces corrections réduisent ou n'altèrent pas les écarts des autres coordonnées où la correction des écarts n'est pas indispensable.

D'une façon générale pour la réduction des écarts, la méthode de proximité (« mnearsest ») est la plus efficace, suivie de la méthode polynomiale aux ordres élevés (9 et 10).

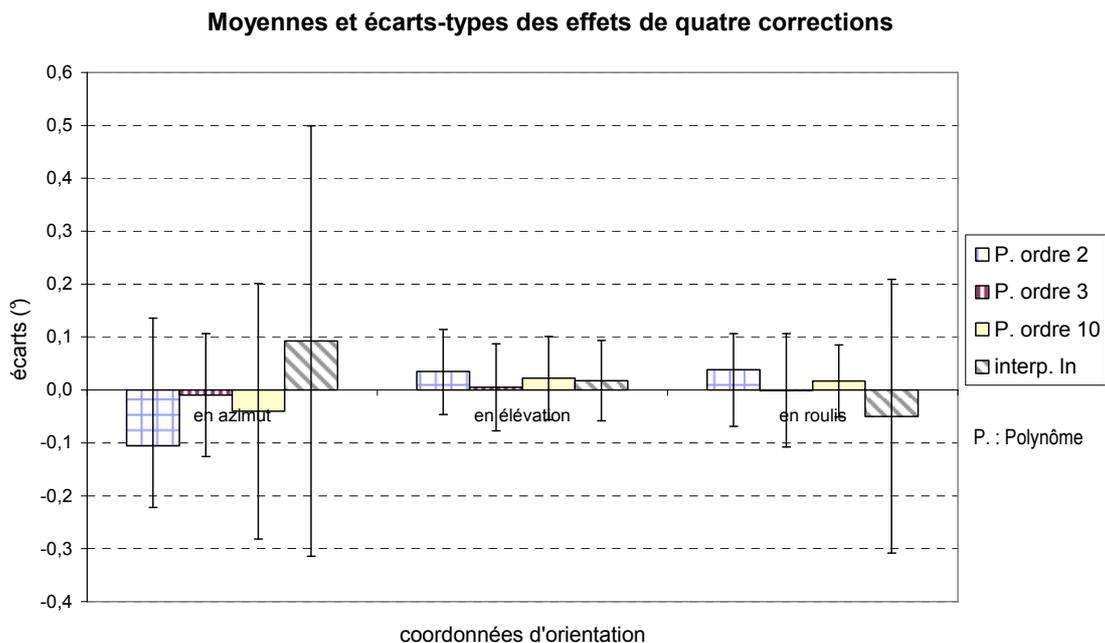
Cependant, par rapport à notre problématique, la priorité est au traitement des écarts de position (X,Y,Z) et de façon continue. La méthode de « proximité » est discontinue et présente un contexte expérimental d'emploi trop spécifique. C'est pourquoi cette méthode est exclue de notre sélection finale.

Parmi les nombreuses méthodes testées qu'elle est la plus adaptée à notre problématique ? Pour réaliser cette synthèse, nous regroupons les données des méthodes de correction les plus performantes ou significativement différentes. Afin de réduire le nombre

d'analyses, nous choisissons les méthodes les plus et les moins efficaces pour les valeurs en X et Y, à savoir celle basée sur la forme polynomiale à l'ordre 2, 3 et 10, et celle basée sur l'interpolation logarithmique (*ln*). Il faut noter que le choix de l'interpolation logarithmique (*ln*) est purement arbitraire par rapport aux deux autres interpolations (« carré » et « lin »). Ce choix arbitraire peut être considéré comme contraire à « l'éthique » de l'analyse statistique. Cependant cette approche sur un nombre limité de données nous semble intéressante par comparaison des résultats obtenus avec ceux des analyses précédentes. Les statistiques des écarts signés pour l'ensemble des 20 points étudiés sont rappelées dans les figures 93 et 94.



**Figure 93 : Comparaison des corrections en position apportées par quatre méthodes**



**Figure 94 : Comparaison des corrections en orientation apportées par quatre méthodes**

L'analyse Anova à un facteur avec variables dépendantes réalisée sur chaque série de 20 valeurs et pour chacune des six coordonnées, montre une significativité des écarts signés observés pour certaines méthodes et certaines coordonnées. Il est à noter, que dans ce cas particulier, les analyses réalisées avec les écarts signés ou absolus convergent. Le tableau suivant (Tableau XIX) regroupe les résultats et les valeurs des analyses Anova.

Les corrections à l'ordre 2 (rpfO2) et à l'ordre 10 (RpfO10) sont homogènes dans leurs corrections sur les 6 coordonnées. Les corrections à l'ordre 2 et 3 ne sont pas différentes. La correction basée sur l'interpolation *ln* est moins performante que les trois autres. Les corrections ne diffèrent pas sur le traitement des angles.

Le choix de la méthode sera réalisé en fonction du compromis entre un temps de calcul faible et la performance requise attendue par la correction des écarts. Toutefois la correction avec un ordre 2 dispose d'un avantage en raison de seulement 10 coefficients nécessaires pour le calcul contrairement à plus d'une centaine pour l'ordre 10.

**Tableau XIX : Synthèse des tests Anova réalisées pour quatre méthodes de correction**

S: Différences significatives (5%, valeur P <0,0001) entre corrections choisies						
	$\Delta X_{e-c}$	$\Delta Y_{e-c}$	$\Delta Z_{e-c}$	$\Delta A_{ze-c}$	$\Delta E_{le-c}$	$\Delta R_{le-c}$
3ln, rpfO10	NS	0,0060	0,0003	NS	NS	NS
3ln, rpfO2	NS	NS	0,0014	0,0228	NS	NS
3ln, rpfO3	NS	0,0199	0,0317	NS	NS	NS
rpfO10,rpfO2	0,0073	NS	NS	NS	NS	NS
rpfO10,rpfO3	NS	NS	NS	NS	NS	NS
rpfO2,rpfO3	NS	NS	NS	NS	NS	NS

### 3.3.6. Pertinence des indicateurs

Il est manifeste que la moyenne, l'écart-type et l'analyse statistique fournissent des indicateurs indispensables à notre étude et nécessaires pour la sélection d'une méthode. Qu'en est-il des autres indicateurs potentiels comme le critère quadratique et la somme des écarts absolus. Le tableau suivant (Tableau XX) cumule les valeurs obtenues de ces indicateurs pour les quatre méthodes de correction sélectionnées en finale.

**Tableau XX : Comparaison d'efficacité globale des indicateurs**

Méthode de correction	Critère quadratique cumulé			Somme globale des écarts absolus	
	en position	en orientation		en position	en orientation
P. ordre 2	1267	1,7		140	7,8
P. ordre 3	664	0,6		97	4,6
P. ordre 10	17	1,4		21	5,3
interp. ln	1302	4,7		130	8,5
	mm <sup>2</sup>	degré <sup>2</sup>		mm	degré

Au vue des ces résultats et d'une façon globale, les deux indicateurs diffèrent pour le classement des performances de réductions des écarts en position. En effet, la méthode « interp. *ln* » est moins performante que la méthode « P. ordre 2 » avec respectivement 1302 mm<sup>2</sup> et 1267 mm<sup>2</sup> pour le critère quadratique. Au contraire, la méthode « interp. Ln » est plus performante que la méthode « P. ordre 2 » avec respectivement 130 mm et 140 mm pour

le second indicateur. Si les différences sont évidemment plus accrues avec le critère quadratique, elles sont en revanche moins appréciables (en mm<sup>2</sup>) que celles obtenues avec la somme globale des écarts absolus (en mm). Une correction parfaite tendrait les indicateurs vers zéro.

En ce qui concerne l'orientation, les deux indicateurs conduisent au même classement des performances de réductions des écarts. Dans notre cas particulier où la valeur de référence était 0°, la somme globale des écarts absolus fournit un indicateur avec des différences accrues et palpables contrairement au premier indicateur (critère quadratique). Ce constat est spécifique aux valeurs voisines du 0° et n'est donc pas généralisable.

Le tableau suivant (Tableau XXI) rappelle les valeurs des deux indicateurs pour chacune des coordonnées et en fonction des quatre méthodes de corrections. Le tableau suivant (Tableau XXII) répertorie le classement des performances de réductions des écarts associés à ces indicateurs pour les quatre mêmes méthodes.

**Tableau XXI : Comparaison des indicateurs de réduction d'écarts**

Méthode de correction	Critère quadratique						Somme des écarts absolus					
	en X	en Y	en Z	en Az.	en El.	en RI.	en X	en Y	en Z	en Az.	en El.	en RI.
P. ordre 2	1238,1	22,6	6,4	1,25	0,17	0,27	112,8	18,2	9,4	4,44	1,50	1,90
P. ordre 3	655,9	5,2	3,3	0,26	0,13	0,22	81,9	8,7	6,1	1,60	1,25	1,70
P. ordre 10	11,9	3,3	1,9	1,14	0,13	0,09	10,9	5,3	5,0	3,32	1,04	0,89
interp. ln	1089,5	180,7	32,2	3,31	0,12	1,32	74,4	39,3	15,8	4,81	1,00	2,66
	mm <sup>2</sup>			degré <sup>2</sup>			mm			degré		

**Tableau XXII : Comparaison du classement des méthodes**

Méthode de correction	Classement selon le critère quadratique						Classement selon la somme des écarts absolus					
	en X	en Y	en Z	en Az.	en El.	en RI.	en X	en Y	en Z	en Az.	en El.	en RI.
P. ordre 2	4	3	3	3	4	3	4	3	3	3	4	3
P. ordre 3	2	2	2	1	2	2	3	2	2	1	3	2
P. ordre 10	1	1	1	2	3	1	1	1	1	2	2	1
interp. ln	3	4	4	4	1	4	2	4	4	4	1	4

D'une façon détaillée, pour les deux indicateurs, le classement en première place converge pour l'ensemble des coordonnées de position ou d'orientation et est dans l'ensemble en concordance avec les moyennes des écarts observés. Ces deux indicateurs semblent pertinents pour le choix de la méthode la plus efficace en termes de réduction des écarts. Parmi les 24 classements réalisés pour chaque indicateur seules deux inversions (cases grises) apparaissent dans le tableau suivant (Tableau XXII). La première concerne les écarts en X pour le classement en deuxième et troisième place. La seconde concerne les écarts en élévation pour le classement en deuxième et troisième place. Pour cette coordonnée d'orientation, la différence est beaucoup plus remarquable avec la somme des écarts absolus (0,21 mm) qu'avec le premier indicateur (de l'ordre de 10<sup>-4</sup> mm<sup>2</sup> et probablement pas significatif).

Pour conclure et dans le cadre de notre étude, l'indicateur correspondant à la somme des écarts absolus est plus pertinent, plus sensible et plus appréciable que l'indicateur correspondant au critère quadratique.

---

## 4. Conclusion

Pour mener cette étude, l'analyse bibliographique réalisée en première partie était indispensable afin de prendre plusieurs décisions concernant le choix des méthodes, des techniques et des réalisations, à appliquer. Cette analyse a permis de découvrir et d'approfondir le fonctionnement de différents traqueurs de position, de cerner leurs contraintes d'emploi et leurs spécificités. Au regard de cette revue, la sélection d'un traqueur électromagnétique approprié aux applications relatives au son 3D a été facilitée. De même, l'analyse des techniques d'étalonnage de traqueurs de position a permis de concevoir et de définir un système d'étalonnage répondant à notre problématique dans le cadre de l'étude PERTIA. Enfin cette analyse a conduit à comprendre et à sélectionner les méthodes de correction adaptées au traqueur de position. Au final, au travers de cette revue bibliographique, nous avons pu établir les spécifications tant en matériels qu'en méthodes afin d'atteindre l'objectif de ce travail : l'étalonnage d'un capteur de position.

Dans les conditions optimales de laboratoire, l'incertitude composée est tout à fait acceptable ( $\pm 0,6$  mm en X, Y et Z) pour nos applications. Cependant, les résultats de l'étalonnage, décrits en deuxième partie de ce travail, montrent l'importance de cette étape de vérification puisque, selon les conditions expérimentales, les écarts de mesures rapportés peuvent au mieux être inférieurs à une dizaine de millimètres et au pire dépasser plus de 250 mm. Dans ce cas, corriger ces écarts mis en évidence par l'étalonnage, devient donc une obligation pour toute exploitation expérimentale correcte du traqueur de position.

Dans la troisième partie de ce document, trois types de correction et d'interpolation sont sélectionnés et certaines corrections comportent elles-mêmes différentes options de calcul. Au total, quatorze corrections sont appliquées sur une sélection d'une vingtaine de points extraite du réseau de 294 points mesurés. Les méthodes de correction appliquées permettent de réduire les écarts initiaux de près de 70% à 99% selon les corrections et le type de grandeurs corrigées. Cet effet est évidemment très significatif d'après une analyse MANOVA. D'après les analyses statistiques *post hoc* (HSD Tukey) réalisées, plusieurs corrections conviennent pour répondre à notre problématique « Son3D » et diffèrent de manière significative. Les méthodes les plus performantes sont celle de « proximité » et les méthodes polynomiales d'ordre élevé (9 et 10). Parmi l'ensemble des corrections et compte tenu du nombre réduit de calculs, deux méthodes se distinguent : la correction à base de forme polynomiale d'ordre 2 et la méthode dite de « proximité ». Il est à noter cependant que la correction dite de proximité présente un champ applicatif restreint. C'est pourquoi, le choix de la correction à base de forme polynomiale d'ordre deux procure au final un bon compromis entre la performance de réduction et le nombre de calculs. Suite à l'évaluation de deux indicateurs de performances de corrections, la somme des écarts absolus apparaît comme l'indicateur le plus pertinent dans notre étude.

---

Au travers de cette étude, j'ai notamment effectué les différentes tâches suivantes :

- ✓ Choix et acquisition d'un traqueur de position,
- ✓ Conception et définition du système d'étalonnage en statique du traqueur de position et d'orientation,
- ✓ Sous-traitance de la fabrication du système d'étalonnage et de sa caractérisation dimensionnelle,
- ✓ Réalisation de plusieurs étalonnages du traqueur de position,
- ✓ Estimation des incertitudes de mesure,
- ✓ Sélection et adaptation de méthodes de correction,
- ✓ Modification et développement des logiciels de corrections,
- ✓ Comparaisons et analyses statistiques de la performance des méthodes de correction,
- ✓ Evaluation d'un indicateur d'efficacité des méthodes de correction.

Ce travail a eu une application directe et a été employé afin de valider une méthode de pointage pour le recueil expérimental dans le cadre de l'étude PERTIA (*cf.* [3]).

Suite à ce travail, plusieurs perspectives sont envisagées :

- Vérifier l'impact des vibrations produites par le bruit dans la chambre réverbérante sur la position fixe de l'émetteur et par conséquent sur les mesures fournies par le traqueur,
- Caractériser le champ électromagnétique de l'emplacement expérimental afin de déceler toute évolution de cette caractérisation lors d'une modification métallique ou électrique de l'environnement,
- Etablir la traçabilité métrologique de l'étalonnage du traqueur,
- Tester la fonction d'interpolation en dehors du réseau de points de référence à des positions de +25 mm ou +50 mm et sur les 3 axes,
- Rendre opérationnel la méthode de correction à forme polynomiale à l'ordre deux en l'implantant sur un processeur temps réel de type Tucker Davis (TDT),
- Développer la méthode dite de « proximité » et l'implanter en temps réel sur un processeur temps réel de type Tucker Davis (TDT),
- Etalonner deux traqueurs de position simultanément (le premier utilisé comme pointeur de position, le second comme détecteur de mouvement de tête),
- Réaliser un système de mesure de la latence du traqueur.

---

## **5. Annexes**

### **Liste des annexes**

**Annexe 1** : Tableau comparatif de traqueurs de position

**Annexe 2** : Tableaux comparatifs de l'étalonnage et des techniques d'interpolation

**Annexe 3** : Outils d'étalonnage statique

**Annexe 4** : Caractéristiques du système d'étalonnage

**Annexe 5** : Tableau des 294 points de référence

**Annexe 6** : Tableau de l'étalonnage

**Annexe 7** : Programmation informatique

**Annexe 8** : Application des méthodes de correction

**Annexe 9** : Exemples d'analyse statistique

**Annexe 10** : Activité professionnelle

## Annexe 1 : Tableau comparatif de traqueurs de position

Type de produit	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur
<b>Catégorie</b>	Capteur électromagnétique	Capteur électromagnétique	Capteur électromagnétique	Capteur électromagnétique	Capteur électromagnétique
<b>Technologie</b>	à champ alternatif	à champ impulsionnel	à champ alternatif	à champ alternatif	à champ alternatif
<b>Nom du produit</b>	Fastrak	Flock of Birds	Insidettrak	Isotrak II	Liberty
<b>Nombre de degrés de liberté (ddl) mesurés :</b>	6	6	6	6	6
<b>Incertitude en translation</b>	0,8 mm	1,8 à 2,5 mm RMS	nc	2,5 mm	0,8 mm RMS
<b>Incertitude en rotation</b>	0,15°	0,5°	3°	0,75°	0,15°
<b>Résolution en translation :</b>	0,005 mm à chaque 25,4 mm de séparation entre émetteur et récepteur	0,5 mm à d=30,5cm ou 0,8mm	0,01 mm	0,4 mm	0,038mm à 30cm
<b>Résolution en rotation :</b>	0,025°	0,1° à d=30,5cm	0,025°	0,1°	0,0012°
<b>Etendue de mesure en rotation ou champ de vision</b>	360°	±180° horizontal et roulis, ± 90° vertical	360°	360°	360°
<b>Etendue de mesure en translation +/- ou rayon d'action :</b>	jusqu'à 1,5m avec un émetteur TX2, possibilité jusqu'à 3m	0,91 m jusqu' 1,2m (option à 3,05m)	1,5m	1,5m	0,90m et jusqu'à 1,80m
<b>Volume calculé de mesure en m3</b>	14,14	3,20	14,14	14,14	3,05
<b>Fréquence des mesures transmises :</b>	120 Hz divisé par le nombre de récepteurs	jusqu'à 144Hz	60 Hz divisé par le nombre de récepteurs	60 Hz divisé par le nombre de récepteurs	240 Hz divisé par le nombre de récepteur
<b>Temps de latence :</b>	4 ms à 8,5 ms	7,5 ms à 47 ms	12 ms	20 ms à 45 ms	3,5 ms
<b>Sorties</b>	Coord. Cartésiennes & angles d'orientation ,quaternions; unités métriques anglaises	coord. Cartésiennes & angles d'orientation (matrice de rotation sélectionnable) ou quaternions			unité métrique ou anglaise
<b>Interfaces</b>	RS232C (jusqu'à 155,2K bauds) ou IEEE-488 jusqu'à 100kB/s	l'ordinateur: RS232C (115,2kbauds) ou RS422/485 (310kbauds)	Bus ISA	RS232C (jusqu'à 155,2K bauds) et IEEE-488	RS232 ou USB
<b>Format des Données / Modes</b>	ASCII Binaire / Unité ou trame	Binaire / Unité ou trame			ASCII ou binaire IEEE 745
<b>Observations</b>	Jusqu'à 4 récepteurs avec un seul contrôleur. Utilisation possible de 4 contrôleurs en même temps s.	Très faible perturbation par les pièces métalliques. Le temps de latence ne varie pas beaucoup s'il y a plusieurs récepteurs. Jusqu'à 4 récepteurs en même temps., poids capteurs 21g	1 ou 2 récepteurs. L'électronique du capteur se met sur un PC, Bus ISA.	1 ou 2 récepteurs. Moins performant et moins. FASTRAK.	4 à 16 récepteurs, nombreux accessoires possibles (récepteur miniature, stylus)
<b>Catégorie de prix</b>	6050 \$	2695 \$ à 8090 \$	999 \$	2875 \$	7000 \$
<b>Constructeur</b>	Polhemus	Ascension technology Corp.	Polhemus	Polhemus	Polhemus
<b>Distributeur pour la France</b>	Theta Scan	Simulis	Immersion SA	Immersion SA	Immersion SA
<b>Site Web</b>	www.polhemus.com	www.ascension-tech.com/graphic.htm	www.polhemus.com	www.polhemus.com	www.polhemus.com

N.B : Souvent dans la documentation technique du traqueur, l'exactitude n'est pas explicitement décrite et sa quantification par le constructeur ressemble plus à une incertitude qu'à une erreur. C'est pourquoi à défaut d'information, nous employons le terme incertitude.

## Suite annexe 1 : Tableau comparatif de traqueurs de position

Type de produit	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur
<b>Catégorie</b>	Capteur électromagnétique	Capteur électromagnétique	Capteur électromagnétique	Capteur électromagnétique	Capteur électromagnétique
<b>Technologie</b>	à champ impulsionnel	à champ impulsionnel	à champ alternatif	à champ impulsionnel	à champ impulsionnel
<b>Nom du produit</b>	microBird	Nest of Birds	Patriot	PC/Bird	SpacePad
<b>Nombre de degrés de liberté (ddl) mesurés :</b>	6	6	6	6	6
<b>Incertitude en translation</b>	1,4 mm RMS	1,8 mm RMS	2,5 mm RMS		nc
<b>Incertitude en rotation</b>	0,3° RMS	0,5° RMS	0,75° RMS		nc
<b>Résolution en translation :</b>	0,05mm à d=30,5cm	0,5mm à d=30,5cm	0,038mm à chaque 25,4mm de séparation entre émetteur et récepteur	2,0 mm	nc
<b>Résolution en rotation :</b>	0,1° à d=30,5cm	0,1° à d=30,5cm	0,1°	0,15°	nc
<b>Etendue de mesure en rotation ou champ de vision</b>	±180° horizontal et roulis, ± 90° vertical	±180° horizontal et roulis, ± 90° vertical	360°	±180° horizontal et roulis, ± 90° vertical	±180° horizontal et roulis, ± 90° vertical
<b>Etendue de mesure en translation +/- ou rayon d'action :</b>	20cm min à 70cm max pour X, ±30cm pour Y et Z. hémisphère avant	0,91 m	jusqu'à 1,5 m avec un émetteur TX2	1,22 m	2,4 m x 2,4 m
<b>Volume calculé de mesure en m<sup>3</sup></b>	0,18	3,20	14,14	7,61	
<b>Fréquence des mesures transmises :</b>	jusqu'à 90Hz	105Hz divisés par le nombre de récepteurs	60Hz divisés par le nombre de capteur	144Hz	120 Hz divisé par le nombre de récepteur
<b>Temps de latence :</b>		nc	17 ms	10 ms	<8 ms
<b>Sorties</b>	coord. Cartésiennes & angles d'orientation ou matrice de rotation	coord. Cartésiennes & angles d'orientation (matrice de rotation sélectionnable) ou quaternions			
<b>Interfaces</b>	PCI v2.1	RS232 ou USB 1.1	RS232 ou USB 1.1		
<b>Format des Données / Modes</b>	Binaire / Unité ou trame	Binaire / Unité			
<b>Observations</b>	dimension du capteur: capteur 8,4mm de longueur, diamètre 1,8mm max	4 récepteurs possibles	température de fonctionnement 10°C à 40°C		tapis antenne de 2,4 m * 2,4 m permettant l'émission pour 4 récepteurs
<b>Catégorie de prix</b>		6000 \$ à 7500 \$	2500 \$	2475 \$	985 \$
<b>Constructeur</b>	Ascension technology Corp.	Ascension technology Corp.	Polhemus	Ascension technology Corp.	Ascension technology Corp.
<b>Distributeur pour la France</b>			Immersion SA		
<b>Site Web</b>	<a href="http://www.ascension-tech.com/graphic.htm">www.ascension-tech.com/graphic.htm</a>	<a href="http://www.ascension-tech.com/graphic.htm">www.ascension-tech.com/graphic.htm</a>	<a href="http://www.polhemus.com">www.polhemus.com</a>	<a href="http://www.ascension-tech.com/graphic.htm">www.ascension-tech.com/graphic.htm</a>	<a href="http://www.ascension-tech.com/graphic.htm">www.ascension-tech.com/graphic.htm</a>

## Suite annexe 1 : Tableau comparatif de traqueurs de position

Type de produit	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur
Catégorie	Capteur électromagnétique	Capteur électromagnétique	Capteur mécanique	Capteur mécanique	Capteur mécanique
Technologie	à champ alternatif	à champ alternatif			
Nom du produit	Ultratrak	Ultratrak 120	ADL-1	BOOM3C	Wright Trac
Nombre de degrés de liberté (ddl) mesurés :	6	6	6	6	6
Incertitude en translation	2,5 mm (à 1,5m), 7,6 mm (à 5m)		5,1 mm	0,4 mm	nc
Incertitude en rotation	3°		nc	nc	nc
Résolution en translation :	1,3 mm (à 1,5m) et 6,3 mm (à 5m)	3,8 mm (à 1,5m) et 6,3 mm (à 5m)	0,6 mm		1° par axe
Résolution en rotation :	0,1°	0,1°	0,15° à 0,3° aux articulations	0,1°	1° par axe
Etendue de mesure en rotation ou champ de vision	360°	360°	180°	360°	360°
Etendue de mesure en translation +/- ou rayon d'action :	maximum 5m	maximum 5m	volume de 1/2 cylindre D=0,91m et H=0,46m	cercle de diamètre = 1,8m et hauteur= 0,76m	sphère de 1 m de diamètre
Volume calculé de mesure en m <sup>3</sup>	523,60	523,60	0,15	2,00	0,55
Fréquence des mesures transmises :	30-60Hz	60-120Hz	maxi 300 Hz	maxi 70 Hz	maxi 300 Hz
Temps de latence :	6 ms à 12 ms	6 ms à 12 ms	0,35 ms à 1,8 ms	0,2 ms	3,3 ms
Sorties					
Interfaces	Ethernet ou SCSI		RS232C	RS232C	RS232C
Format des Données / Modes					
Observations	jusqu'à 16 récepteurs		Utilisation : localisation de la tête	Pas de nom : traqueur mécanique associé à l'interface visuelle BOOM 3C. Dispositif non vendu séparément	
Catégorie de prix	23250 \$ à 32250 \$	39500 \$ à 71500 \$	1299 \$	95000 \$	795 \$
Constructeur	Polhemus	Polhemus	Shooting Star Technology	Fakespace Inc.	Magellan Marketing
Distributeur pour la France	Immersion SA	Immersion SA			Vidtronics, Inc
Site Web	www.polhemus.com	www.polhemus.com			

## Suite annexe 1 : Tableau comparatif de traqueurs de position

Type de produit	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur
Catégorie	Capteur optique	Capteur optique	Capteur optique	Capteur optique	Capteur optique
Technologie	IR 880nm, 3 types de diodes d'intensité différentes				à récepteurs plans
Nom du produit	ARTtrack1	LaserBird 2	MacReflex	Optotrak 3020	Optotrak Certus
Nombre de degrés de liberté (ddl) mesurés :	6	6	6	6	6
Incertitude en translation	0,4 mm à d=3m	0,7 mm (RMS)			à 4 m : 0,3 mm (X, Y), 0,45 mm (Z), à 2,25 m : 0,1 mm (X, Y), 0,15 mm (Z)
Incertitude en rotation	0,12° à d=3m	0,5°RMS			ps
Résolution en translation :	1/65000 FoV horizontal, 1/50000 FoV vertical	0,1 mm		0,01 mm à d=2,25m	0,01 mm
Résolution en rotation :	nc	0,05°			
Etendue de mesure en rotation ou champ de vision	±60°horizontal, ±45° vertical	±50° horizontal, ±52° vertical			ps
Etendue de mesure en translation +/- ou rayon d'action :	jusqu'à 10 m selon la taille du marqueur,	0,15 m à 1,83 m	0,5 m à 30 m à l'intérieur; 0,5 m à 9 m à l'extérieur		1,43 m x 1,28 m (à 2,25m ) et 2,36m x 2,04 m (à 4m)
Volume calculé de mesure en m <sup>3</sup>					
Fréquence des mesures transmises :	60Hz max	240Hz	50-200Hz	600Hz	450Hz en 3D et 145Hz en 6D
Temps de latence :		7 à 11 ms			nc
Sorties		position et angles d'euler			
Interfaces	10Mbit/s Ethernet	RS232C (115,2kBaud)			nc
Format des Données / Modes					
Observations	FoV=Field of view, répétabilité 0,06 mm, erreur maximum 1,4 mm	poids capteurs 40g, 10cm-9cm*1cm, en orientation +-180horizon, +-85°vertical		produit retiré de la vente	Jusqu'à 256 marqueurs (cibles).Appareil de métrologie tridimensionnelle très performant.Détermine la position 3D d'un pointeurs recouvert de 6 à 24 marqueurs
Catégorie de prix		19500 \$	38500 \$ à 48500 \$	57400 \$	57 400 \$
Constructeur	advanced realtime tracking GmbH	Ascension technology Corp.		Northern Digital	Northern Digital
Distributeur pour la France					
Site Web		www.ascension-tech.com/graphic.htm		www.ndigital.com	www.ndigital.com

## Suite annexe 1 : Tableau comparatif de traqueurs de position

Type de produit	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur
<b>Catégorie</b>	Capteur optique	Capteur optique	Capteur optique	Capteur optique	Capteur optique
<b>Technologie</b>	à récepteurs plans				LED et caméra
<b>Nom du produit</b>	Polaris Accedo	RK-447 system de poursuite multicible	SELSPOT II	Vicon 460	HiBall Tracker system
<b>Nombre de degrés de liberté (ddl) mesurés :</b>	6	6	6	6	6
<b>Incertitude en translation</b>	0,35 mm RMS			nc, mais dépend de la taille du marqueur	<1mm
<b>Incertitude en rotation</b>	ps			nc	0,02°
<b>Résolution en translation :</b>	nc			nc	<1mm
<b>Résolution en rotation :</b>	ps		0,025% millirad	nc	0,02°
<b>Etendue de mesure en rotation ou champ de vision</b>	nc				
<b>Etendue de mesure en translation +/- ou rayon d'action :</b>	cornet < 1m3		jusqu'à 200 m		
<b>Volume calculé de mesure en m3</b>					150
<b>Fréquence des mesures transmises :</b>	20Hz	60Hz	10kHz	nc	nc
<b>Temps de latence :</b>		16 ms		nc	n
<b>Sorties</b>				trajectoire, XYZ en temps réel, angles nécessite 4 marqueurs	
<b>Interfaces</b>	RS232C			nc	nc
<b>Format des Données / Modes</b>				ASCII, binaire	nc
<b>Observations</b>				capture de mouvements en 3D au moyen de 6 caméras de 1000*1000 pixels de résolution, plusieurs de dizaine de marqueurs possibles	
<b>Catégorie de prix</b>	nc	36800 \$	29980 \$	90000\$ à 212000\$	nc
<b>Constructeur</b>	Northern Digital	ISCAN, Inc	Selcom AB	Vicon Motion Systems	UNC & 3rd Tech
<b>Distributeur pour la France</b>					
<b>Site Web</b>	www.ndigital.com			www.vicon.com	www.cs.unc.edu/~tracker

## Suite annexe 1 : Tableau comparatif de traqueurs de position

Type de produit	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur
Catégorie	Capteur hybride	Capteur hybride	Capteur acoustique	Capteur acoustique	Capteur acoustique
Technologie	gyromètres et accéléromètres	ultrason et inertiel	à ultrasons	à ultrasons	
Nom du produit	Motion Pack	Intersense IS-900	Logitech 3D Mouse and Head Tracker	souris 3D	RedBaron
Nombre de degrés de liberté (ddl) mesurés :	6	6	6	6	6
Incertitude en translation	nc	2 à 4 mm RMS	6 mm à 30cm	0,8 mm	nc
Incertitude en rotation	nc	0,2° à 0,4°		nc	nc
Résolution en translation :	accélération 10 µg	1,50 mm	0,1 mm	0,1 mm	0,5 mm
Résolution en rotation :	dérive 0,004°/s	0,05°	0,1°	nc	0,1° à 0,5°
Etendue de mesure en rotation ou champ de vision	jusqu'à 500°/s		cône de 100°	nc	limité par principe
Etendue de mesure en translation +/- ou rayon d'action :	jusqu'à 10 g		1,5 m	25cmx 25cmx 25cm	2,1 m
Volume calculé de mesure en m <sup>3</sup>				0,02	
Fréquence des mesures transmises :	60Hz	180 Hz	50Hz	50Hz	50Hz
Temps de latence :	nc	10 ms	30 ms	nc	nc
Sorties			Coord. Cartésiennes & angles d'orientation		
Interfaces	6 sorties analogiques		RS232C	interface pour Macintosh	RS232C
Format des Données / Modes					
Observations	Le capteur mesure les 3 vitesses angulaires et les 3 accélérations linéaires. Ensemble compact (3" x 3" x 4") avec conditionnement interne des signaux.			Ce capteur mesure les 6 ddl par principe de triangulation des ultrasons. Il est exploité en souris "6 ddl" et appelé souris 3D par le constructeur	Jusqu'à 2 récepteurs simultanément
Catégorie de prix	10000 \$	9950 \$ à 36600 \$	2799 \$	nc	de 1 à 3 k€
Constructeur	Systron-Donner	InterSense	Logitech	Alps Electric	Logitech
Distributeur pour la France			Logitech France		Logitech France
Site Web	www.systron.com	www.isense.com	www.qualixdirect		www.qualixdirect

## Suite annexe 1 : Tableau comparatif de traqueurs de position

Type de produit	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur
Catégorie	Capteur sans source émettrice	Capteur acoustique	Capteur acoustique	Capteur acoustique	Capteur hybride
Technologie	inertiel	à ultrasons	à ultrasons		à ultrasons et infrarouges
Nom du produit	IS-900 SimTracker	GP12-3D	Head/Hand XYZ tracker	*	OWL
Nombre de degrés de liberté (ddl) mesurés :	6	3	3	3	3
Incertitude en translation	2 à 3 mm			1 mm	nc
Incertitude en rotation	0,25°			ps	ps
Résolution en translation :	1,5 RMS	0,05 mm		nc	0,3 mm
Résolution en rotation :	0,05°			ps	ps
Etendue de mesure en rotation ou champ de vision	360°			ps	ps
Etendue de mesure en translation +/- ou rayon d'action :	2*2*3m	1 m x 1 m x 1 m jusqu'à 4,87 m x 2,43 m x 2,43 m	jusqu'à 3m	4 m	0,91 m
Volume calculé de mesure en m <sup>3</sup>		0,97			
Fréquence des mesures transmises :	180 Hz	150Hz divisé par le nombre d'émetteur	20Hz	200Hz	50Hz
Temps de latence :	4 ms			nc	nc
Sorties					
Interfaces	RS232C			nc	RS232C
Format des Données / Modes					
Observations				* Ce produit n'est pas commercialisé a priori. Principe basé sur les ultrasons et les infrarouges,	Capteur à ultrasons original qui se tient sur le doigt et que l'on manipule sans fil devant l'écran pour l'utiliser en pointeur 3D
Catégorie de prix	17900 \$	4995 \$ à 6995 \$	345 \$		< 1 k€
Constructeur	InterSense	Science Accessories corp.	Fifth Dimension technologies	Contrôle US	Kantec
Distributeur pour la France					
Site Web	www.intersense.com				

## Suite annexe 1 : Tableau comparatif de traqueurs de position

Type de produit	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur
Catégorie	Capteur sans source émettrice	Capteur sans source émettrice	Capteur mécanique	Capteur mécanique	Capteur mécanique
Technologie	inertiel	inertiel	pointeur 3D	pointeur 3D	pointeur 3D
Nom du produit	3D-Bird	Intertrax2	FaroArm-Platinum	PROBE-IC	PROBE-IX
Nombre de degrés de liberté (ddl) mesurés :	3	3	3	3	3
Incertitude en translation		ps	0,01 mm	nc	nc
Incertitude en rotation	2,5° RMS statique, 4° RMS dynamique	nc	ps	ps	ps
Résolution en translation :	ps	ps	nc	de 1,3 mm à 2,5 mm	de 0,6 mm à 1,3 mm
Résolution en rotation :	0,2°	0,02°	ps	aux articulations 0,7°	aux articulations 0,35°
Etendue de mesure en rotation ou champ de vision	±180° horizontal et roulis, ±90° vertical	±80° tangage, ±180° lacet ±90° roulis	nc	360°	360°
Etendue de mesure en translation +/- ou rayon d'action :	longueur du câble	longueur du câble	limité à longueur du bras	volume 0,86m x 0,38m x 0,43 m	volume 0,86m x 0,38m x 0,43 m
Volume calculé de mesure en m <sup>3</sup>	ps			0,14	0,14
Fréquence des mesures transmises :	jusqu'à 160Hz	256 Hz		maxi 250 Hz	maxi 250 Hz
Temps de latence :	15 ms	4 ms		3 ms	3 ms
Sorties					
Interfaces	RS232C	USB et RS232C		RS232C	RS232C
Format des Données / Modes					
Observations	rotation: 1000°/s max	destiné aux jeux		est utilisé en pointeur tridimensionnel	est utilisé en pointeur tridimensionnel
Catégorie de prix		995 \$	20000 \$	nc	
Constructeur	Ascension technology Corp.	InterSense	FARO Technologies Inc.	Immersion Human Interface	Immersion Human Interface
Distributeur pour la France					
Site Web	<a href="http://www.ascension-tech.com/graphic.htm">www.ascension-tech.com/graphic.htm</a>	<a href="http://www.isense.com">www.isense.com</a>			

## Suite annexe 1 : Tableau comparatif de traqueurs de position

Type de produit	Traqueur	Théodolite	Traqueur	Traqueur	Traqueur
Catégorie	Capteur optique	capteur optique	Capteur optique	Capteur hybride	Capteur sans source émettrice
Technologie		Laser	à récepteurs plans	Compas et inclinomètres	
Nom du produit	DynaSight	FARO Laser Tracker Xi	Sirah TC242	Cyber Track II	CyberMaxx
Nombre de degrés de liberté (ddl) mesurés :	3	3	3	3	3
Incertitude en translation		0,03 mm à d=2 m	ps	ps	
Incertitude en rotation		18 µm + 3µm/m	ps	± 2° en élévation et inclinaison	
Résolution en translation :	de 0,1 mm à 0,4 mm	0,5 µm	0,1% du champ de vision (FoV)	ps	ps
Résolution en rotation :		0,02 arcseconds		0,5° en élévation, 0,5° en inclinaison	0,1° vertical, 0,1° horizontal
Etendue de mesure en rotation ou champ de vision		±270° horizontal, +75° -50° vertical	de 8,8° à 27° par rapport à l'axe de la caméra	360° horizontal, ±45° en inclinaison	360° horizontal, ±45° en inclinaison
Etendue de mesure en translation +/- ou rayon d'action :	0,1 m à 1,5 m et de 1 m jusqu'à 6 m pour une cible de 7 mm	70 m			
Volume calculé de mesure en m <sup>3</sup>					
Fréquence des mesures transmises :	64Hz max	1 kHz max	200Hz (fréquence des caméras)	60Hz	75Hz
Temps de latence :	16 ms à 31 ms		nc	<50 ms	29,6 ms
Sorties					
Interfaces			nc	RS232C	
Format des Données / Modes				ASCII	
Observations			Suivi simultané de 10 cibles. Le capteur de base mesure 2 angles et avec deux capteurs (caméras) on peut suivre la trajectoire 3D d'une cible.		
Catégorie de prix	2195 \$	90000 \$	nc	850 \$	799 \$
Constructeur	Origin instruments Corporation	FARO Technologies Inc.	Micromaine	general reality company	Victor Maxx technologies
Distributeur pour la France					
Site Web	www.orin.com	www.faro.com		www.genreality.com	

## Suite annexe 1 : Tableau comparatif de traqueurs de position

Type de produit	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur	Traqueur
Catégorie	Capteur sans source émettrice	Capteur sans source émettrice	Capteur sans source émettrice	Capteur sans source émettrice	Capteur hybride
Technologie	gyroscopique	gyroscopique	inertiel		Compas et inclinomètres
Nom du produit	Gyropoint	Gyrotrac3	InertiaCube 3	Mouse Sense 3D	Way finder_VR
Nombre de degrés de liberté (ddl) mesurés :	3	3	3	3	3
Incertitude en translation	ps	ps	ps	ps	ps
Incertitude en rotation	0,2°	dérive statique : 0,01 deg/s, dérive dynamique : 0,25 deg/s	1° RMS	± 1° à ±5°	2°
Résolution en translation :	ps	ps	ps	ps	ps
Résolution en rotation :	nc	0,032°	0,03° RMS	±1°	±0,1° en élévation, ± 0,1° en inclinaison
Etendue de mesure en rotation ou champ de vision	tangage ±66°, en roulis : 360°	±66°	360°	360° horizontal, ±25° à 55° en inclinaison	±50° ou ±20°
Etendue de mesure en translation +/- ou rayon d'action :	ps	ps	câbles de 4,5 m et 22 m	ps	360°
Volume calculé de mesure en m3					
Fréquence des mesures transmises :	nc	50Hz	180Hz	8Hz	30Hz
Temps de latence :	nc	nc	2 ms à 50 ms	125 ms	33 ms
Sorties					
Interfaces	RS232C	RS232C	RS232C	RS232C	RS232C
Format des Données / Modes					
Observations	Ce capteur est utilisé en pointeur 3D avec le gyroscopie mécanique GyroEngine. Il est équipé de boutons de commande pour être utilisé en souris 3D. Poids : 170 g.		1200°/s max, poids 25g	Est utilisé dans la main ou incorporé dans un visiocasque.	Le capteur incorpore 3 compas et 2 inclinomètres pour déterminer les 3 angles.
Catégorie de prix	299 \$	de 1 à 3 k€	1995 \$	750 \$	599 \$ à 699 \$
Constructeur	Gyration	VR Systems	InterSense		Précision Navigation
Distributeur pour la France				RPI Advanced Technology Group	
Site Web			www.isense.com		

## Suite annexe 1 : Tableau comparatif de traqueurs de position

Type de produit	Traqueur	Traqueur	Souris 3D	Souris 3D	Souris 3D
Catégorie	Capteur sans source émettrice	Capteur sans source émettrice	à boule	à boule	à boule
Technologie	gyroscopique	inclinomètre			
Nom du produit	Gyrotrac2	EX-TILT 2000	Cyberman	Geometry Ball	Space Control Mouse
Nombre de degrés de liberté (ddl) mesurés :	2	1	ddl commandés : 6)	ddl commandés : 6)	ddl commandés : 6)
Incertitude en translation	ps	ps	nc	nc	nc
Incertitude en rotation	dérive statique: 0,01 degs, dérive dynamique : 0,25 deg/s	nc		nc	
Résolution en translation :	ps	ps	8 bits pour X et Y, 1 bit pour les autres ddl (tout ou rien)	Résolution interne: 10 bits	Résolution interne: 8 bits
Résolution en rotation :	0,032°	0,5° (répétabilité)	nc		
Etendue de mesure en rotation ou champ de vision	±66°	±75°		nc	étendue de déplacement ±4°
Etendue de mesure en translation +/- ou rayon d'action :	ps	ps	nc	nc	étendue de déplacement ±1,5mm
Volume calculé de mesure en m <sup>3</sup>					
Fréquence des mesures transmises :	50Hz	nc	nc	250Hz	nc
Temps de latence :	nc	nc	nc	nc	nc
Sorties					
Interfaces	RS232C	RS232C	RS232C	RS232C	RS232C
Format des Données / Modes					
Observations			Le capteur fournit des vibrations en retour		
Catégorie de prix	de 1 à 3 k€	< 1 k€	nc	de 1 à 3 k€	nc
Constructeur	VR Systems	AOSI	Logitech	CIS Graphics	Virtual Realit Technologies (VRT)
Distributeur pour la France			Logitech France		
Site Web			www.qualixdirect		

## Suite annexe 1 : Tableau comparatif de traqueurs de position

<i>Type de produit</i>	Souris 3D	Souris 3D	Souris 3D	Souris 3D
<i>Catégorie</i>	à boule	à boule	à boule	manipulée en main
<i>Technologie</i>				
<i>Nom du produit</i>	Space Master	Spaceball2003	SpaceController	MultipointZ
<i>Nombre de degrés de liberté (ddl) mesurés :</i>	ddl commandés : 6)	ddl commandés : 6)	ddl commandés : 6)	ddl commandés : 6)
<i>Incertitude en translation</i>	nc	nc	nc	nc
<i>Incertitude en rotation</i>	nc	nc	nc	nc
<i>Résolution en translation :</i>	Résolution interne : 8 bits	Résolution interne : 10 bits	Résolution interne : 10 bits	0,08 mm
<i>Résolution en rotation :</i>				0,3°
<i>Etendue de mesure en rotation ou champ de vision</i>	étendue de déplacement ±15°			
<i>Etendue de mesure en translation +- ou rayon d'action :</i>	étendue de déplacement ± 5 mm	en force : 0,5N à 20N, en couple : 15N m à 600N m	en force : 0,5N à 20N, en couple: 15Nm à 600Nm	ps
<i>Volume calculé de mesure en m3</i>				
<i>Fréquence des mesures transmises :</i>	nc	nc	nc	nc
<i>Temps de latence :</i>	nc	nc	nc	nc
<i>Sorties</i>				
<i>Interfaces</i>	RS232C	RS232C	RS232C	RS232C
<i>Format des Données / Modes</i>				
<i>Observations</i>		Caractéristiques similaires à celles du SpaceController. Seule la forme change.	Caractéristiques similaires à celles du Spaceball 2003. Seule la forme change	Cette souris 3D se tient en main.L'utilisateur peut commander des déplacements en translation et en rotation grâce à une boule incorporée dans le dispositif.
<i>Catégorie de prix</i>	<2k€	< 2 k€	< 2 k€	nc
<i>Constructeur</i>	Basys	Spacotec	Spacotec	Multipoint Technology
<i>Distributeur pour la France</i>		Immersion SA	Immersion SA	
<i>Site Web</i>				

## Annexe 2 : Tableaux comparatifs de l'étalonnage et des techniques d'interpolation

Tableau 1 : Synthèse de la bibliographie analysée sur l'étalonnage de traqueur électromagnétique

Auteurs	Topologie de la table d'étalonnage	Matériel mesurant la table d'étalonnage	Estimation de la correction d'erreur de position	Estimation de la correction d'erreur d'orientation	Forme de la représentation de la rotation	Logiciel du domaine public
Bryson [44]	Grille rectiligne 3D dans l'espace exact	Tableau troué, grille 2D au sol	Forme polynomiale d'ordre 4, interpolation locale	N/A	N/A	non
Ghazisaedy <i>et al.</i> [41]	Grille rectiligne 3D dans l'espace mesuré	Matériel de repérage et de poursuite ultrasonore	Interpolation tri-linéaire	N/A	N/A	non
Livingston <i>et al.</i> [42]	Grille rectiligne re échantillonné 3D dans l'espace mesuré	Bras Faro	Interpolation tri-linéaire	Interpolation locale	quaternions	code source
Zachmann [34, 45]	Grille rectiligne 3D dans l'espace exact	Barre en bois, grille 2D au sol	interpolation multi-quadratique d'Hardy	Interpolation multi-quadratique d'Hardy	Matrice de rotation	non
Czemuśenko <i>et al.</i> [40]	Grille rectiligne re échantillonné 3D dans l'espace mesuré	Logiciel basé sur une analyse visuelle du déplacement	Interpolation tri-linéaire	N/A	N/A	non
Ellis <i>et al.</i> [46]	Grille rectiligne 3D dans l'espace exact	inconnu	Interpolation tétraédrique	Interpolation locale	quaternions	non
Briggs [48]	Grille rectiligne re échantillonné 3D dans l'espace mesuré	gabarit, grille 2D au sol	Interpolation locale	N/A	N/A	non
Kindratenko [50]	Grille rectiligne 3D dans l'espace exact	En variant un dispositif de 8 capteurs, grille 2D au sol	Forme polynomiale d'ordre 4	Forme polynomiale d'ordre 4	angles d'Euler	code source, binaires
Kindratenko <i>et al.</i> [49]	Grille rectiligne 3D dans l'espace exact	En variant un dispositif de 8 capteurs, grille 2D au sol	Interpolation locale	Interpolation locale	quaternions	code source, binaires
Saleh <i>et al.</i> [52]	Grille rectiligne 3D dans l'espace exact	En variant un dispositif de 8 capteurs, grille 2D au sol	Réseau de neurone	N/A	N/A	non
Ikits <i>et al.</i> [51]	Grille rectiligne 3D dans l'espace exact	Matériel NDI Optotrack	Forme polynomiale d'ordre 4	Forme polynomiale d'ordre 4	quaternions	non

Suite annexe 2 :

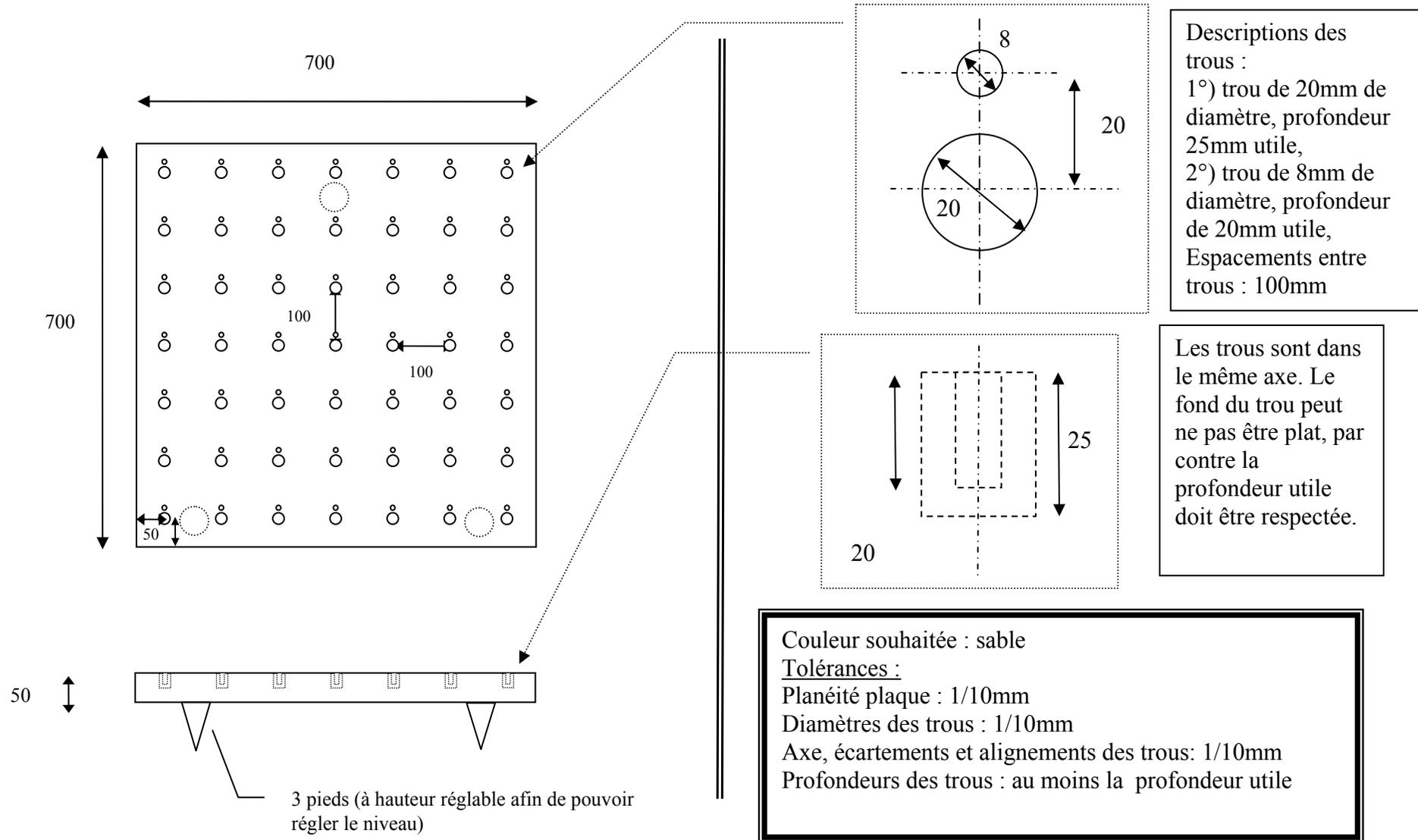
Tableau 2 : Synthèse des techniques d'interpolation analysées sur l'étalonnage de traqueur

Technique	Qualité globale de la correction d'erreur de position	Qualité globale de la correction d'erreur d'orientation	Principaux avantages	Principaux inconvénients
Interpolation tri-linéaire	Moyenne	N/A		- limitations topologiques - discontinuité du gradient
Fonction à forme tétraédrique	Moyenne	N/A	- une grille non structurée peut être employée	- discontinuité du gradient
Interpolation locale	Moyenne	Moyenne		- limitations topologiques - discontinuité du gradient
Forme polynomiale d'ordre élevé	La meilleure	La meilleure	- une cartographie continue et lisse - une grille non structurée peut être employée	- augmentation occasionnelle de la valeur d'erreur quand l'erreur initiale est petite
Réseau de neurone	Bonne	N/A	- une cartographie continue et lisse - une grille non structurée peut être employée	- les paramètres du réseau ne sont pas bien définis - la maîtrise du temps consommé est nécessaire
Interpolation multi-quadratique d'Hardy	La meilleure	La meilleure	- une cartographie continue et lisse - une grille non structurée peut être employée	

### Annexe 3 : Outils d'étalonnage statique

(mm)

Dessin hors échelle, cote en mm, plaque en matière amagnétique de 700x700x50, usinée de 2x49 trous de diamètres différents.

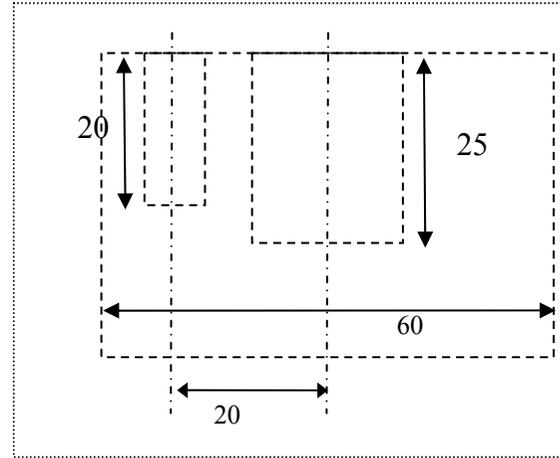
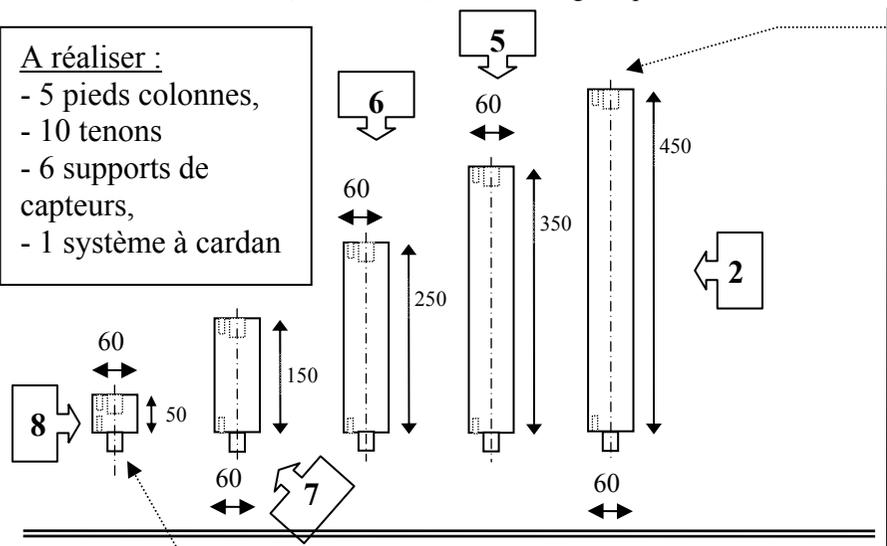


Dessin hors échelle, cote en mm, matière amagnétique

(mm)

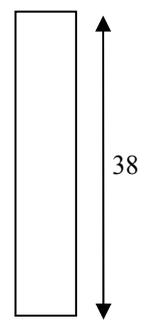
**A réaliser :**

- 5 pieds colonnes,
- 10 tenons
- 6 supports de capteurs,
- 1 système à cardan

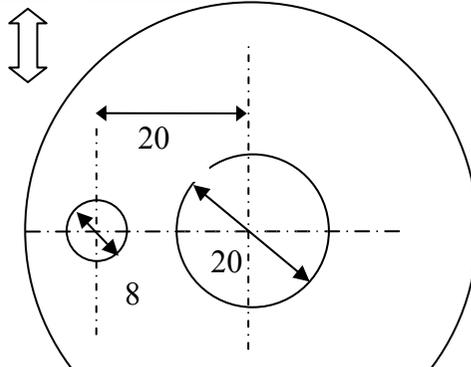
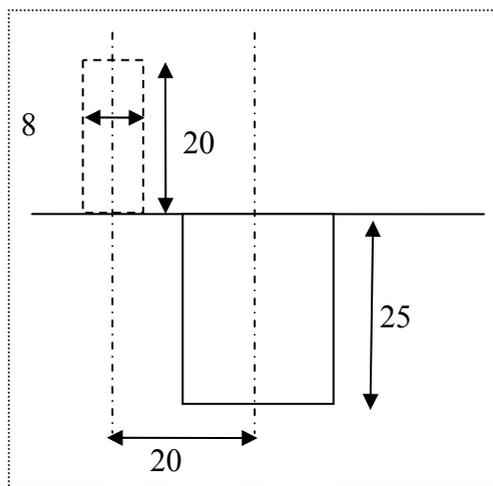


Descriptions des trous :  
 1°) trou de 20mm de diamètre, profondeur 25mm utile,  
 2°) trou de 8mm de diamètre, profondeur de 20mm utile,

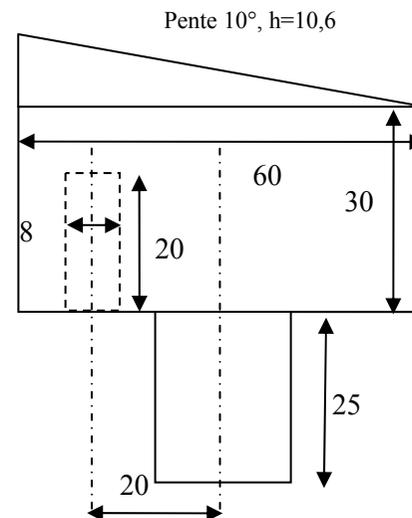
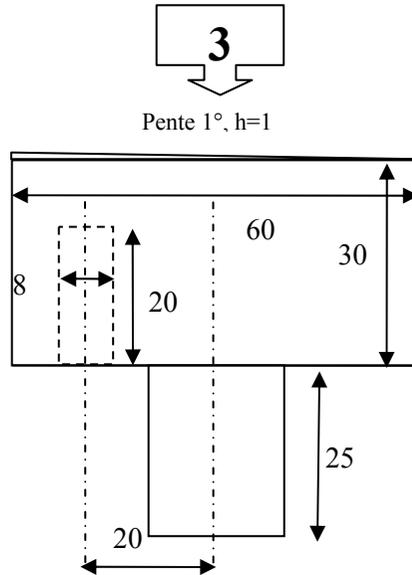
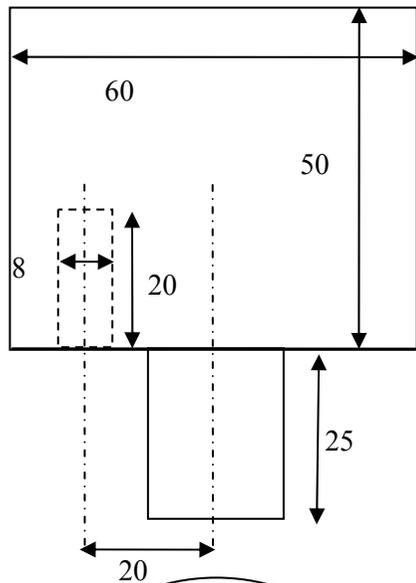
Les trous sont dans le même axe. Le fond du trou peut ne pas être plat, par contre la profondeur utile doit être respectée. Les trous haut et bas ne sont pas dans le même axe.



tenon



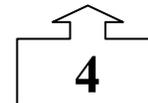
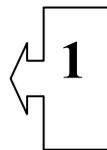
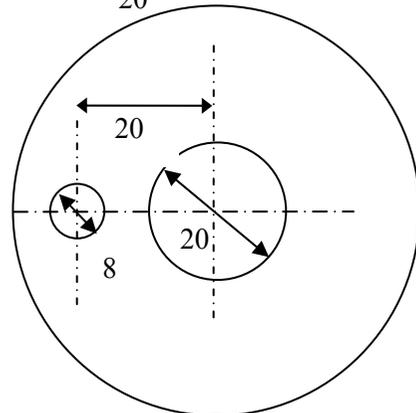
Couleur souhaitée : sable  
Tolérances :  
 Diamètres des trous : 1/10mm  
 Axe, écartements des trous: 1/10mm  
 Longueur tétons : pas plus 25  
 Profondeurs des trous : pas moins de la profondeur utile



Descriptions des trous :  
trou de 8mm de diamètre,  
profondeur de 20mm utile,

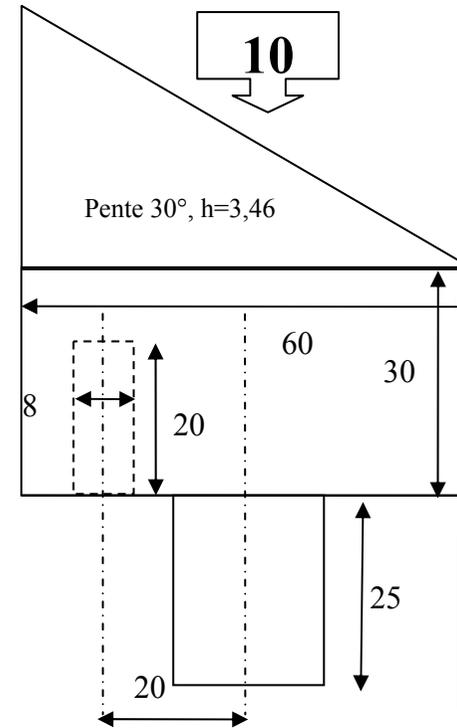
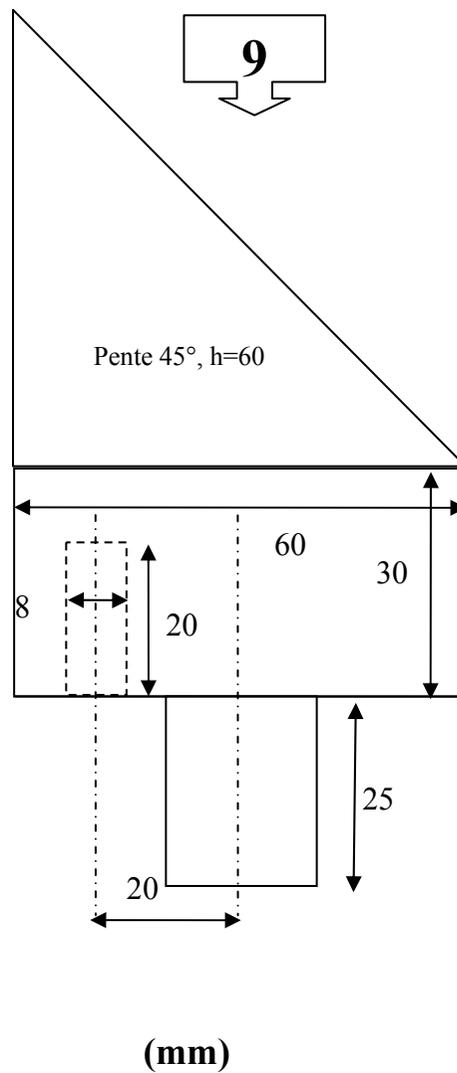
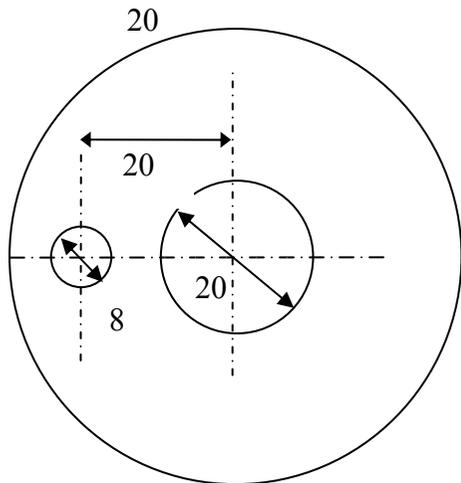
Les trous sont dans le  
même axe. Le fond du  
trou peut ne pas être  
plat, par contre la  
profondeur utile doit

Marquer le centre  
supérieur des pièces,  
perpendiculairement à la  
surface



Couleur souhaitée : sable  
Tolérances :  
Diamètres des trous : 1/10mm  
Axe, écartements des trous: 1/10mm  
Longueur tétons : pas plus 25  
Profondeurs des trous : pas moins de la profondeur utile

(mm)

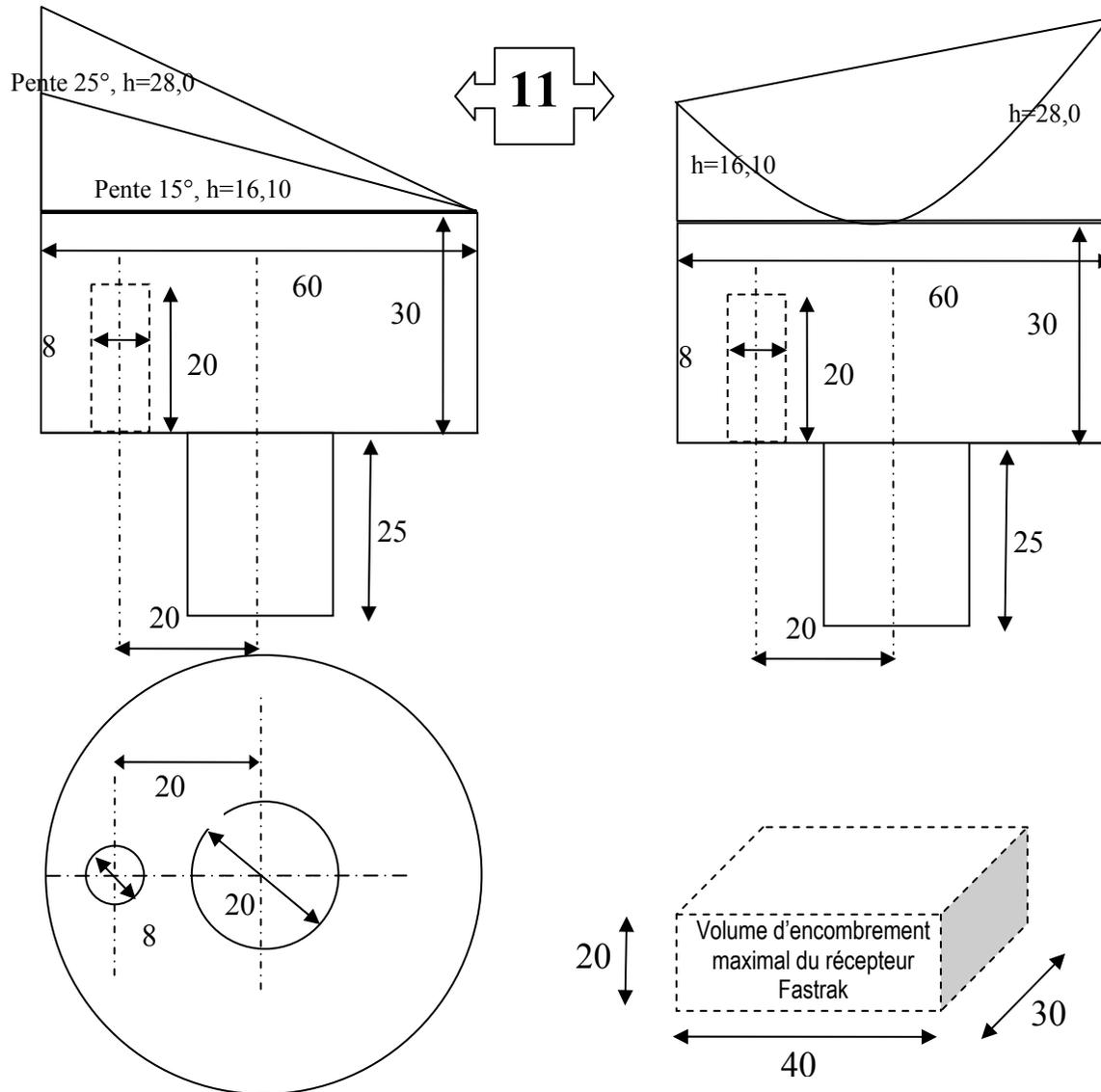


Descriptions des trous :  
trou de 8mm de  
diamètre, profondeur de  
20mm utile,

Les trous sont dans  
le même axe. Le  
fond du trou peut  
ne pas être plat, par  
contre la  
profondeur utile  
doit être respectée.

Marquer le centre  
supérieur des pièces,  
perpendiculairement à la  
surface

Couleur souhaitée : sable  
Tolérances :  
Diamètres des trous : 1/10mm  
Axe, écartements des trous: 1/10mm  
Longueur tétons : pas plus 25  
Profondeurs des trous : pas moins de la profondeur utile  
Angle : 2/10mm sur h  
Cote 30 non obligatoire



(mm)

Descriptions des trous :  
trou de 8mm de diamètre,  
profondeur de 20mm utile,

Les trous sont dans le  
même axe. Le fond du trou  
peut ne pas être plat, par  
contre la profondeur utile  
doit être respectée.

Marquer le centre  
supérieur des pièces,  
perpendiculairement à la  
surface

Couleur souhaitée : sable  
Tolérances :  
Diamètres des trous : 1/10mm  
Axe, écartements des trous: 1/10mm  
Longueur tétons : pas plus 25  
Profondeurs des trous : pas moins de la profondeur utile  
Angle : 5/10mm sur h

---

## Orienteur à suspension de cardan

### Cahier des charges :

Système à cardan à blocage ou prévoir un système à vernier amagnétique.

Avantage du système à cardan : si les centres coïncident, on joue uniquement sur les 3 angles.

Inconvénients : le câble réduit les rotations possibles. Prévoir le blocage obligatoire des cardans à cause de la rigidité du fil du capteur.

Systèmes à vernier : on ne peut jouer que sur 1 angle sinon une translation inconnue s'ajoute.

Constitution du système à cardan : 3 cadres emboîtés les uns dans les autres avec des axes de rotation perpendiculaires entre eux.

1. cadre extérieur : azimuth ou gisement 0 à 360°
2. cadre du milieu : roulis  $\pm 90^\circ$
3. cadre intérieur (support capteur) : élévation  $\pm 90^\circ$

Matériau : PVC type industriel

### Décisions prises :

-choix de cadre fermé plutôt qu'ouvert pour améliorer la rigidité de l'ensemble.

-utilisation de rapporteur circulaire et non de demi-disque afin de permettre si possible une double lecture de l'orientation.

- Utilisation du même support capteur que celui de la table (carré de 35x35x6 mm). Cela implique d'avoir un plan solidaire au cadre à 7,95+6 (mm) soit 13,95 mm en dessous du centre du cadre.

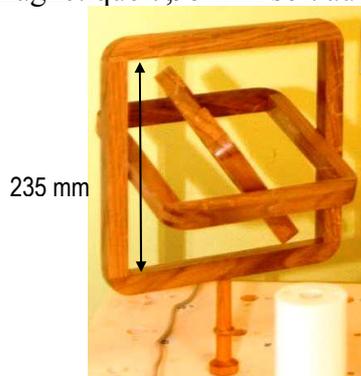
- Hauteur du centre électromagnétique : 7,95mm

- Les cadres doivent être emboîtés les uns dans les autres et de forme carré souhaitée mais finalement une forme rectangulaire des cadres s'impose à cause de la hauteur des rapporteurs et des volume de rotation des cadres. Cela impose que le cadre extérieur offre une hauteur minimale correspondant à  $\sqrt{2}$  multipliée par la dimension externe du cadre intérieur le plus petit ou de préférence biseauter. A cause du rapporteur qui ne peut être biseauté, il faut donc  $150 \times \sqrt{2}$  soit 212 mm de distance interne du cadre extérieur. En prenant une marge de sécurité et en tenant compte du coin, la hauteur interne du cadre est fixée à 236mm. Dans ce cas pas besoin de biseau. Il faut vérifier que la diagonale des cadres emboîtés passe dans le cadre extérieur.

- Si possible doubler symétriquement les points de lecture.

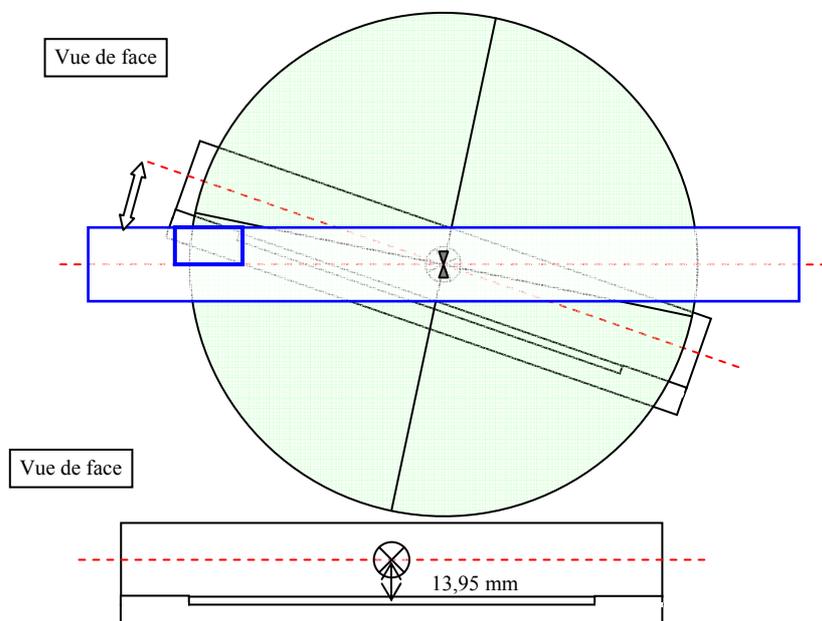
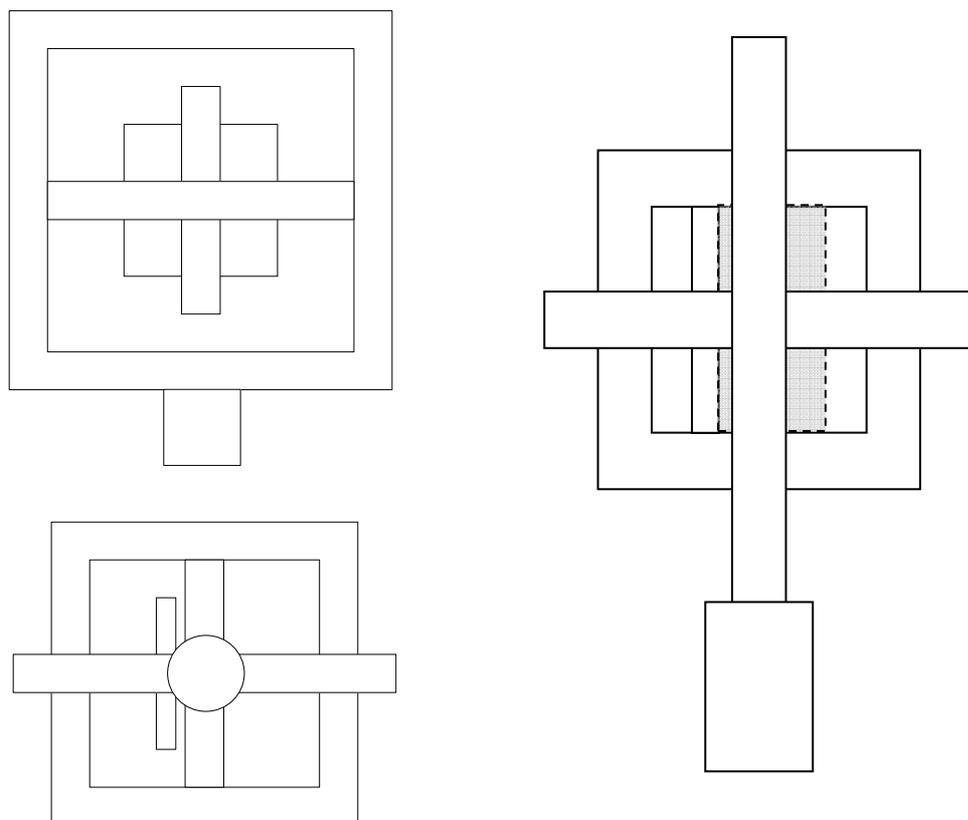
### Valeurs figées :

- Diamètre des rapporteurs : 150 mm
- Dimension support capteur : 35x35 mm
- Hauteur de la plaque support 6 mm, hauteur du centre électromagnétique 7,95 mm soit au total 13,95 mm.



Ebauche réalisée en bois pour tester la faisabilité de l'orientateur conçu avec le récepteur et son câble

Vue de face, vue de dessous et vue d'ensemble hors échelle :



## Annexe 4 : Caractéristiques du système d'étalonnage

Caractéristiques de l'échiquier, valeur en mm, répétabilité  $\pm 0,017$ mm

position n°	X	X mesuré	Ecart	Y	Y mesuré	Ecart	Z	Z mesuré	Ecart	Ecart global
0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
1	0	0,07	0,07	100	100,02	0,02	0	0,04	0,04	0,086
2	0	0,07	0,07	200	200,05	0,05	0	-0,03	-0,03	0,089
3	0	0,11	0,11	300	300,07	0,07	0	-0,08	-0,08	0,150
4	0	0,14	0,14	400	400,06	0,06	0	-0,09	-0,09	0,181
5	0	0,17	0,17	500	500,04	0,04	0	-0,07	-0,07	0,187
6	0	0,16	0,16	600	600,05	0,05	0	-0,03	-0,03	0,168
7	100	99,91	-0,09	0	-0,02	-0,02	0	0,02	0,02	0,089
8	100	99,94	-0,06	100	100,02	0,02	0	-0,06	-0,06	0,089
9	100	99,98	-0,02	200	200,02	0,02	0	-0,11	-0,11	0,113
10	100	100,00	0,00	300	300,03	0,03	0	-0,14	-0,14	0,140
11	100	100,10	0,10	400	400,04	0,04	0	-0,15	-0,15	0,186
12	100	100,13	0,13	500	500,03	0,03	0	-0,14	-0,14	0,191
13	100	100,17	0,17	600	600,02	0,02	0	-0,12	-0,12	0,205
14	200	199,93	-0,07	0	-0,01	-0,01	0	-0,06	-0,06	0,088
15	200	199,97	-0,03	100	100,02	0,02	0	-0,10	-0,10	0,110
16	200	200,02	0,02	200	200,02	0,02	0	-0,14	-0,14	0,144
17	200	200,06	0,06	300	300,02	0,02	0	-0,17	-0,17	0,176
18	200	200,09	0,09	400	400,01	0,01	0	-0,17	-0,17	0,198
19	200	200,13	0,13	500	500,02	0,02	0	-0,17	-0,17	0,212
20	200	200,14	0,14	600	600,03	0,03	0	-0,16	-0,16	0,217
21	300	299,96	-0,04	0	0,02	0,02	0	-0,06	-0,06	0,079
22	300	299,99	-0,01	100	100,03	0,03	0	-0,11	-0,11	0,119
23	300	300,02	0,02	200	200,03	0,03	0	-0,15	-0,15	0,156
24	300	300,05	0,05	300	300,03	0,03	0	-0,17	-0,17	0,182
25	300	300,09	0,09	400	400,02	0,02	0	-0,18	-0,18	0,196
26	300	300,11	0,11	500	500,01	0,01	0	-0,18	-0,18	0,207
27	300	300,13	0,13	600	600,03	0,03	0	-0,17	-0,17	0,217
28	400	399,96	-0,04	0	0,01	0,01	0	-0,08	-0,08	0,089
29	400	400,01	0,01	100	100,00	0,00	0	-0,12	-0,12	0,119
30	400	400,05	0,05	200	200,00	0,00	0	-0,15	-0,15	0,160
31	400	400,09	0,09	300	300,01	0,01	0	-0,16	-0,16	0,184
32	400	400,12	0,12	400	400,00	0,00	0	-0,15	-0,15	0,194
33	400	400,15	0,15	500	500,01	0,01	0	-0,16	-0,16	0,215
34	400	400,11	0,11	600	600,01	0,01	0	-0,15	-0,15	0,182
35	500	499,97	-0,03	0	0,02	0,02	0	-0,05	-0,05	0,058
36	500	500,02	0,02	100	99,99	-0,01	0	-0,08	-0,08	0,081
37	500	500,05	0,05	200	199,98	-0,02	0	-0,11	-0,11	0,120
38	500	500,10	0,10	300	300,00	0,00	0	-0,12	-0,12	0,157
39	500	500,12	0,12	400	400,00	0,00	0	-0,13	-0,13	0,177
40	500	500,15	0,15	500	500,00	0,00	0	-0,13	-0,13	0,195
41	500	500,12	0,12	600	599,99	-0,01	0	-0,13	-0,13	0,178
42	600	599,99	-0,01	0	-0,01	-0,01	0	0,02	0,02	0,026
43	600	600,05	0,05	100	99,96	-0,04	0	-0,01	-0,01	0,060
44	600	600,07	0,07	200	199,96	-0,04	0	-0,04	-0,04	0,090
45	600	600,11	0,11	300	299,96	-0,04	0	-0,06	-0,06	0,135
46	600	600,15	0,15	400	399,96	-0,04	0	-0,06	-0,06	0,165
47	600	600,18	0,18	500	499,98	-0,02	0	-0,05	-0,05	0,190
48	600	600,15	0,15	600	599,98	-0,02	0	-0,05	-0,05	0,155



Case de couleur verte pour  $|\text{Ecart global}| < 0,1$  mm

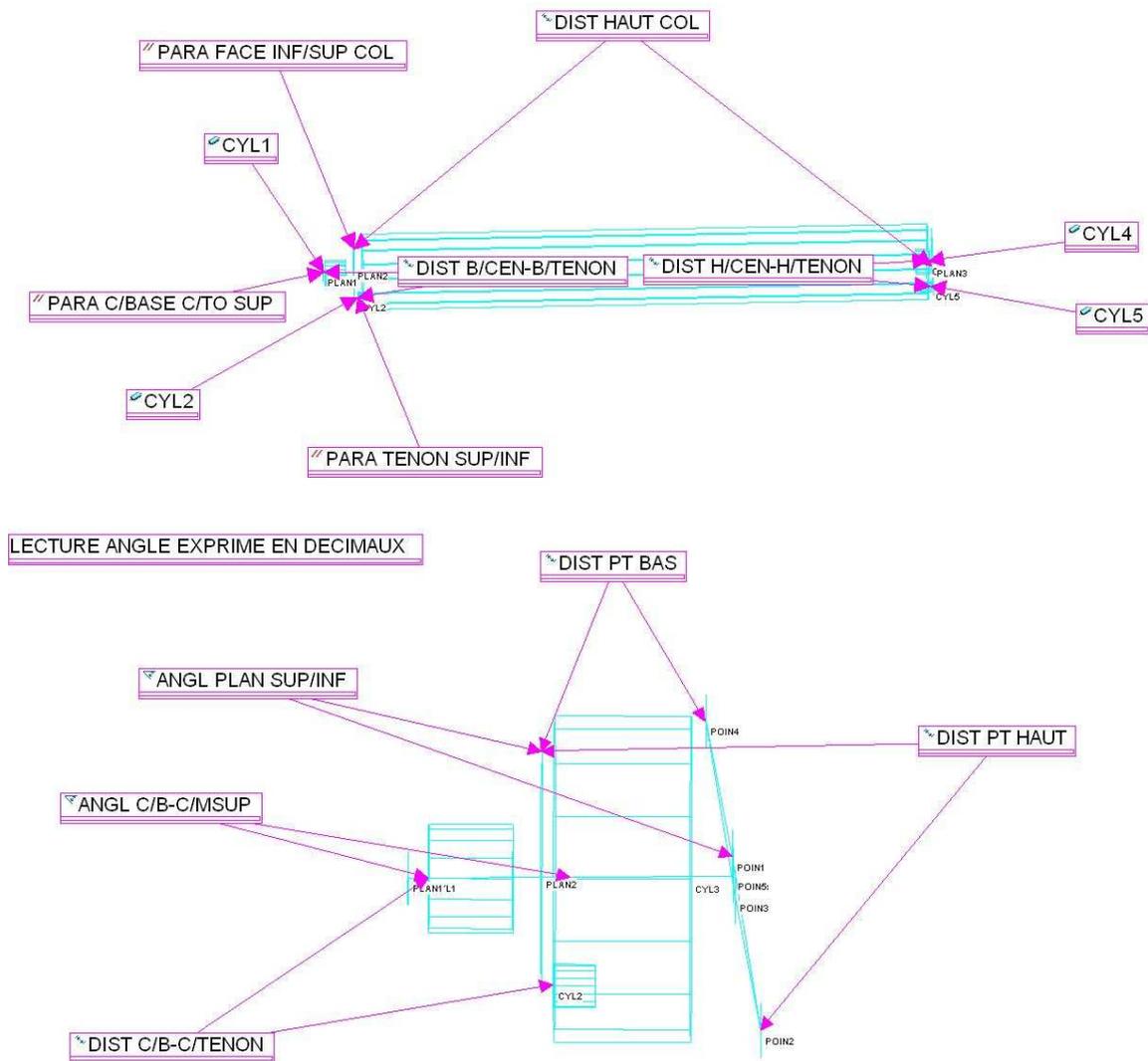


Case de couleur blanche pour  $0,1 \text{ mm} \leq |\text{Ecart global}| \leq 0,2$  mm



Case de couleur rouge pour  $|\text{Ecart global}| > 0,2$  mm

## Caractérisation des colonnes et des supports



### Pente 1°

Type Elt.	Nom Elt.	Cote	Mesuré	Nominal	Ecart	Tol-	Tol+
Distance	DIST PT HAUT	D1	30,98	31	-0,02	-0,2	0,2
Distance	DIST PT BAS	D1	29,899	30	-0,101	-0,2	0,2
Angle	ANGL PLAN SUP/II ESP		1,074	1,074	0,074	-0,2	0,2
Angle	ANGL C/B-C/MSUP ESP		0,325	0,325	0	-0,2	0,2
Distance	DIST C/B-C/TENON D1		19,864	20	-0,136	-0,2	0,2

### Pente 10°

Type Elt.	Nom Elt.	Cote	Mesuré	Nominal	Ecart	Tol-	Tol+
Distance	DIST PT HAUT	D1	40,415	40,6	-0,185	-0,2	0,2
Distance	DIST PT BAS	D1	30,186	30	0,186	-0,2	0,2
Angle	ANGL PLAN SUP/II ESP		10,107	10	0,107	-0,2	0,2
Angle	ANGL C/B-C/MSUP ESP		0,678	0,678	0	-0,2	0,2
Distance	DIST C/B-C/TENON D1		19,873	20	-0,127	-0,2	0,2

### Support de capteur

Type Elt.	Nom Elt.	Cote	Mesuré	Nominal	Ecart	Tol-	Tol+
Distance	DIST PT HAUT	D1	49,911	50	-0,089	-0.200	0.200
Distance	DIST PT BAS	D1	49,932	50	-0,068	-0.200	0.200
Angle	ANGL PLAN SUP/INF	ESP	0,055	0,055	0	-0.200	0.200
Angle	ANGL C/B-C/MSUP	ESP	0,226	0,226	0	-0.200	0.200
Distance	DIST C/B-C/TENON	D1	19,904	20	-0,096	-0.200	0.200

### Colonne N°2

Type Elt.	Nom Elt.	Cote	Mesuré	Nominal	Ecart	Tol-	Tol+
Cylindre	CYL1	DIAM	19,933	20	-0,067	-0,1	0,1
Cylindre	CYL2	DIAM	8,049	8	0,049	-0,1	0,1
Cylindre	CYL4	DIAM	19,999	20	-0,001	-0,1	0,1
Cylindre	CYL5	DIAM	8,038	8	0,038	-0,1	0,1
Distance	DIST HAUT COL	D1	449,965	450	-0,035	-0,2	0,2
Parallél.	PARA FACE INF/SUP COL	PARA	0,069	0	0,069	0	0,1
Parallél.	PARA C/BASE C/TO SUP	PARA	0,056	0	0,056	0	0,1
Parallél.	PARA TENON SUP/INF	PARA	0,022	0	0,022	0	0,1
Distance	DIST B/CEN-B/TENON	D1	19,915	20	-0,085	-0,2	0,2
Distance	DIST H/CEN-H/TENON	D1	19,942	20	-0,058	-0,2	0,2

### Colonne n°5

Type Elt.	Nom Elt.	Cote	Mesuré	Nominal	Ecart	Tol-	Tol+
Cylindre	CYL1	DIAM	19,901	20	-0,099	-0,1	0,1
Cylindre	CYL2	DIAM	7,968	8	-0,032	-0,1	0,1
Cylindre	CYL4	DIAM	19,985	20	-0,015	-0,1	0,1
Cylindre	CYL5	DIAM	7,944	8	-0,056	-0,1	0,1
Distance	DIST HAUT COL	D1	350,05	350	0,05	-0,2	0,2
Parallél.	PARA FACE INF/SUP COL	PARA	0,033	0	0,033	0	0,1
Parallél.	PARA C/BASE C/TO SUP	PARA	0,012	0	0,012	0	0,1
Parallél.	PARA TENON SUP/INF	PARA	0,028	0	0,028	0	0,1
Distance	DIST B/CEN-B/TENON	D1	20,032	20	0,032	-0,2	0,2
Distance	DIST H/CEN-H/TENON	D1	20,018	20	0,018	-0,2	0,2

### Colonne n°6

Type Elt.	Nom Elt.	Cote	Mesuré	Nominal	Ecart	Tol-	Tol+
Cylindre	CYL1	DIAM	19,937	20	-0,063	-0,1	0,1
Cylindre	CYL2	DIAM	7,966	8	-0,034	-0,1	0,1
Cylindre	CYL4	DIAM	19,997	20	-0,003	-0,1	0,1
Cylindre	CYL5	DIAM	7,965	8	-0,035	-0,1	0,1
Distance	DIST HAUT COL	D1	250,053	250	0,053	-0,2	0,2
Parallél.	PARA FACE INF/SUP COL	PARA	0,051	0	0,051	0	0,1
Parallél.	PARA C/BASE C/TO SUP	PARA	0,012	0	0,012	0	0,1
Parallél.	PARA TENON SUP/INF	PARA	0,013	0	0,013	0	0,1
Distance	DIST B/CEN-B/TENON	D1	20,031	20	0,031	-0,2	0,2
Distance	DIST H/CEN-H/TENON	D1	20,099	20	0,099	-0,2	0,2

### Colonne n°7

Type Elt.	Nom Elt.	Cote	Mesuré	Nominal	Ecart	Tol-	Tol+
Cylindre	CYL1	DIAM	19,949	20	-0,051	-0,1	0,1
Cylindre	CYL2	DIAM	7,949	8	-0,051	-0,1	0,1
Cylindre	CYL4	DIAM	20,001	20	0,001	-0,1	0,1
Cylindre	CYL5	DIAM	7,998	8	-0,002	-0,1	0,1
Distance	DIST HAUT COL	D1	150,008	150	0,008	-0,2	0,2
Parallél.	PARA FACE INF/SUP COL	PARA	0,063	0	0,063	0	0,1
Parallél.	PARA C/BASE C/TO SUP	PARA	0,057	0	0,057	0	0,1
Parallél.	PARA TENON SUP/INF	PARA	0,02	0	0,02	0	0,1
Distance	DIST B/CEN-B/TENON	D1	19,896	20	-0,104	-0,2	0,2
Distance	DIST H/CEN-H/TENON	D1	20,077	20	0,077	-0,2	0,2

### Colonne n°8

Type Elt.	Nom Elt.	Cote	Mesuré	Nominal	Ecart	Tol-	Tol+
Cylindre	CYL1	DIAM	19,958	20	-0,042	-0,1	0,1
Cylindre	CYL2	DIAM	7,971	8	-0,029	-0,1	0,1
Cylindre	CYL4	DIAM	19,992	20	-0,008	-0,1	0,1
Cylindre	CYL5	DIAM	7,976	8	-0,024	-0,1	0,1
Distance	DIST HAUT COL	D1	49,977	50	-0,023	-0,2	0,2
Parallél.	PARA FACE INF/SUP COL	PARA	0,042	0	0,042	0	0,1
Parallél.	PARA C/BASE C/TO SUP	PARA	0,043	0	0,043	0	0,1
Parallél.	PARA TENON SUP/INF	PARA	0,016	0	0,016	0	0,1
Distance	DIST B/CEN-B/TENON	D1	20,044	20	0,044	-0,2	0,2
Distance	DIST H/CEN-H/TENON	D1	20,079	20	0,079	-0,2	0,2

Extrait de la caractérisation de l'orientateur

Type Elt,	Nom Elt,	Cote	Mesuré	Nominal	Ecart	Tol-	Tol+
					max	0,47	
					min	-0,39	
	Unité en degré				moyenne	0,06	
					écart-type	0,16	
<b>Distance</b>	<b>DISTANCE 13,95</b>	<b>D1</b>	<b>13,95</b>	<b>13,95</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,05</b>
Angle	AZIMUT G N°2	XoY	9,81	10,00	-0,19	-0,5	0,5
Angle	AZIMUT G N°3	XoY	20,30	20,00	0,30	-0,5	0,5
Angle	AZIMUT G N°4	XoY	39,92	40,00	-0,08	-0,5	0,5
Angle	AZIMUT G N°5	XoY	59,97	60,00	-0,03	-0,5	0,5
Angle	AZIMUT G N°6	XoY	80,02	80,00	0,02	-0,5	0,5
Angle	AZIMUT G N°7	XoY	90,13	90,00	0,13	-0,5	0,5
Angle	AZIMUT G N°8	XoY	-90,11	-90,00	-0,11	-0,5	0,5
Angle	AZIMUT G N°9	XoY	-80,36	-80,00	-0,36	-0,5	0,5
Angle	AZIMUT G N°10	XoY	-60,29	-60,00	-0,29	-0,5	0,5
Angle	AZIMUT G N°11	XoY	-40,20	-40,00	-0,20	-0,5	0,5
Angle	AZIMUT G N°12	XoY	-20,16	-20,00	-0,16	-0,5	0,5
Angle	AZIMUT G N°13	XoY	-10,14	-10,00	-0,14	-0,5	0,5
Angle	AZIMUT G N°14	XoY	0,90	1,00	-0,10	-0,5	0,5
Angle	AZIMUT G N°15	XoY	1,95	2,00	-0,05	-0,5	0,5
Angle	AZIMUT G N°16	XoY	-0,16	0,00	-0,16	-0,5	0,5
<b>Angle</b>	<b>ELEVATION P N°16</b>	<b>ZoX</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,5</b>	<b>0,5</b>
Angle	ROULIS M N°16	YoZ	0,00	0,00	0,00	-0,5	0,5
Angle	ROULIS M N°17	YoZ	10,14	10,00	0,14	-0,5	0,5
Angle	ROULIS M N°18	YoZ	20,17	20,00	0,17	-0,5	0,5
Angle	ROULIS M N°19	YoZ	40,33	40,00	0,33	-0,5	0,5
Angle	ROULIS M N°20	YoZ	60,27	60,00	0,27	-0,5	0,5
Angle	ROULIS M N°21	YoZ	-59,96	-60,00	0,04	-0,5	0,5
Angle	ROULIS M N°22	YoZ	-49,95	-50,00	0,05	-0,5	0,5
Angle	ROULIS M N°23	YoZ	-39,99	-40,00	0,01	-0,5	0,5
Angle	ROULIS M N°24	YoZ	-19,90	-20,00	0,10	-0,5	0,5
Angle	ROULIS M N°25	YoZ	-9,72	-10,00	0,28	-0,5	0,5
Angle	ROULIS M N°26	YoZ	1,31	1,00	0,31	-0,5	0,5
Angle	ROULIS M N°27	YoZ	2,32	2,00	0,32	-0,5	0,5
Angle	ROULIS M N°28	YoZ	90,32	90,00	0,32	-0,5	0,5
<b>Angle</b>	<b>ROULIS M N°29</b>	<b>YoZ</b>	<b>0,10</b>	<b>0,00</b>	<b>0,10</b>	<b>-0,5</b>	<b>0,5</b>
Angle	AZIMUT G N°29	XoY	0,16	0,00	0,16	-0,5	0,5
Angle	ELEVATION P N°29	ZoX	0,01	0,00	0,01	-0,5	0,5
Angle	ELEVATION P N°30	ZoX	10,00	10,00	0,00	-0,5	0,5
Angle	ELEVATION P N°31	ZoX	19,99	20,00	-0,01	-0,5	0,5
Angle	ELEVATION P N°32	ZoX	40,08	40,00	0,08	-0,5	0,5
Angle	ELEVATION P N°33	ZoX	59,61	60,00	-0,39	-0,5	0,5
Angle	ELEVATION P N°34	ZoX	80,19	80,00	0,19	-0,5	0,5
Angle	ELEVATION P N°35	ZoX	-60,09	-60,00	-0,09	-0,5	0,5
Angle	ELEVATION P N°36	ZoX	-49,99	-50,00	0,01	-0,5	0,5
Angle	ELEVATION P N°37	ZoX	-39,97	-40,00	0,03	-0,5	0,5
Angle	ELEVATION P N°38	ZoX	-20,09	-20,00	-0,09	-0,5	0,5
Angle	ELEVATION P N°39	ZoX	-10,20	-10,00	-0,20	-0,5	0,5
Angle	ELEVATION P N°40	ZoX	1,04	1,00	0,04	-0,5	0,5
Angle	ELEVATION P N°41	ZoX	2,07	2,00	0,07	-0,5	0,5
Angle	ELEVATION P N°42	ZoX	90,16	90,00	0,16	-0,5	0,5
Angle	ELEVATION P N°43	ESP	39,90	40,00	-0,10	-0,5	0,5
Angle	ROULIS M N°43	ESP	40,08	40,00	0,08	-0,5	0,5
Angle	AZIMUT G N°43	XoY	39,89	40,00	-0,11	-0,5	0,5
Angle	ELEVATION P N°44	ESP	80,02	80,00	0,02	-0,5	0,5
Angle	ELEVATION P N°45	ESP	60,16	60,00	0,16	-0,5	0,5

## Annexe 5 : Tableau des 294 points de référence

Caractéristiques du système d'étalonnage de position statique										
Position n°	X nominal (repère centré)	Y nominal (repère centré)	Z nominal (repère centré)	Ecart X	Ecart Y	Ecart Z	Ecart global	X référence	Y référence	Z référence
0	-300	-300	50	0,20	0,15	-0,26	0,36	-299,72	-299,79	49,74
1	-300	-200	50	0,18	0,17	-0,31	0,40	-299,74	-199,77	49,69
2	-300	-100	50	0,16	0,27	-0,24	0,39	-299,76	-99,67	49,76
3	-300	0	50	0,14	0,19	-0,23	0,33	-299,78	0,25	49,78
4	-300	100	50	0,12	0,05	-0,21	0,25	-299,80	100,11	49,79
5	-300	200	50	0,12	0,16	-0,32	0,38	-299,80	200,22	49,68
6	-300	300	50	0,11	0,24	-0,25	0,36	-299,82	300,30	49,75
7	-200	-300	50	0,27	0,25	-0,26	0,45	-199,65	-299,69	49,75
8	-200	-200	50	0,25	0,07	-0,34	0,43	-199,67	-199,87	49,66
9	-200	-100	50	0,23	0,03	-0,39	0,45	-199,69	-99,91	49,61
10	-200	0	50	0,21	0,20	-0,36	0,46	-199,71	0,26	49,64
11	-200	100	50	0,19	0,05	-0,40	0,44	-199,73	100,11	49,60
12	-200	200	50	0,17	0,25	-0,38	0,49	-199,75	200,32	49,62
13	-200	300	50	0,16	0,03	-0,34	0,37	-199,77	300,09	49,66
14	-100	-300	50	0,01	0,05	-0,34	0,35	-99,91	-299,89	49,66
15	-100	-200	50	-0,01	0,29	-0,37	0,47	-99,93	-199,65	49,63
16	-100	-100	50	-0,03	0,06	-0,42	0,43	-99,95	-99,88	49,58
17	-100	0	50	-0,05	0,25	-0,36	0,44	-99,97	0,31	49,64
18	-100	100	50	-0,07	0,24	-0,45	0,51	-99,99	100,30	49,56
19	-100	200	50	-0,09	0,00	-0,41	0,42	-100,01	200,06	49,59
20	-100	300	50	-0,10	0,19	-0,39	0,44	-100,03	300,25	49,61
21	0	-300	50	-0,02	-0,05	-0,37	0,37	0,06	-299,98	49,63
22	0	-200	50	-0,04	0,03	-0,41	0,41	0,04	-199,90	49,60
23	0	-100	50	-0,06	0,06	-0,43	0,44	0,02	-99,87	49,57
24	0	0	50	-0,08	-0,06	-0,44	0,45	0,00	0,00	49,56
25	0	100	50	-0,10	0,13	-0,43	0,46	-0,02	100,20	49,57
26	0	200	50	-0,12	-0,01	-0,42	0,43	-0,04	200,05	49,58
27	0	300	50	-0,13	-0,04	-0,39	0,42	-0,06	300,02	49,61
28	100	-300	50	0,10	-0,07	-0,34	0,36	100,18	-300,00	49,66
29	100	-200	50	0,08	0,00	-0,35	0,36	100,16	-199,93	49,65
30	100	-100	50	0,06	-0,04	-0,42	0,42	100,14	-99,97	49,58
31	100	0	50	0,04	0,01	-0,40	0,41	100,12	0,08	49,60
32	100	100	50	0,02	0,08	-0,36	0,37	100,10	100,15	49,64
33	100	200	50	0,00	-0,02	-0,40	0,40	100,08	200,05	49,61
34	100	300	50	-0,01	-0,01	-0,35	0,35	100,06	300,06	49,65
35	200	-300	50	0,08	0,08	-0,26	0,29	200,16	-299,85	49,74
36	200	-200	50	0,06	-0,03	-0,30	0,31	200,14	-199,96	49,70
37	200	-100	50	0,04	-0,01	-0,34	0,34	200,12	-99,94	49,67
38	200	0	50	0,02	0,00	-0,30	0,30	200,10	0,07	49,70
39	200	100	50	0,00	0,04	-0,35	0,35	200,08	100,11	49,65
40	200	200	50	-0,02	0,08	-0,31	0,32	200,06	200,15	49,69
41	200	300	50	-0,04	-0,06	-0,31	0,32	200,04	300,01	49,69
42	300	-300	50	0,08	0,00	-0,15	0,17	300,16	-299,93	49,85
43	300	-200	50	0,06	0,00	-0,22	0,23	300,13	-199,93	49,78
44	300	-100	50	0,04	0,04	-0,25	0,25	300,12	-99,89	49,75
45	300	0	50	0,02	-0,03	-0,23	0,23	300,10	0,04	49,77
46	300	100	50	0,00	0,05	-0,10	0,11	300,08	100,12	49,90
47	300	200	50	-0,02	-0,05	-0,08	0,10	300,06	200,02	49,92
48	300	300	50	-0,04	0,08	-0,17	0,19	300,04	300,15	49,83

Toutes dimensions en millimètre

(mm)

49	-300	-300	100	0,01	0,43	-0,26	0,50	-299,91	-299,51	99,74
50	-300	-200	100	-0,01	0,32	-0,31	0,44	-299,93	-199,62	99,69
51	-300	-100	100	-0,03	0,40	-0,24	0,47	-299,95	-99,54	99,76
52	-300	0	100	-0,04	0,22	-0,17	0,28	-299,97	0,29	99,83
53	-300	100	100	-0,06	0,23	-0,21	0,32	-299,99	100,30	99,79
54	-300	200	100	-0,08	0,11	-0,36	0,39	-300,00	200,18	99,64
55	-300	300	100	-0,10	0,21	-0,23	0,33	-300,02	300,28	99,77
56	-200	-300	100	0,03	0,37	-0,22	0,43	-199,89	-299,57	99,78
57	-200	-200	100	0,01	0,29	-0,39	0,49	-199,91	-199,65	99,61
58	-200	-100	100	0,00	0,19	-0,43	0,47	-199,93	-99,75	99,57
59	-200	0	100	-0,02	0,12	-0,37	0,39	-199,95	0,18	99,63
60	-200	100	100	-0,04	0,16	-0,45	0,48	-199,97	100,22	99,55
61	-200	200	100	-0,06	0,14	-0,43	0,46	-199,98	200,20	99,57
62	-200	300	100	-0,08	0,11	-0,35	0,38	-200,00	300,17	99,65
63	-100	-300	100	0,01	0,30	-0,34	0,45	-99,91	-299,64	99,66
64	-100	-200	100	-0,01	0,36	-0,43	0,56	-99,93	-199,58	99,57
65	-100	-100	100	-0,03	0,16	-0,47	0,49	-99,95	-99,78	99,53
66	-100	0	100	-0,04	0,55	-0,41	0,69	-99,97	0,61	99,59
67	-100	100	100	-0,06	0,28	-0,50	0,58	-99,99	100,34	99,50
68	-100	200	100	-0,08	0,29	-0,48	0,56	-100,00	200,35	99,52
69	-100	300	100	-0,10	0,03	-0,44	0,45	-100,02	300,09	99,56
70	0	-300	100	0,01	0,16	-0,36	0,40	0,09	-299,78	99,64
71	0	-200	100	-0,01	0,07	-0,42	0,42	0,07	-199,87	99,58
72	0	-100	100	-0,02	0,16	-0,50	0,53	0,05	-99,78	99,50
73	0	0	100	-0,04	0,04	-0,48	0,48	0,03	0,10	99,52
74	0	100	100	-0,06	0,07	-0,41	0,42	0,01	100,13	99,59
75	0	200	100	-0,08	0,00	-0,43	0,44	0,00	200,06	99,57
76	0	300	100	-0,10	-0,03	-0,29	0,31	-0,02	300,03	99,71
77	100	-300	100	0,01	0,28	-0,31	0,42	100,09	-299,66	99,69
78	100	-200	100	-0,01	0,10	-0,32	0,33	100,07	-199,84	99,68
79	100	-100	100	-0,02	0,05	-0,34	0,35	100,05	-99,89	99,66
80	100	0	100	-0,04	0,10	-0,40	0,41	100,03	0,16	99,60
81	100	100	100	-0,06	0,10	-0,26	0,29	100,02	100,16	99,74
82	100	200	100	-0,08	0,06	-0,37	0,38	100,00	200,12	99,63
83	100	300	100	-0,10	0,10	-0,35	0,37	99,98	300,16	99,65
84	200	-300	100	0,01	0,00	-0,12	0,12	200,09	-299,94	99,88
85	200	-200	100	-0,01	0,09	-0,29	0,31	200,07	-199,85	99,71
86	200	-100	100	-0,02	0,08	-0,32	0,33	200,05	-99,86	99,68
87	200	0	100	-0,04	0,06	-0,19	0,20	200,03	0,12	99,82
88	200	100	100	-0,06	0,10	-0,33	0,35	200,02	100,16	99,67
89	200	200	100	-0,08	0,08	-0,25	0,27	200,00	200,14	99,75
90	200	300	100	-0,10	0,08	-0,31	0,34	199,98	300,14	99,69
91	300	-300	100	0,01	0,04	-0,09	0,10	300,09	-299,90	99,91
92	300	-200	100	0,00	0,05	-0,19	0,20	300,07	-199,89	99,81
93	300	-100	100	-0,04	0,07	-0,01	0,08	300,03	-99,87	99,99
94	300	0	100	-0,04	0,28	-0,02	0,28	300,03	0,34	99,98
95	300	100	100	-0,06	0,02	0,14	0,16	300,02	100,08	100,14
96	300	200	100	-0,08	0,01	0,17	0,19	300,00	200,07	100,17
97	300	300	100	-0,10	0,04	-0,17	0,20	299,98	300,10	99,83

(mm)

Caractéristiques du système d'étalonnage de position statique										
Position n°	X nominal (repère centré)	Y nominal (repère centré)	Z nominal (repère centré)	Ecart X	Ecart Y	Ecart Z	Ecart global	X référence	Y référence	Z référence
98	-300	-300	200	0,03	0,07	-0,30	0,31	-299,89	-299,87	199,70
99	-300	-200	200	0,01	0,10	-0,38	0,39	-299,91	-199,84	199,62
100	-300	-100	200	-0,01	0,08	-0,18	0,20	-299,93	-99,86	199,82
101	-300	0	200	-0,03	0,06	-0,20	0,21	-299,95	0,12	199,80
102	-300	100	200	-0,05	0,05	-0,29	0,29	-299,97	100,11	199,71
103	-300	200	200	-0,07	0,06	-0,43	0,44	-299,99	200,12	199,57
104	-300	300	200	-0,08	0,06	-0,32	0,33	-300,01	300,12	199,68
105	-200	-300	200	0,03	0,43	-0,32	0,53	-199,89	-299,51	199,68
106	-200	-200	200	0,01	0,44	-0,47	0,64	-199,91	-199,50	199,53
107	-200	-100	200	-0,01	0,11	-0,49	0,50	-199,93	-99,83	199,51
108	-200	0	200	-0,03	0,11	-0,47	0,48	-199,95	0,17	199,53
109	-200	100	200	-0,05	0,11	-0,50	0,52	-199,97	100,17	199,50
110	-200	200	200	-0,06	0,11	-0,50	0,51	-199,99	200,17	199,50
111	-200	300	200	-0,08	0,03	-0,40	0,41	-200,01	300,09	199,60
112	-100	-300	200	0,03	0,56	-0,41	0,69	-99,89	-299,38	199,59
113	-100	-200	200	0,01	-0,06	-0,44	0,45	-99,91	-199,99	199,56
114	-100	-100	200	-0,01	-0,06	-0,53	0,53	-99,93	-99,99	199,47
115	-100	0	200	-0,03	0,48	-0,43	0,64	-99,95	0,54	199,57
116	-100	100	200	-0,05	-0,04	-0,55	0,55	-99,97	100,03	199,45
117	-100	200	200	-0,06	-0,04	-0,53	0,53	-99,99	200,03	199,47
118	-100	300	200	-0,08	-0,03	-0,48	0,49	-100,01	300,03	199,52
119	0	-300	200	0,03	-0,02	-0,44	0,45	0,11	-299,95	199,56
120	0	-200	200	0,01	-0,02	-0,48	0,48	0,09	-199,95	199,52
121	0	-100	200	-0,01	-0,02	-0,56	0,57	0,07	-99,95	199,44
122	0	0	200	-0,03	-0,02	-0,53	0,53	0,05	0,05	199,47
123	0	100	200	-0,05	-0,02	-0,48	0,48	0,03	100,05	199,52
124	0	200	200	-0,06	-0,02	-0,51	0,52	0,01	200,05	199,49
125	0	300	200	-0,08	-0,02	-0,48	0,49	-0,01	300,05	199,52
126	100	-300	200	0,03	0,00	-0,41	0,41	100,11	-299,93	199,59
127	100	-200	200	0,01	0,00	-0,38	0,38	100,09	-199,93	199,62
128	100	-100	200	-0,01	0,00	-0,42	0,42	100,07	-99,93	199,58
129	100	0	200	-0,03	-0,04	-0,45	0,45	100,05	0,03	199,55
130	100	100	200	-0,05	-0,04	-0,32	0,33	100,03	100,03	199,68
131	100	200	200	0,33	-0,04	-0,45	0,56	100,41	200,03	199,55
132	100	300	200	-0,08	-0,04	-0,44	0,45	99,99	300,03	199,56
133	200	-300	200	-0,38	-0,02	-0,31	0,49	199,70	-299,95	199,69
134	200	-200	200	-0,40	-0,02	-0,39	0,56	199,68	-199,95	199,61
135	200	-100	200	-0,15	-0,02	-0,39	0,42	199,93	-99,95	199,61
136	200	0	200	0,04	-0,02	-0,26	0,27	200,12	0,05	199,74
137	200	100	200	0,02	-0,02	-0,41	0,41	200,10	100,05	199,59
138	200	200	200	0,25	-0,02	-0,32	0,41	200,33	200,05	199,68
139	200	300	200	-0,14	-0,02	-0,38	0,41	199,93	300,05	199,62
140	300	-300	200	0,00	-0,16	-0,22	0,27	300,08	-300,10	199,79
141	300	-200	200	-0,25	-0,12	-0,30	0,41	299,83	-200,06	199,70
142	300	-100	200	-0,27	-0,12	-0,16	0,33	299,81	-100,06	199,84
143	300	0	200	0,08	-0,12	-0,11	0,18	300,16	-0,06	199,89
144	300	100	200	0,06	-0,12	0,06	0,15	300,14	99,95	200,06
145	300	200	200	0,04	-0,12	0,10	0,16	300,12	199,95	200,10
146	300	300	200	-0,33	-0,15	-0,27	0,45	299,74	299,92	199,73

(mm)

147	-300	-300	300	0,41	0,49	-0,36	0,74	-299,51	-299,44	299,64
148	-300	-200	300	0,17	0,46	-0,39	0,63	-299,75	-199,47	299,61
149	-300	-100	300	0,50	0,92	-0,29	1,09	-299,42	-99,01	299,71
150	-300	0	300	0,31	0,61	-0,26	0,73	-299,61	0,68	299,74
151	-300	100	300	0,85	0,34	-0,23	0,94	-299,07	100,41	299,77
152	-300	200	300	0,29	-0,55	-0,39	0,73	-299,63	199,52	299,61
153	-300	300	300	0,27	-0,55	-0,31	0,68	-299,65	299,52	299,69
154	-200	-300	300	1,04	1,11	-0,29	1,55	-198,89	-298,82	299,71
155	-200	-200	300	0,35	0,02	-0,42	0,54	-199,57	-199,91	299,59
156	-200	-100	300	0,33	-0,26	-0,46	0,62	-199,59	-100,19	299,54
157	-200	0	300	0,04	-0,46	-0,45	0,64	-199,88	-0,39	299,55
158	-200	100	300	0,03	-0,02	-0,46	0,46	-199,89	100,05	299,54
159	-200	200	300	0,01	-0,02	-0,49	0,49	-199,91	200,05	299,51
160	-200	300	300	-0,01	-0,21	-0,40	0,45	-199,93	299,86	299,60
161	-100	-300	300	-0,29	0,36	-0,40	0,61	-100,21	-299,58	299,60
162	-100	-200	300	0,28	0,36	-0,47	0,66	-99,64	-199,58	299,53
163	-100	-100	300	-0,06	0,18	-0,50	0,53	-99,98	-99,76	299,50
164	-100	0	300	-0,45	1,14	-0,36	1,28	-100,37	1,21	299,64
165	-100	100	300	0,16	0,04	-0,50	0,53	-99,76	100,11	299,50
166	-100	200	300	0,51	0,18	-0,46	0,71	-99,41	200,25	299,54
167	-100	300	300	0,49	-0,41	-0,46	0,79	-99,43	299,66	299,54
168	0	-300	300	0,09	-0,39	-0,41	0,58	0,17	-300,33	299,59
169	0	-200	300	0,07	0,01	-0,46	0,46	0,15	-199,93	299,54
170	0	-100	300	0,05	0,01	-0,51	0,52	0,13	-99,93	299,49
171	0	0	300	0,03	-0,25	-0,48	0,54	0,11	-0,19	299,52
172	0	100	300	0,01	-0,25	-0,42	0,49	0,09	99,81	299,58
173	0	200	300	-0,01	0,20	-0,45	0,50	0,07	200,26	299,55
174	0	300	300	-0,03	0,04	-0,42	0,42	0,05	300,10	299,58
175	100	-300	300	0,09	0,06	-0,37	0,39	100,17	-299,88	299,63
176	100	-200	300	0,07	0,06	-0,35	0,36	100,15	-199,88	299,65
177	100	-100	300	-0,30	0,06	-0,38	0,49	99,78	-99,88	299,62
178	100	0	300	-0,32	-0,14	-0,41	0,54	99,76	-0,08	299,59
179	100	100	300	-0,34	-0,14	-0,26	0,45	99,74	99,92	299,74
180	100	200	300	0,23	-0,14	-0,39	0,48	100,31	199,92	299,61
181	100	300	300	-0,14	-0,14	-0,39	0,44	99,94	299,92	299,61
182	200	-300	300	-1,18	-0,12	-0,26	1,22	198,90	-300,06	299,74
183	200	-200	300	-0,41	-0,12	-0,36	0,56	199,67	-200,06	299,64
184	200	-100	300	-0,43	-0,13	-0,36	0,58	199,65	-100,07	299,64
185	200	0	300	-0,07	-0,14	-0,24	0,28	200,01	-0,08	299,77
186	200	100	300	-0,09	-0,14	-0,35	0,39	199,99	99,92	299,65
187	200	200	300	-0,11	-0,14	-0,27	0,32	199,97	199,92	299,73
188	200	300	300	-0,13	-0,14	-0,35	0,40	199,95	299,92	299,65
189	300	-300	300	-0,21	-0,11	-0,19	0,30	299,87	-300,05	299,82
190	300	-200	300	-0,23	-0,11	-0,24	0,35	299,85	-200,05	299,76
191	300	-100	300	-0,61	0,06	-0,11	0,62	299,47	-99,88	299,89
192	300	0	300	-0,63	-0,09	-0,07	0,64	299,45	-0,03	299,93
193	300	100	300	-0,65	-0,10	0,19	0,68	299,43	99,96	300,19
194	300	200	300	-0,10	0,19	0,11	0,24	299,98	200,25	300,11
195	300	300	300	-0,12	0,19	-0,12	0,25	299,96	300,25	299,88

(mm)

Caractéristiques du système d'étalonnage de position statique										
Position n°	X nominal (repère centré)	Y nominal (repère centré)	Z nominal (repère centré)	Ecart X	Ecart Y	Ecart Z	Ecart global	X référence	Y référence	Z référence
196	-300	-300	400	0,34	0,44	-0,41	0,69	-299,59	-299,50	399,59
197	-300	-200	400	0,77	0,82	-0,39	1,19	-299,16	-199,12	399,61
198	-300	-100	400	1,08	0,82	-0,43	1,42	-298,85	-99,12	399,57
199	-300	0	400	0,60	0,82	-0,40	1,09	-299,33	0,88	399,60
200	-300	100	400	1,12	0,52	-0,39	1,29	-298,80	100,58	399,61
201	-300	200	400	0,77	-0,20	-0,43	0,91	-299,15	199,86	399,57
202	-300	300	400	0,75	-0,50	-0,35	0,97	-299,17	299,56	399,65
203	-200	-300	400	0,50	0,61	-0,41	0,89	-199,42	-299,33	399,59
204	-200	-200	400	0,19	0,20	-0,50	0,56	-199,74	-199,74	399,51
205	-200	-100	400	0,16	0,20	-0,51	0,57	-199,77	-99,74	399,49
206	-200	0	400	-0,22	0,01	-0,54	0,58	-200,14	0,07	399,46
207	-200	100	400	0,21	-0,14	-0,52	0,58	-199,71	99,92	399,48
208	-200	200	400	0,27	-0,14	-0,51	0,59	-199,65	199,92	399,49
209	-200	300	400	0,25	-0,34	-0,47	0,64	-199,67	299,72	399,53
210	-100	-300	400	0,37	0,23	-0,50	0,66	-99,56	-299,71	399,50
211	-100	-200	400	0,35	0,30	-0,54	0,71	-99,58	-199,64	399,46
212	-100	-100	400	0,33	0,14	-0,55	0,65	-99,60	-99,80	399,45
213	-100	0	400	0,09	0,64	-0,51	0,82	-99,84	0,70	399,49
214	-100	100	400	0,09	0,15	-0,57	0,60	-99,83	100,21	399,43
215	-100	200	400	0,42	-0,03	-0,56	0,70	-99,50	200,03	399,44
216	-100	300	400	0,40	-0,15	-0,54	0,69	-99,52	299,91	399,46
217	0	-300	400	0,18	0,18	-0,52	0,58	0,25	-299,76	399,48
218	0	-200	400	0,16	0,18	-0,52	0,57	0,23	-199,76	399,48
219	0	-100	400	0,14	0,18	-0,56	0,60	0,21	-99,76	399,45
220	0	0	400	0,97	-0,01	-0,50	1,09	1,05	0,05	399,50
221	0	100	400	0,60	-0,14	-0,52	0,80	0,68	99,92	399,48
222	0	200	400	0,58	-0,14	-0,49	0,77	0,66	199,92	399,51
223	0	300	400	0,56	-0,14	-0,50	0,76	0,64	299,92	399,50
224	100	-300	400	-0,06	0,38	-0,47	0,61	100,01	-299,56	399,53
225	100	-200	400	-0,08	0,38	-0,50	0,63	99,99	-199,56	399,50
226	100	-100	400	0,21	-0,06	-0,49	0,54	100,29	-100,00	399,51
227	100	0	400	-0,01	0,06	-0,52	0,52	100,07	0,13	399,48
228	100	100	400	-0,03	0,51	-0,44	0,68	100,05	100,58	399,56
229	100	200	400	0,22	-0,12	-0,43	0,50	100,30	199,95	399,57
230	100	300	400	0,20	-0,26	-0,44	0,56	100,28	299,80	399,56
231	200	-300	400	0,32	0,11	-0,36	0,50	200,40	-299,82	399,64
232	200	-200	400	0,31	0,11	-0,39	0,51	200,38	-199,82	399,61
233	200	-100	400	0,29	0,11	-0,42	0,52	200,37	-99,82	399,58
234	200	0	400	0,65	0,11	-0,38	0,76	200,73	0,18	399,62
235	200	100	400	0,16	0,11	-0,43	0,47	200,24	100,18	399,57
236	200	200	400	0,14	-0,19	-0,43	0,49	200,22	199,88	399,57
237	200	300	400	0,12	-0,23	-0,41	0,49	200,20	299,84	399,59
238	300	-300	400	0,25	0,15	-0,24	0,37	300,32	-299,78	399,77
239	300	-200	400	0,23	0,15	-0,28	0,39	300,30	-199,78	399,72
240	300	-100	400	0,21	0,15	-0,31	0,40	300,29	-99,78	399,69
241	300	0	400	0,19	0,15	-0,22	0,33	300,27	0,22	399,78
242	300	100	400	-0,17	0,06	-0,06	0,19	299,91	100,13	399,94
243	300	200	400	-0,49	0,01	-0,06	0,50	299,59	200,08	399,94
244	300	300	400	-0,01	-0,36	-0,29	0,46	300,07	299,71	399,71

(mm)

245	-300	-300	500	0,03	1,35	-0,47	1,43	-299,90	-298,59	499,53
246	-300	-200	500	0,01	1,55	-0,51	1,63	-299,92	-198,39	499,49
247	-300	-100	500	0,80	1,55	-0,45	1,80	-299,13	-98,39	499,55
248	-300	0	500	0,78	1,14	-0,43	1,44	-299,14	1,20	499,57
249	-300	100	500	0,76	0,12	-0,39	0,86	-299,16	100,18	499,61
250	-300	200	500	0,67	0,12	-0,51	0,85	-299,25	200,18	499,49
251	-300	300	500	0,65	-0,51	-0,44	0,94	-299,27	299,55	499,56
252	-200	-300	500	1,13	1,77	-0,43	2,14	-198,80	-298,17	499,57
253	-200	-200	500	1,11	1,38	-0,51	1,84	-198,82	-198,56	499,49
254	-200	-100	500	0,57	0,76	-0,57	1,10	-199,36	-99,18	499,43
255	-200	0	500	0,34	0,76	-0,59	1,02	-199,58	0,82	499,41
256	-200	100	500	0,32	-0,19	-0,56	0,67	-199,60	99,87	499,44
257	-200	200	500	0,30	0,54	-0,58	0,85	-199,62	200,60	499,42
258	-200	300	500	0,28	0,54	-0,50	0,79	-199,64	300,60	499,50
259	-100	-300	500	-0,35	1,37	-0,50	1,50	-100,28	-298,57	499,50
260	-100	-200	500	0,99	1,37	-0,59	1,79	-98,94	-198,57	499,41
261	-100	-100	500	0,48	0,88	-0,58	1,16	-99,45	-99,06	499,42
262	-100	0	500	-0,71	1,86	-0,55	2,06	-100,63	1,92	499,45
263	-100	100	500	1,07	0,53	-0,60	1,33	-98,85	100,59	499,40
264	-100	200	500	1,05	1,22	-0,61	1,72	-98,87	201,28	499,39
265	-100	300	500	0,75	-0,34	-0,60	1,02	-99,17	299,72	499,40
266	0	-300	500	0,87	1,35	-0,53	1,69	0,94	-298,59	499,47
267	0	-200	500	0,85	1,00	-0,56	1,42	0,92	-198,94	499,44
268	0	-100	500	0,83	0,45	-0,62	1,13	0,90	-99,49	499,38
269	0	0	500	0,59	0,05	-0,60	0,84	0,67	0,11	499,40
270	0	100	500	0,57	0,05	-0,58	0,82	0,65	100,11	499,42
271	0	200	500	0,35	0,07	-0,58	0,68	0,43	200,13	499,42
272	0	300	500	0,33	-0,03	-0,57	0,66	0,41	300,03	499,43
273	100	-300	500	0,92	0,57	-0,51	1,19	100,99	-299,37	499,49
274	100	-200	500	0,24	1,49	-0,52	1,59	100,31	-198,45	499,48
275	100	-100	500	0,23	0,47	-0,55	0,76	100,31	-99,46	499,45
276	100	0	500	0,68	0,48	-0,56	1,00	100,76	0,54	499,44
277	100	100	500	0,66	1,40	-0,47	1,62	100,74	101,47	499,53
278	100	200	500	1,20	0,40	-0,56	1,38	101,28	200,47	499,44
279	100	300	500	1,18	0,40	-0,46	1,33	101,26	300,47	499,54
280	200	-300	500	-0,06	1,31	-0,42	1,38	200,01	-298,62	499,58
281	200	-200	500	-0,08	0,66	-0,46	0,81	199,99	-199,27	499,54
282	200	-100	500	0,85	0,78	-0,50	1,26	200,93	-99,15	499,50
283	200	0	500	0,83	1,25	-0,41	1,56	200,91	1,32	499,59
284	200	100	500	0,47	1,29	-0,41	1,44	200,55	101,36	499,59
285	200	200	500	1,02	0,36	-0,48	1,19	201,10	200,43	499,52
286	200	300	500	0,35	0,36	-0,49	0,70	200,43	300,43	499,51
287	300	-300	500	-0,27	0,97	-0,34	1,07	299,80	-298,96	499,66
288	300	-200	500	0,80	0,56	-0,36	1,04	300,87	-199,37	499,64
289	300	-100	500	-0,14	-0,06	-0,24	0,29	299,94	-99,99	499,76
290	300	0	500	0,15	-0,32	-0,31	0,47	300,23	-0,25	499,69
291	300	100	500	0,13	-0,17	-0,20	0,29	300,21	99,90	499,80
292	300	200	500	-0,45	0,37	-0,08	0,59	299,63	200,44	499,92
293	300	300	500	-0,02	-0,10	-0,39	0,40	300,06	299,97	499,61

## Annexe 6 : Tableau de l'étalonnage

coordonnées mesurées avec Fastrak							écart entre la mesure du traqueur et la mesure de référence						
XYZ en mm, angles az el rl en °													
	Xm	Ym	Zm	azm	elm	rlm	$\Delta Xm-X$	$\Delta Ym-Y$	$\Delta Zmt-Z$	$\Delta$ écart glo	$\Delta azm-az$	$\Delta elm-el$	$\Delta rlm-rl$
n°pos	Xm	Ym	Zmt	azm	elm	rlm0	$\Delta Xm-X$	$\Delta Y$	$\Delta Zmt-Z$	$\Delta$ écart glo	$\Delta azm-az$	$\Delta elm-el$	$\Delta rlm-rl$
0	-301,80	-302,10	49,62	0,0	0,1	0,1	-2,08	-2,32	-0,12	3,11	0,0	0,1	0,1
1	-302,50	-201,30	49,72	0,2	0,1	0,2	-2,76	-1,53	0,04	3,16	0,2	0,1	0,2
2	-302,60	-100,60	49,62	0,1	0,1	0,2	-2,84	-0,93	-0,14	2,99	0,1	0,1	0,2
3	-302,60	-0,60	49,72	-0,1	0,1	0,2	-2,82	-0,85	-0,05	2,95	-0,1	0,1	0,2
4	-302,30	99,70	49,72	0,0	0,1	0,2	-2,50	-0,41	-0,07	2,54	0,0	0,1	0,2
5	-302,10	200,40	49,92	-0,1	0,1	0,2	-2,30	0,18	0,24	2,32	-0,1	0,1	0,2
6	-301,10	300,90	50,12	-0,3	0,1	0,2	-1,28	0,60	0,37	1,46	-0,3	0,1	0,2
7	-200,90	-301,30	49,42	0,4	0,2	0,2	-1,25	-1,61	-0,32	2,06	0,4	0,2	0,2
8	-201,50	-201,20	49,32	0,1	0,1	0,1	-1,83	-1,33	-0,34	2,29	0,1	0,1	0,1
9	-201,70	-100,70	49,32	0,1	0,1	0,1	-2,01	-0,79	-0,29	2,18	0,1	0,1	0,1
10	-201,70	-0,40	49,32	-0,1	0,1	0,1	-1,99	-0,66	-0,32	2,12	-0,1	0,1	0,1
11	-201,70	99,50	49,42	0,0	0,1	0,2	-1,97	-0,61	-0,18	2,07	0,0	0,1	0,2
12	-201,00	200,20	49,52	-0,2	0,1	0,2	-1,25	-0,12	-0,09	1,26	-0,2	0,1	0,2
13	-200,40	300,80	50,02	-0,3	0,2	0,1	-0,63	0,71	0,36	1,02	-0,3	0,2	0,1
14	-99,30	-301,40	49,42	0,3	0,3	0,1	0,61	-1,51	-0,24	1,65	0,3	0,3	0,1
15	-100,20	-201,00	49,32	0,2	0,2	0,1	-0,27	-1,35	-0,31	1,41	0,2	0,2	0,1
16	-100,70	-100,50	49,32	0,2	0,2	0,1	-0,75	-0,62	-0,25	1,01	0,2	0,2	0,1
17	-101,00	-0,50	49,42	0,2	0,3	0,2	-1,03	-0,81	-0,22	1,33	0,2	0,3	0,2
18	-100,50	99,70	49,52	-0,1	0,2	0,1	-0,51	-0,60	-0,03	0,79	-0,1	0,2	0,1
19	-100,30	200,20	49,82	-0,1	0,2	0,2	-0,29	0,14	0,23	0,40	-0,1	0,2	0,2
20	-99,00	300,60	50,12	-0,3	0,3	0,1	1,03	0,35	0,51	1,20	-0,3	0,3	0,1
21	1,70	-301,20	49,92	0,4	0,4	0,1	1,64	-1,22	0,29	2,07	0,4	0,4	0,1
22	0,90	-200,80	49,62	0,2	0,3	0,1	0,86	-0,90	0,03	1,25	0,2	0,3	0,1
23	0,20	-100,20	49,62	0,1	0,3	0,0	0,18	-0,33	0,05	0,38	0,1	0,3	0,0
24	0,40	-0,30	49,82	0,0	0,3	0,0	0,40	-0,30	0,26	0,56	0,0	0,3	0,0
25	0,30	99,50	49,92	-0,2	0,3	0,1	0,32	-0,70	0,35	0,84	-0,2	0,3	0,1
26	0,70	200,10	50,32	-0,3	0,3	0,1	0,74	0,05	0,74	1,05	-0,3	0,3	0,1
27	1,60	300,20	50,72	-0,3	0,4	0,0	1,66	0,18	1,12	2,01	-0,3	0,4	0,0
28	102,70	-300,20	50,42	0,4	0,5	0,0	2,52	-0,20	0,76	2,64	0,4	0,5	0,0
29	102,50	-200,10	50,42	0,3	0,5	0,0	2,34	-0,17	0,77	2,47	0,3	0,5	0,0
30	101,70	-100,10	50,32	0,1	0,5	-0,1	1,56	-0,13	0,74	1,73	0,1	0,5	-0,1
31	101,30	-0,40	50,52	0,1	0,4	0,0	1,18	-0,48	0,93	1,57	0,1	0,4	0,0
32	101,40	100,10	50,82	0,0	0,3	0,1	1,30	-0,05	1,18	1,76	0,0	0,3	0,1
33	101,80	199,90	51,12	-0,1	0,4	0,0	1,72	-0,15	1,52	2,30	-0,1	0,4	0,0
34	103,10	300,00	51,72	-0,2	0,5	0,0	3,04	-0,06	2,07	3,68	-0,2	0,5	0,0
35	205,20	-299,40	51,92	0,2	0,8	-0,1	5,04	0,45	2,18	5,51	0,2	0,8	-0,1
36	203,90	-199,60	51,52	0,1	0,7	-0,1	3,76	0,36	1,82	4,20	0,1	0,7	-0,1
37	203,60	-99,80	51,62	0,1	0,7	-0,1	3,48	0,14	1,96	4,00	0,1	0,7	-0,1
38	203,30	0,10	51,82	-0,1	0,6	0,0	3,20	0,03	2,12	3,84	-0,1	0,6	0,0
39	202,90	100,00	51,92	-0,1	0,6	0,0	2,82	-0,11	2,27	3,62	-0,1	0,6	0,0
40	203,30	199,60	52,42	-0,2	0,5	0,0	3,24	-0,55	2,73	4,27	-0,2	0,5	0,0
41	203,50	299,70	53,12	-0,3	0,6	-0,1	3,46	-0,31	3,43	4,88	-0,3	0,6	-0,1
42	307,40	-298,50	54,02	0,4	1,0	-0,2	7,24	1,43	4,17	8,48	0,4	1,0	-0,2
43	306,30	-198,70	53,62	0,4	1,0	-0,2	6,17	1,23	3,84	7,37	0,4	1,0	-0,2
44	306,00	-98,90	53,42	0,1	1,0	-0,2	5,88	0,99	3,67	7,00	0,1	1,0	-0,2
45	305,20	1,30	53,62	-0,2	0,9	-0,3	5,10	1,26	3,85	6,52	-0,2	0,9	-0,3
46	304,50	99,60	54,02	-0,3	0,7	-0,1	4,42	-0,52	4,12	6,07	-0,3	0,7	-0,1
47	303,90	199,10	54,12	-0,2	0,6	-0,1	3,84	-0,92	4,21	5,77	-0,2	0,6	-0,1
48	305,80	298,40	54,82	-0,1	0,9	0,0	5,76	-1,75	4,99	7,82	-0,1	0,9	0,0

49	-302,90	-301,40	100,22	0,8	0,0	0,2	-2,99	-1,89	0,48	3,57	0,8	0,0	0,2
50	-303,10	-200,90	100,02	0,7	0,0	0,2	-3,17	-1,29	0,33	3,44	0,7	0,0	0,2
51	-303,20	-99,80	100,22	0,7	-0,1	0,3	-3,25	-0,27	0,47	3,30	0,7	-0,1	0,3
52	-303,20	0,20	100,12	0,7	-0,1	0,3	-3,23	-0,09	0,29	3,25	0,7	-0,1	0,3
53	-302,90	100,40	100,22	0,7	-0,1	0,2	-2,91	0,11	0,43	2,95	0,7	-0,1	0,2
54	-302,80	200,60	100,22	0,6	0,0	0,2	-2,80	0,42	0,58	2,89	0,6	0,0	0,2
55	-302,00	301,50	100,52	0,4	0,1	0,1	-1,98	1,23	0,75	2,44	0,4	0,1	0,1
56	-201,90	-301,20	100,02	1,0	0,0	0,4	-2,01	-1,63	0,24	2,60	1,0	0,0	0,4
57	-202,20	-200,90	99,82	0,7	0,0	0,2	-2,29	-1,26	0,22	2,62	0,7	0,0	0,2
58	-202,70	-100,30	99,82	0,7	0,0	0,1	-2,77	-0,55	0,25	2,84	0,7	0,0	0,1
59	-202,40	-0,10	99,92	0,7	0,0	0,3	-2,45	-0,28	0,29	2,49	0,7	0,0	0,3
60	-202,30	100,40	99,82	0,7	0,1	0,2	-2,34	0,18	0,27	2,36	0,7	0,1	0,2
61	-202,10	200,90	100,12	0,5	0,1	0,2	-2,12	0,70	0,55	2,29	0,5	0,1	0,2
62	-201,60	301,00	100,32	0,5	0,1	0,2	-1,60	0,83	0,68	1,92	0,5	0,1	0,2
63	-100,80	-300,90	99,72	0,9	0,3	0,2	-0,89	-1,26	0,06	1,55	0,9	0,3	0,2
64	-101,10	-200,60	99,62	0,8	0,1	0,3	-1,17	-1,02	0,05	1,56	0,8	0,1	0,3
65	-101,70	-100,40	99,62	0,8	0,1	0,2	-1,75	-0,62	0,09	1,86	0,8	0,1	0,2
66	-101,90	0,20	99,72	0,8	0,2	0,3	-1,93	-0,41	0,14	1,98	0,8	0,2	0,3
67	-101,40	99,70	99,72	0,4	0,1	0,2	-1,42	-0,64	0,22	1,57	0,4	0,1	0,2
68	-101,10	200,50	100,02	0,6	0,2	0,3	-1,10	0,15	0,50	1,21	0,6	0,2	0,3
69	-100,90	300,80	100,52	0,6	0,1	0,1	-0,88	0,71	0,96	1,48	0,6	0,1	0,1
70	0,80	-301,10	100,02	0,8	0,3	0,2	0,71	-1,32	0,39	1,55	0,8	0,3	0,2
71	-0,20	-200,60	99,82	0,7	0,3	0,1	-0,27	-0,73	0,24	0,82	0,7	0,3	0,1
72	-0,50	-100,30	99,82	0,5	0,2	0,2	-0,55	-0,52	0,33	0,83	0,5	0,2	0,2
73	-0,80	-0,20	99,92	0,5	0,2	0,1	-0,83	-0,30	0,40	0,97	0,5	0,2	0,1
74	-0,80	99,70	100,22	0,4	0,3	0,1	-0,81	-0,43	0,63	1,12	0,4	0,3	0,1
75	-0,40	200,30	100,42	0,5	0,3	0,1	-0,40	0,24	0,85	0,97	0,5	0,3	0,1
76	0,40	300,80	100,92	0,6	0,4	0,1	0,42	0,77	1,21	1,49	0,6	0,4	0,1
77	101,80	-300,50	100,62	0,7	0,4	0,2	1,71	-0,84	0,93	2,12	0,7	0,4	0,2
78	101,00	-200,20	100,52	0,6	0,4	0,1	0,93	-0,36	0,84	1,30	0,6	0,4	0,1
79	100,20	-100,10	100,42	0,6	0,3	0,0	0,15	-0,21	0,76	0,81	0,6	0,3	0,0
80	100,30	0,30	100,52	0,5	0,3	0,0	0,27	0,14	0,92	0,97	0,5	0,3	0,0
81	100,40	99,90	100,82	0,6	0,3	0,1	0,39	-0,26	1,09	1,18	0,6	0,3	0,1
82	100,50	199,90	101,02	0,9	0,3	0,0	0,50	-0,22	1,39	1,50	0,9	0,3	0,0
83	101,40	300,20	101,62	0,5	0,5	0,0	1,42	0,04	1,97	2,43	0,5	0,5	0,0
84	203,20	-299,60	101,72	1,1	0,7	0,0	3,11	0,34	1,84	3,63	1,1	0,7	0,0
85	202,40	-199,40	101,42	1,1	0,6	-0,1	2,33	0,45	1,71	2,93	1,1	0,6	-0,1
86	201,90	-99,50	101,42	0,7	0,6	-0,1	1,85	0,36	1,74	2,56	0,7	0,6	-0,1
87	201,60	0,30	101,62	1,1	0,5	0,0	1,57	0,18	1,81	2,40	1,1	0,5	0,0
88	201,60	100,00	101,82	0,6	0,5	0,0	1,59	-0,16	2,15	2,68	0,6	0,5	0,0
89	202,20	199,50	102,22	0,8	0,4	0,0	2,20	-0,64	2,47	3,37	0,8	0,4	0,0
90	202,50	300,10	102,82	0,7	0,6	-0,1	2,52	-0,04	3,13	4,02	0,7	0,6	-0,1
91	305,50	-298,90	103,62	0,9	1,0	0,0	5,41	1,00	3,72	6,64	0,9	1,0	0,0
92	304,70	-199,00	103,22	0,8	0,9	0,0	4,63	0,89	3,41	5,82	0,8	0,9	0,0
93	303,90	-99,00	103,22	0,7	0,9	0,0	3,87	0,87	3,23	5,11	0,7	0,9	0,0
94	303,60	1,00	103,42	0,5	0,8	-0,1	3,57	0,66	3,44	5,00	0,5	0,8	-0,1
95	303,10	100,50	103,92	0,3	0,7	-0,1	3,09	0,42	3,78	4,90	0,3	0,7	-0,1
96	303,00	199,60	104,22	0,9	0,7	-0,1	3,00	-0,47	4,06	5,07	0,9	0,7	-0,1
97	304,10	299,10	104,42	0,7	0,8	-0,1	4,12	-1,00	4,59	6,25	0,7	0,8	-0,1

98	-303,80	-301,70	201,22	1,0	-0,2	0,2	-3,91	-1,83	1,52	4,58	1,0	-0,2	0,2
99	-304,20	-200,60	200,82	0,8	-0,2	0,1	-4,29	-0,76	1,20	4,52	0,8	-0,2	0,1
100	-303,90	-99,90	200,82	0,6	-0,2	0,2	-3,97	-0,04	1,01	4,10	0,6	-0,2	0,2
101	-303,70	0,20	200,72	0,7	-0,2	0,1	-3,75	0,08	0,92	3,86	0,7	-0,2	0,1
102	-303,40	100,10	200,82	0,6	-0,3	0,1	-3,43	-0,01	1,11	3,61	0,6	-0,3	0,1
103	-303,80	200,40	200,92	0,8	-0,2	0,0	-3,81	0,28	1,35	4,06	0,8	-0,2	0,0
104	-303,20	300,70	201,22	0,4	-0,2	0,0	-3,19	0,58	1,54	3,59	0,4	-0,2	0,0
105	-202,80	-301,40	200,72	0,8	-0,2	0,3	-2,91	-1,89	1,04	3,62	0,8	-0,2	0,3
106	-203,20	-200,90	200,22	0,6	-0,1	0,1	-3,29	-1,40	0,70	3,64	0,6	-0,1	0,1
107	-203,30	-100,60	200,12	0,6	-0,2	0,1	-3,37	-0,77	0,61	3,51	0,6	-0,2	0,1
108	-203,70	-0,20	200,12	0,7	0,0	0,1	-3,75	-0,37	0,59	3,81	0,7	0,0	0,1
109	-202,90	99,90	200,12	0,5	-0,2	0,1	-2,93	-0,27	0,62	3,01	0,5	-0,2	0,1
110	-203,10	200,10	200,42	0,9	-0,1	0,1	-3,11	-0,07	0,92	3,25	0,9	-0,1	0,1
111	-202,50	300,70	200,82	0,8	-0,1	-0,1	-2,49	0,61	1,23	2,84	0,8	-0,1	-0,1
112	-102,30	-301,00	200,12	0,9	0,0	0,2	-2,41	-1,62	0,53	2,95	0,9	0,0	0,2
113	-102,30	-200,50	199,92	0,7	0,0	0,1	-2,39	-0,51	0,36	2,47	0,7	0,0	0,1
114	-102,70	-100,30	199,92	0,8	0,0	0,1	-2,77	-0,31	0,45	2,82	0,8	0,0	0,1
115	-103,00	0,30	200,02	0,9	0,1	0,2	-3,05	-0,24	0,46	3,09	0,9	0,1	0,2
116	-102,40	99,80	199,92	0,5	-0,1	0,1	-2,43	-0,23	0,47	2,49	0,5	-0,1	0,1
117	-102,00	200,20	200,22	0,6	-0,1	0,1	-2,01	0,17	0,75	2,15	0,6	-0,1	0,1
118	-101,70	300,50	200,52	0,3	0,0	0,0	-1,69	0,47	1,00	2,02	0,3	0,0	0,0
119	-0,90	-301,40	200,22	1,1	0,0	0,1	-1,01	-1,45	0,67	1,89	1,1	0,0	0,1
120	-1,80	-201,00	199,92	0,5	0,1	0,1	-1,89	-1,05	0,40	2,20	0,5	0,1	0,1
121	-1,90	-100,50	199,82	0,4	0,1	0,0	-1,97	-0,55	0,39	2,08	0,4	0,1	0,0
122	-1,90	-0,60	199,92	0,6	0,0	0,0	-1,95	-0,65	0,45	2,11	0,6	0,0	0,0
123	-2,00	99,50	200,12	0,3	0,0	0,0	-2,03	-0,55	0,60	2,19	0,3	0,0	0,0
124	-1,70	199,40	200,32	0,8	0,1	-0,1	-1,71	-0,65	0,83	2,01	0,8	0,1	-0,1
125	-1,20	299,90	200,72	0,5	0,1	-0,1	-1,19	-0,15	1,20	1,70	0,5	0,1	-0,1
126	100,40	-301,00	200,52	1,0	0,2	0,0	0,29	-1,07	0,93	1,45	1,0	0,2	0,0
127	99,40	-200,70	200,32	0,6	0,2	-0,1	-0,69	-0,77	0,70	1,25	0,6	0,2	-0,1
128	98,90	-100,80	200,22	0,4	0,1	-0,1	-1,17	-0,87	0,64	1,59	0,4	0,1	-0,1
129	98,70	-0,80	200,32	0,5	0,1	-0,1	-1,35	-0,83	0,77	1,76	0,5	0,1	-0,1
130	98,70	99,70	200,62	0,6	0,2	0,1	-1,33	-0,33	0,95	1,67	0,6	0,2	0,1
131	99,10	199,50	200,82	0,9	0,1	-0,1	-1,31	-0,53	1,27	1,90	0,9	0,1	-0,1
132	99,90	300,00	201,42	0,7	0,3	-0,1	-0,09	-0,03	1,87	1,87	0,7	0,3	-0,1
133	200,80	-300,40	201,42	0,8	0,6	0,1	1,10	-0,45	1,73	2,10	0,8	0,6	0,1
134	200,20	-200,30	200,92	0,9	0,4	-0,1	0,52	-0,35	1,31	1,46	0,9	0,4	-0,1
135	199,80	-100,30	200,92	0,8	0,4	-0,2	-0,13	-0,35	1,31	1,36	0,8	0,4	-0,2
136	199,60	-0,40	201,12	0,7	0,2	-0,2	-0,52	-0,45	1,39	1,55	0,7	0,2	-0,2
137	199,70	99,40	201,22	0,8	0,3	-0,1	-0,40	-0,65	1,63	1,80	0,8	0,3	-0,1
138	200,10	199,40	201,72	0,4	0,3	-0,1	-0,23	-0,65	2,04	2,15	0,4	0,3	-0,1
139	200,50	299,70	202,22	0,8	0,4	-0,2	0,57	-0,35	2,60	2,69	0,8	0,4	-0,2
140	302,20	-300,10	202,82	1,2	0,7	0,1	2,12	0,00	3,04	3,70	1,2	0,7	0,1
141	301,60	-200,00	202,32	0,6	0,6	0,0	1,77	0,06	2,62	3,16	0,6	0,6	0,0
142	300,60	-99,70	202,12	0,6	0,6	-0,1	0,79	0,36	2,28	2,44	0,6	0,6	-0,1
143	301,00	-0,30	202,52	0,9	0,5	-0,2	0,84	-0,24	2,63	2,77	0,9	0,5	-0,2
144	300,70	99,80	202,92	0,3	0,5	-0,2	0,56	-0,14	2,86	2,92	0,3	0,5	-0,2
145	300,80	199,30	203,32	0,6	0,6	-0,2	0,68	-0,64	3,23	3,36	0,6	0,6	-0,2
146	301,60	299,10	203,72	0,2	0,6	-0,2	1,86	-0,81	3,99	4,48	0,2	0,6	-0,2

147	-303,90	-301,30	301,62	0,4	-0,3	0,2	-4,39	-1,86	1,98	5,16	0,4	-0,3	0,2
148	-303,80	-200,70	301,22	0,2	-0,3	0,1	-4,05	-1,23	1,61	4,52	0,2	-0,3	0,1
149	-303,90	-99,30	301,12	0,6	-0,3	0,2	-4,48	-0,29	1,42	4,70	0,6	-0,3	0,2
150	-303,70	0,50	301,12	0,5	-0,3	0,2	-4,09	-0,18	1,38	4,32	0,5	-0,3	0,2
151	-303,30	100,20	301,12	0,5	-0,3	0,1	-4,23	-0,21	1,35	4,44	0,5	-0,3	0,1
152	-303,60	199,90	301,12	0,3	-0,2	0,0	-3,97	0,38	1,51	4,27	0,3	-0,2	0,0
153	-303,70	300,60	301,82	0,3	-0,3	-0,1	-4,05	1,08	2,13	4,70	0,3	-0,3	-0,1
154	-202,40	-300,70	300,82	0,5	-0,3	0,2	-3,52	-1,88	1,11	4,14	0,5	-0,3	0,2
155	-202,90	-200,80	300,52	0,4	-0,3	0,1	-3,33	-0,89	0,94	3,57	0,4	-0,3	0,1
156	-203,30	-100,30	300,42	0,3	-0,3	0,1	-3,71	-0,11	0,88	3,81	0,3	-0,3	0,1
157	-203,40	0,20	300,42	0,4	-0,3	0,2	-3,52	0,59	0,87	3,67	0,4	-0,3	0,2
158	-203,20	99,70	300,42	0,6	-0,3	0,1	-3,31	-0,35	0,88	3,44	0,6	-0,3	0,1
159	-203,30	199,90	300,62	0,6	-0,2	0,0	-3,39	-0,15	1,11	3,57	0,6	-0,2	0,0
160	-203,30	300,20	301,02	0,3	-0,2	0,0	-3,37	0,34	1,43	3,68	0,3	-0,2	0,0
161	-103,20	-301,10	300,42	0,5	0,0	0,1	-2,99	-1,53	0,82	3,45	0,5	0,0	0,1
162	-103,00	-200,10	300,12	0,6	-0,1	0,1	-3,36	-0,53	0,59	3,45	0,6	-0,1	0,1
163	-103,20	-100,40	300,12	0,3	-0,1	0,0	-3,22	-0,65	0,62	3,34	0,3	-0,1	0,0
164	-103,80	0,70	300,12	0,6	0,0	0,2	-3,43	-0,51	0,49	3,50	0,6	0,0	0,2
165	-103,00	99,30	300,12	0,5	-0,1	0,1	-3,24	-0,81	0,62	3,39	0,5	-0,1	0,1
166	-103,20	199,90	300,32	0,6	-0,1	0,1	-3,79	-0,34	0,78	3,88	0,6	-0,1	0,1
167	-102,90	299,90	300,72	0,3	-0,1	-0,1	-3,47	0,25	1,18	3,68	0,3	-0,1	-0,1
168	-1,70	-301,20	300,32	0,5	-0,1	0,1	-1,87	-0,87	0,74	2,19	0,5	-0,1	0,1
169	-2,60	-200,70	300,02	0,1	0,0	0,1	-2,75	-0,77	0,48	2,89	0,1	0,0	0,1
170	-2,80	-100,40	300,02	0,5	-0,1	0,0	-2,93	-0,47	0,54	3,01	0,5	-0,1	0,0
171	-2,70	-0,60	300,02	0,3	-0,1	0,0	-2,81	-0,41	0,50	2,88	0,3	-0,1	0,0
172	-2,60	99,20	300,22	0,1	0,0	0,0	-2,69	-0,61	0,64	2,83	0,1	0,0	0,0
173	-2,80	199,00	300,32	0,5	0,0	0,0	-2,87	-1,26	0,77	3,23	0,5	0,0	0,0
174	-2,10	299,60	300,82	0,4	0,0	-0,1	-2,15	-0,50	1,24	2,53	0,4	0,0	-0,1
175	98,80	-300,90	300,42	0,4	0,1	0,0	-1,37	-1,02	0,79	1,88	0,4	0,1	0,0
176	98,20	-201,10	300,32	0,2	0,1	-0,1	-1,95	-1,22	0,67	2,39	0,2	0,1	-0,1
177	97,30	-100,80	300,22	0,3	0,1	-0,1	-2,48	-0,92	0,60	2,71	0,3	0,1	-0,1
178	97,30	-1,00	300,22	0,7	0,1	-0,1	-2,46	-0,92	0,63	2,70	0,7	0,1	-0,1
179	97,60	99,00	300,52	0,8	0,1	0,0	-2,14	-0,92	0,79	2,46	0,8	0,1	0,0
180	98,40	198,60	300,62	0,7	0,0	-0,1	-1,91	-1,32	1,01	2,53	0,7	0,0	-0,1
181	98,40	299,30	301,12	0,2	0,1	-0,2	-1,54	-0,62	1,52	2,25	0,2	0,1	-0,2
182	198,80	-301,10	301,12	0,4	0,3	0,0	-0,10	-1,04	1,38	1,73	0,4	0,3	0,0
183	198,40	-200,70	300,62	0,3	0,3	-0,1	-1,27	-0,64	0,98	1,73	0,3	0,3	-0,1
184	198,20	-100,80	300,52	0,3	0,2	-0,1	-1,45	-0,73	0,88	1,85	0,3	0,2	-0,1
185	198,40	-1,00	300,82	0,3	0,1	-0,1	-1,61	-0,92	1,06	2,13	0,3	0,1	-0,1
186	198,40	98,90	300,82	0,5	0,2	-0,1	-1,59	-1,02	1,17	2,22	0,5	0,2	-0,1
187	199,20	198,50	301,22	0,2	0,1	-0,2	-0,77	-1,42	1,49	2,20	0,2	0,1	-0,2
188	198,80	299,20	301,72	0,5	0,4	-0,2	-1,15	-0,72	2,07	2,48	0,5	0,4	-0,2
189	299,90	-300,30	302,02	0,5	0,5	0,1	0,03	-0,25	2,21	2,22	0,5	0,5	0,1
190	298,90	-200,50	301,62	0,5	0,5	0,0	-0,95	-0,45	1,86	2,14	0,5	0,5	0,0
191	298,80	-100,60	301,52	0,3	0,4	-0,1	-0,67	-0,72	1,63	1,90	0,3	0,4	-0,1
192	298,60	-0,50	301,72	0,7	0,4	-0,1	-0,85	-0,47	1,79	2,04	0,7	0,4	-0,1
193	299,00	99,10	302,22	0,7	0,4	-0,1	-0,43	-0,86	2,03	2,25	0,7	0,4	-0,1
194	299,50	199,20	302,72	0,8	0,4	-0,2	-0,48	-1,05	2,62	2,86	0,8	0,4	-0,2
195	299,80	298,70	303,02	0,7	0,6	-0,2	-0,16	-1,55	3,14	3,51	0,7	0,6	-0,2

196	-303,80	-300,90	401,92	0,2	-0,4	0,2	-4,21	-1,40	2,33	5,02	0,2	-0,4	0,2
197	-303,50	-200,50	401,32	0,4	-0,3	0,1	-4,34	-1,38	1,71	4,87	0,4	-0,3	0,1
198	-303,40	-99,50	401,12	0,4	-0,3	0,2	-4,55	-0,38	1,56	4,83	0,4	-0,3	0,2
199	-303,30	0,50	401,02	0,4	-0,3	0,2	-3,98	-0,38	1,42	4,24	0,4	-0,3	0,2
200	-302,70	99,60	401,12	0,5	-0,4	0,1	-3,90	-0,98	1,51	4,29	0,5	-0,4	0,1
201	-303,40	199,50	401,42	0,5	-0,4	0,0	-4,25	-0,36	1,85	4,65	0,5	-0,4	0,0
202	-303,60	299,80	402,02	0,4	-0,4	-0,2	-4,43	0,24	2,37	5,03	0,4	-0,4	-0,2
203	-203,30	-300,30	400,92	0,5	-0,3	0,2	-3,88	-0,97	1,33	4,22	0,5	-0,3	0,2
204	-203,20	-200,40	400,52	0,4	-0,3	0,1	-3,46	-0,66	1,02	3,67	0,4	-0,3	0,1
205	-203,30	-100,30	400,42	0,3	-0,2	0,0	-3,54	-0,56	0,93	3,70	0,3	-0,2	0,0
206	-203,40	-0,50	400,42	0,3	-0,2	0,0	-3,26	-0,57	0,96	3,44	0,3	-0,2	0,0
207	-203,00	99,30	400,42	0,2	-0,2	0,1	-3,29	-0,62	0,94	3,48	0,2	-0,2	0,1
208	-203,20	199,20	400,72	0,4	-0,3	0,0	-3,55	-0,72	1,23	3,82	0,4	-0,3	0,0
209	-203,10	299,70	401,12	0,6	-0,3	-0,1	-3,43	-0,02	1,60	3,78	0,6	-0,3	-0,1
210	-102,90	-300,80	400,42	0,4	-0,2	0,1	-3,34	-1,09	0,92	3,63	0,4	-0,2	0,1
211	-102,90	-200,40	400,12	0,4	-0,2	0,0	-3,32	-0,76	0,66	3,47	0,4	-0,2	0,0
212	-102,90	-100,40	400,12	0,4	-0,2	0,0	-3,31	-0,60	0,67	3,43	0,4	-0,2	0,0
213	-103,20	-0,10	400,22	0,5	-0,2	0,1	-3,37	-0,80	0,74	3,54	0,5	-0,2	0,1
214	-102,80	99,10	400,12	0,4	-0,2	0,1	-2,97	-1,11	0,69	3,24	0,4	-0,2	0,1
215	-102,80	199,20	400,22	0,4	-0,2	0,1	-3,30	-0,83	0,78	3,49	0,4	-0,2	0,1
216	-102,90	299,50	400,72	0,2	-0,2	-0,1	-3,38	-0,41	1,26	3,63	0,2	-0,2	-0,1
217	-2,60	-300,90	400,22	0,6	-0,1	0,1	-2,85	-1,14	0,75	3,16	0,6	-0,1	0,1
218	-2,70	-200,50	399,92	0,3	-0,2	0,0	-2,93	-0,74	0,44	3,06	0,3	-0,2	0,0
219	-2,70	-100,60	399,92	0,3	-0,2	0,0	-2,91	-0,84	0,48	3,07	0,3	-0,2	0,0
220	-2,50	-0,70	400,02	0,1	-0,2	0,0	-3,55	-0,75	0,52	3,66	0,1	-0,2	0,0
221	-2,80	98,90	400,02	0,3	-0,1	0,1	-3,48	-1,02	0,54	3,66	0,3	-0,1	0,1
222	-2,50	198,90	400,12	0,2	-0,1	0,0	-3,16	-1,02	0,61	3,38	0,2	-0,1	0,0
223	-2,40	299,30	400,52	0,5	-0,1	-0,1	-3,04	-0,62	1,02	3,26	0,5	-0,1	-0,1
224	97,80	-300,80	400,22	0,4	0,0	0,1	-2,21	-1,24	0,69	2,63	0,4	0,0	0,1
225	97,40	-200,50	399,92	0,5	-0,1	0,0	-2,59	-0,94	0,42	2,79	0,5	-0,1	0,0
226	97,00	-100,60	399,92	0,3	-0,1	0,0	-3,29	-0,60	0,41	3,36	0,3	-0,1	0,0
227	97,10	-0,90	400,02	0,4	-0,1	0,0	-2,97	-1,03	0,54	3,19	0,4	-0,1	0,0
228	97,20	98,60	400,12	0,5	0,0	0,0	-2,85	-1,98	0,57	3,51	0,5	0,0	0,0
229	97,50	198,90	400,32	0,3	0,0	0,0	-2,80	-1,05	0,75	3,08	0,3	0,0	0,0
230	97,70	299,20	400,72	0,4	0,1	-0,1	-2,58	-0,60	1,17	2,89	0,4	0,1	-0,1
231	198,00	-300,60	400,62	0,6	0,2	0,1	-2,40	-0,78	0,98	2,71	0,6	0,2	0,1
232	197,70	-200,50	400,22	0,5	0,1	0,0	-2,68	-0,68	0,61	2,84	0,5	0,1	0,0
233	197,40	-100,60	400,22	0,3	0,0	0,0	-2,97	-0,78	0,64	3,13	0,3	0,0	0,0
234	198,20	-1,00	400,32	0,5	-0,1	-0,1	-2,53	-1,18	0,71	2,88	0,5	-0,1	-0,1
235	197,30	98,80	400,32	0,5	0,1	0,0	-2,94	-1,38	0,75	3,33	0,5	0,1	0,0
236	197,90	198,70	400,72	0,5	0,1	-0,1	-2,32	-1,18	1,15	2,84	0,5	0,1	-0,1
237	198,10	299,10	401,42	0,5	0,2	-0,2	-2,10	-0,74	1,83	2,88	0,5	0,2	-0,2
238	298,60	-300,50	401,42	0,8	0,3	0,2	-1,72	-0,72	1,66	2,50	0,8	0,3	0,2
239	298,10	-200,60	401,02	0,3	0,2	0,0	-2,20	-0,82	1,30	2,69	0,3	0,2	0,0
240	297,30	-100,40	400,82	0,3	0,3	0,0	-2,99	-0,62	1,13	3,25	0,3	0,3	0,0
241	297,70	-1,20	401,02	0,4	0,2	-0,1	-2,57	-1,42	1,24	3,18	0,4	0,2	-0,1
242	298,70	98,60	401,42	0,6	0,2	-0,1	-1,21	-1,53	1,48	2,44	0,6	0,2	-0,1
243	298,20	198,90	401,92	0,6	0,3	-0,1	-1,39	-1,18	1,99	2,69	0,6	0,3	-0,1
244	298,70	298,60	402,32	0,1	0,4	-0,3	-1,37	-1,11	2,61	3,15	0,1	0,4	-0,3

245	-303,30	-299,80	501,72	0,7	-0,4	0,3	-3,40	-1,21	2,19	4,22	0,7	-0,4	0,3
246	-303,60	-198,80	501,32	0,4	-0,3	0,3	-3,68	-0,41	1,84	4,14	0,4	-0,3	0,3
247	-302,90	-98,90	501,12	0,4	-0,4	0,2	-3,77	-0,51	1,57	4,12	0,4	-0,4	0,2
248	-302,90	0,50	501,12	0,3	-0,3	0,2	-3,76	-0,70	1,55	4,12	0,3	-0,3	0,2
249	-302,60	99,20	501,12	0,4	-0,4	0,1	-3,44	-0,98	1,51	3,88	0,4	-0,4	0,1
250	-303,40	199,60	501,32	0,6	-0,3	0,1	-4,15	-0,58	1,83	4,57	0,6	-0,3	0,1
251	-302,80	299,60	502,02	0,5	-0,4	-0,1	-3,53	0,05	2,46	4,30	0,5	-0,4	-0,1
252	-203,30	-298,60	501,02	0,5	-0,3	0,4	-4,50	-0,43	1,45	4,75	0,5	-0,3	0,4
253	-202,40	-199,30	500,62	0,3	-0,4	0,2	-3,58	-0,74	1,13	3,83	0,3	-0,4	0,2
254	-202,70	-99,40	500,42	0,5	-0,3	0,1	-3,35	-0,22	0,99	3,50	0,5	-0,3	0,1
255	-203,50	0,60	500,42	0,5	-0,1	0,2	-3,92	-0,22	1,01	4,05	0,5	-0,1	0,2
256	-202,50	99,90	500,42	0,2	-0,3	0,2	-2,90	0,03	0,98	3,06	0,2	-0,3	0,2
257	-202,80	200,00	500,62	0,8	-0,3	0,1	-3,18	-0,60	1,21	3,45	0,8	-0,3	0,1
258	-202,80	300,40	501,12	0,6	-0,3	0,1	-3,16	-0,20	1,62	3,56	0,6	-0,3	0,1
259	-103,80	-299,20	500,42	0,5	-0,1	0,3	-3,52	-0,63	0,92	3,70	0,5	-0,1	0,3
260	-102,20	-198,90	500,02	0,4	-0,3	0,2	-3,26	-0,33	0,61	3,34	0,4	-0,3	0,2
261	-102,60	-99,20	500,02	0,6	-0,2	0,1	-3,16	-0,14	0,61	3,22	0,6	-0,2	0,1
262	-104,00	1,40	500,12	0,3	0,0	0,3	-3,37	-0,52	0,67	3,47	0,3	0,0	0,3
263	-102,10	99,50	500,02	0,4	-0,2	0,2	-3,25	-1,09	0,62	3,48	0,4	-0,2	0,2
264	-102,30	200,40	500,12	0,5	-0,2	0,3	-3,43	-0,88	0,73	3,61	0,5	-0,2	0,3
265	-102,20	299,00	500,62	0,3	-0,3	-0,1	-3,03	-0,72	1,22	3,34	0,3	-0,3	-0,1
266	-2,20	-299,70	500,12	0,5	-0,2	0,2	-3,14	-1,11	0,65	3,40	0,5	-0,2	0,2
267	-2,20	-199,70	499,72	0,4	-0,2	0,1	-3,12	-0,76	0,29	3,23	0,4	-0,2	0,1
268	-1,90	-100,10	499,82	0,4	-0,3	-0,1	-2,80	-0,61	0,44	2,90	0,4	-0,3	-0,1
269	-2,70	-1,30	500,02	-0,1	-0,2	0,0	-3,37	-1,41	0,62	3,70	-0,1	-0,2	0,0
270	-2,90	98,60	499,92	0,3	-0,1	0,2	-3,55	-1,51	0,50	3,89	0,3	-0,1	0,2
271	-2,70	199,10	500,02	0,1	-0,1	0,1	-3,13	-1,03	0,60	3,35	0,1	-0,1	0,1
272	-2,90	299,30	500,42	0,4	-0,1	-0,1	-3,31	-0,73	1,00	3,53	0,4	-0,1	-0,1
273	98,20	-300,30	500,02	0,0	-0,1	0,2	-2,79	-0,93	0,53	2,99	0,0	-0,1	0,2
274	97,50	-199,30	499,72	0,5	-0,1	0,1	-2,81	-0,85	0,24	2,95	0,5	-0,1	0,1
275	97,00	-100,50	499,72	0,5	-0,1	0,0	-3,31	-1,04	0,27	3,47	0,5	-0,1	0,0
276	97,30	-0,60	499,82	0,3	-0,2	0,1	-3,46	-1,14	0,39	3,66	0,3	-0,2	0,1
277	97,40	99,70	499,92	0,0	-0,1	0,3	-3,34	-1,77	0,39	3,80	0,0	-0,1	0,3
278	98,40	198,80	500,12	0,0	-0,1	0,1	-2,88	-1,67	0,68	3,40	0,0	-0,1	0,1
279	98,70	298,90	500,62	0,1	-0,1	-0,1	-2,56	-1,57	1,08	3,19	0,1	-0,1	-0,1
280	197,20	-299,90	500,32	0,0	0,1	0,2	-2,81	-1,28	0,75	3,18	0,0	0,1	0,2
281	197,90	-200,10	500,02	0,4	0,0	0,1	-2,09	-0,83	0,48	2,30	0,4	0,0	0,1
282	197,70	-100,30	499,92	0,4	-0,1	0,1	-3,23	-1,15	0,43	3,45	0,4	-0,1	0,1
283	197,70	-0,30	500,02	0,2	-0,1	0,1	-3,21	-1,62	0,43	3,62	0,2	-0,1	0,1
284	197,40	99,50	500,12	0,4	0,0	0,2	-3,15	-1,86	0,53	3,69	0,4	0,0	0,2
285	198,80	198,80	500,52	-0,1	-0,1	0,0	-2,30	-1,63	1,00	2,99	-0,1	-0,1	0,0
286	198,10	298,90	501,02	-0,1	0,1	-0,1	-2,33	-1,53	1,51	3,17	-0,1	0,1	-0,1
287	298,00	-299,80	500,92	0,0	0,2	0,3	-1,80	-0,84	1,26	2,35	0,0	0,2	0,3
288	298,00	-200,50	500,52	0,0	0,1	0,1	-2,87	-1,13	0,88	3,21	0,0	0,1	0,1
289	296,90	-101,90	500,42	0,2	0,2	-0,1	-3,04	-1,91	0,66	3,65	0,2	0,2	-0,1
290	296,80	-1,70	500,52	-0,1	0,2	-0,1	-3,43	-1,45	0,83	3,81	-0,1	0,2	-0,1
291	297,20	98,10	500,92	0,3	0,2	-0,1	-3,01	-1,80	1,13	3,68	0,3	0,2	-0,1
292	297,40	197,80	501,32	0,0	0,3	-0,2	-2,23	-2,64	1,40	3,73	0,0	0,3	-0,2
293	298,10	298,30	501,92	-0,1	0,3	-0,2	-1,96	-1,67	2,31	3,46	-0,1	0,3	-0,2

---

## Annexe 7 : Programmation informatique

### Modification du programme principal trCalibrTest en langage C++

```
D:\Traqueur\photo figure doc mem\modif trCalibrTest_polyfit.c 1
/* =====
 * Copyright 1999 The Board of Trustees of the University of Illinois
 * All Rights Reserved
 * Author(s): Volodymyr Kindratenko @ NCSA
 * Last Modified: December 03, 1999
 *
 * trCalibrTest_polyfit.c - example of the polynomial fit - based calibration
 *
 * modification V2 réalisée par David Sarafian :
 * lecture fichier de valeurs mesurées puis écriture du fichier des valeurs corrigées
 * =====*/

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "calibfile.h"
#include "polyfit.h"
#define TAILLEF 40

int atoi_(char *c)
{
    int rep;
    sscanf(c, "%d", &rep);
    return rep;
}

main (int argc, char **argv)
{
    struct calibdata cdata;
    struct fpolynomials fpol;
    int porder, rottype = DEGREES;
    float xm, ym, zm, axm, elm, rlm;
    float xf, yf, zf, axf, elf, rlf;
    int i;

    FILE *fm;
    FILE *fc;
    char nomfichier [TAILLEF];
    char nomfcm [TAILLEF];
    char c;
    int nombreligne;

    if (argc != 3)
    {
        printf("Usage: %s calibration.file polyorder\n", argv[0]);
        printf("      polyorder: order of the polynomial to be used\n");
        exit(0);
    }

    porder = atoi_(argv[2]); /* order of the fitting polynomial */

    /* read calibration file */
    if (!readcalibfile(argv[1], &cdata, rottype))
    {
        printf("Unable to read data file\n");
        exit(0);
    }
    else
        printf("file %s containing %i records is loaded\n", argv[1], cdata.M);

    writecalibfile("test.dat", &cdata, DEGREES);

    /* build fitting polynomials */
    if (!fit_initialize(&cdata, porder, &fpol))
    {
        printf("Unable to build polynomials\n");
        exit(0);
    }
    else
    {
        printf("fitting polynomials of the order %i (%i terms) are build for all 6 variables\n",
            , porder, fpol.N);
        for(i=0; i<fpol.N; i++) printf("%g\n", fpol.cx[i]);
    }
}

```

```

}
/* free memory that was allocated for the calibration file */
deletecalibdata(&cdata);

printf("Entrer le nom du fichier avec son extension devant contenir les valeurs mesurées:");
);
printf("\n");
scanf("%s", nomfichier);

printf("Entrer le nombre de ligne du fichier avec son extension devant contenir les
valeurs mesurées: ");
printf("\n");
scanf("%d", &nombreligne);

printf("Entrer le nom du fichier avec son extension devant contenir les valeurs corrigées");
);
printf("\n");
scanf("%s", nomfichier);
fm=fopen(nomfichier, "r");
fc=fopen(nomfichier, "w");

/* run the loop */
for (i=0; i<nombreligne; i++)
/*while (1)*/
{
/* angles are in the same units as in the calibration file */
fscanf(fm, "%f\t %f\t %f\t %f\t %f\t %f", &xm, &ym, &zm, &azm, &elm, &rlm);

do {
fscanf(fm, "%c", &c);
}
while (c!='\n');

/* printf("enter measured values of x, y, z, az, el, and rl:\n");
scanf("%f %f %f %f %f %f", &xm, &ym, &zm, &azm, &elm, &rlm);*/

if (rottype == DEGREES)
{
azm *= (3.14159F / 180.0F);
elm *= (3.14159F / 180.0F);
rlm *= (3.14159F / 180.0F);
}

fit evaluate(&fpol, xm, ym, zm, azm, elm, rlm,
&xf, &yf, &zf, &azf, &elf, &rlf);

if (rottype == DEGREES)
{
azf *= (180.0F / 3.14159F);
elf *= (180.0F / 3.14159F);
rlf *= (180.0F / 3.14159F);
}

/*printf("corrected values are: %2.2f %2.2f %2.2f %2.2f %2.2f %2.2f\n\n",
xf, yf, zf, azf, elf, rlf);*/
fprintf(fc, "%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f\n", xf, yf, zf, azf, elf, rlf);
}
fclose(fm);
fclose(fc);
}

```

---

## Programme réalisé pour appliquer la fonction dite de « proximité » en langage Matlab

```
14/02/13 15:12 D:\Traqueur\photo figure doc mem\prog matlab invinterp38.m
%invinterp38 xyz
% interpolation corrective
% sélection par boîte de dialogue du fichier de mapping .txt au format
XmYm...XYZO1O2O3.
% sans en tête avec tri des valeurs par ordre croissant pour les données Z
% puis Y et enfin X
% saisie du format du mapping xligne y colonne z hauteur
% choix de la méthode d'interpolation et correction par menu
% selection du fichier contenant les coordonnées xi,yi,zi à interpoler
% écriture du fichier au format txt des valeurs interpolées
% pas de traitement des angles
clear all
[filename,PathName] = uigetfile('*.txt','Selectionner le fichier de cartographie 3D
contenant les valeurs exactes et mesurées');
ficmap=load(filename); %chargement fichier de mapping
X =ficmap(:,1);
Y =ficmap(:,2);
Z =ficmap(:,3);
%O1, O2,O3 inutile car =0 en théorie
Xm=ficmap(:,7);
Ym=ficmap(:,8);
Zm=ficmap(:,9);
O1m=ficmap(:,10);
O2m=ficmap(:,11);
O3m=ficmap(:,12);
% RE écriture du fichier de mapping au format meshgrid
%écriture d'une matrice quivalente à meshgrid(1:3)
%écriture de matrices de dimension nblx nbcy nbpz soit nbtp points
nblx = input('Entrer la nombre de ligne d''abscisse X de la surface cartographiée :
');
nbcy = input('Entrer la nombre de colonne d''ordonnée Y de la surface cartographiée
:
');
nbpz = input('Entrer la nombre de plan Z en hauteur de la surface cartographiée :
');
nbz=nblx*nbcy;
nbtp=nblx*nbcy*nbpz;
disp(['le nombre de valeurs Z par plan est : ' num2str(nbz)]);
disp(['le nombre total de points est : ' num2str(nbtp)]);
m=1;
n=1;
l=1;
for i=1:1:nbcy
for j=1:1:nblx
for k=1:1:nbpz
xm(i,j,k)=Xm(m); %écriture de xm el ligne
ym(i,j,k)=Ym(m); % écriture de ym en colonne
zm(i,j,k)=Zm(n); % écriture de zm en table 3d
x(i,j,k)=X(l);% écriture de x au fil de D à G et au même dim que xm ou ym
ou zm
y(i,j,k)=Y(l);% idem
z(i,j,k)=Z(l); % idem
azm(i,j,k)=O1m(l); % inutile car non utilisé
elm(i,j,k)=O2m(l); % idem
rlm(i,j,k)=O3m(l); % idem
l=l+nbz;
n=n+nbz;
end
m=m+1;
n=1;
l=m;
end
end
% chargement du fichier des valeurs à interpolés
```

---

```

[filenamei,PathName] = uigetfile('*.txt','Selectionner le fichier contenant les
valeurs à interpoler');
ficvai=load(filenamei); %chargement fichier de mapping
Xai =ficvai(:,1); % chargement par colonne des valeurs à interpoler
Yai =ficvai(:,2);
Zai =ficvai(:,3);
%O1ai=ficvai(:,4); % inutile car dans ce cas les angles sont constant et
%égaux à 0. sinon utiliser interp
%O2ai=ficvai(:,5);
%O3ai=ficvai(:,6);
nbe=length(Xai); %nombre de point du fichier
choixm = menu('choisissez la méthode d''interpolation :
','linear','cubic','spline','nearest');
methode = {'linear','cubic','spline','nearest'};
% traitement de l'interpolation
for i=1:nbe
Xinterpc(i)=interp3(xm,ym,zm,x,Xai(i),Yai(i),Zai(i),methode{choixm});
%interpolation
à la valeur xi
Yinterpc(i)=interp3(xm,ym,zm,y,Xai(i),Yai(i),Zai(i),methode{choixm});
%interpolation
à la valeur yi
Zinterpc(i)=interp3(xm,ym,zm,z,Xai(i),Yai(i),Zai(i),methode{choixm});
%interpolation
à la valeur zi
Azinterpc(i)=interp3(x,y,z,azm,Xai(i),Yai(i),Zai(i),methode{choixm});
%interpolation
az au point xiyizi
Elinterpc(i)=interp3(x,y,z,elm,Xai(i),Yai(i),Zai(i),methode{choixm});
%interpolation
el au point xiyizi
Rlinterpc(i)=interp3(x,y,z,rlm,Xai(i),Yai(i),Zai(i),methode{choixm});
%interpolation
rl au point xiyizi
end
B=[Xinterpc;Yinterpc;Zinterpc;Azinterpc;Elinterpc;Rlinterpc];
A=B'%passage de matrice colonne à matrice ligne
nomficvi = input('Entrer le nom du fichier à créer devant contenir les valeurs
interpolées : ','s');
fid = fopen([nomficvi '.txt'],'w');
%pour tous les enregistrements
for col = 1:size(A,1) %nb de lignes
%on vient de sélectionner une ligne
trame = []; %init de la trame ou vider la trame
%balayer tous les champs de cette ligne
for li = 1:size(A,2) %nbre_champs
%contruire la trame
trame = [trame num2str( A(col,li) ) '\t'];
end %for toute les col de la ligne sont écrites
trame = [trame '\r\n']; %ajouter: retour ligne, nouvelle ligne
fprintf(fid,trame); %écrire cette trame dans le fichier texte = écrire 1
ligne
end %for
fclose(fid);

```

Fichier de test des valeurs sélectionnées dans le format du tableur Excel

Valeurs à corriger du fichier fvac20ptsim4.txt et valeurs de référence correspondantes

	n°pos.	Coordonnées de référence						Coordonnées mesurées et simulées à corriger						
		X	Y	Z	az	el	rl	X	Y	Z	az	el	rl	
Positions mesurées existantes avec ajout d'écarts simulés	1	<b>60</b>	-199,97	100,22	99,55	0,0	0,0	0,0	-187,20	102,80	104,30	0,7	1,1	-0,7
	2	<b>67</b>	-99,99	100,34	99,50	0,0	0,0	0,0	-86,90	100,00	102,70	0,8	1,1	-1,0
	3	<b>108</b>	-199,95	0,17	199,53	0,0	0,0	0,0	-188,00	2,60	202,80	0,8	0,7	-0,9
	4	<b>109</b>	-199,97	100,17	199,50	0,0	0,0	0,0	-174,30	100,40	204,10	1,1	1,0	-0,5
	5	<b>110</b>	-199,99	200,17	199,50	0,0	0,0	0,0	-171,30	199,00	204,50	1,4	1,0	-0,3
	6	<b>116</b>	-99,97	100,03	199,45	0,0	0,0	0,0	-75,10	95,90	202,70	1,1	1,0	-0,5
	7	<b>122</b>	0,05	0,05	199,47	0,0	0,0	0,0	12,60	-5,10	200,80	1,1	0,8	-1,0
	8	<b>124</b>	0,01	200,05	199,49	0,0	0,0	0,0	17,30	191,80	201,30	1,4	1,2	-0,2
	9	<b>158</b>	-199,89	100,05	299,54	0,0	0,0	0,0	-182,20	98,80	303,90	1,0	0,7	-0,2
	10	<b>165</b>	-99,76	100,11	299,50	0,0	0,0	0,0	-82,30	94,90	303,10	1,0	0,7	-0,2
Positions mesurées avec écarts "naturels"	11	24	0,00	0,00	49,56	0,0	0,0	0,0	-0,40	2,10	49,70	0,2	0,9	-1,8
	12	40	200,06	200,15	49,69	0,0	0,0	0,0	206,00	192,00	49,30	0,8	1,4	-1,2
	13	73	0,03	0,10	99,52	0,0	0,0	0,0	0,70	-0,50	100,10	0,7	0,8	-1,4
	14	89	200,00	200,14	99,75	0,0	0,0	0,0	205,50	189,60	99,20	1,5	1,5	-1,1
	15	138	200,33	200,05	199,68	0,0	0,0	0,0	208,40	187,70	199,40	1,8	1,2	-0,8
	16	171	0,11	-0,19	299,52	0,0	0,0	0,0	4,80	-7,40	301,70	0,7	0,7	-0,6
	17	187	199,97	199,92	299,73	0,0	0,0	0,0	210,70	185,00	299,40	1,5	1,2	-0,4
	18	220	1,05	0,05	399,50	0,0	0,0	0,0	6,50	-9,00	402,20	0,9	0,6	-0,2
	19	236	200,22	199,88	399,57	0,0	0,0	0,0	211,80	184,30	400,00	1,5	1,0	-0,2
	20	269	0,67	0,11	499,40	0,0	0,0	0,0	6,90	-9,70	502,60	1,3	0,5	0,0
			en mm			en °			en mm			en °		

Fichier de test avec les mêmes valeurs que celles du tableau vert ci-dessus mais au format « txt » lu et utilisé et par le logiciel de correction

Fichier fvac20ptsim4.txt

```

-187.2 102.8 104.3 0.7 1.1 -0.7
-86.9 100.0 102.7 0.8 1.1 -1.0
-188.0 2.6 202.8 0.8 0.7 -0.9
-174.3 100.4 204.1 1.1 1.0 -0.5
-171.3 199.0 204.5 1.4 1.0 -0.3
-75.1 95.9 202.7 1.1 1.0 -0.5
12.6 -5.1 200.8 1.1 0.8 -1.0
17.3 191.8 201.3 1.4 1.2 -0.2
-182.2 98.8 303.9 1.0 0.7 -0.2
-82.3 94.9 303.1 1.0 0.7 -0.2
-0.4 2.1 49.7 0.2 0.9 -1.8
206.0 192.0 49.3 0.8 1.4 -1.2
0.7 -0.5 100.1 0.7 0.8 -1.4
205.5 189.6 99.2 1.5 1.5 -1.1
208.4 187.7 199.4 1.8 1.2 -0.8
4.8 -7.4 301.7 0.7 0.7 -0.6
210.7 185.0 299.4 1.5 1.2 -0.4
6.5 -9.0 402.2 0.9 0.6 -0.2
211.8 184.3 400.0 1.5 1.0 -0.2
6.9 -9.7 502.6 1.3 0.5 0.0
    
```

## Annexe 8 : Application des corrections

Application de la correction basée sur l'interpolation logarithmique  
Valeurs X,Y,Z (mm), Az,El,Rl (°)

	n° de la position	Valeurs d'entrées : Valeurs mesurées à corriger correspondant aux valeurs entières, fichier fvac20psim4.txt						Valeurs exactes attendues						Valeurs corrigées						
		Xm	Ym	Zm	Azm	Elm	Rlm	Xe	Ye	Ze	Aze	Ele	Rle	Xc	Yc	Zc	Azc	Elc	Rlc	
Valeurs de positions mesurées existantes présentant une forte déformation	1	<b>60</b>	<b>-187,2</b>	<b>102,8</b>	<b>104,3</b>	<b>0,7</b>	<b>1,1</b>	<b>-0,7</b>	<b>-199,95</b>	<b>100,02</b>	<b>99,92</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-185,60</b>	<b>96,25</b>	<b>102,45</b>	<b>0,7</b>	<b>0,1</b>	<b>0,9</b>
	2	<b>67</b>	<b>-86,9</b>	<b>100,0</b>	<b>102,7</b>	<b>0,8</b>	<b>1,1</b>	<b>-1,0</b>	<b>-99,96</b>	<b>99,98</b>	<b>99,90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-89,16</b>	<b>102,70</b>	<b>100,89</b>	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>	<b>-0,1</b>
	3	<b>108</b>	<b>-188,0</b>	<b>2,6</b>	<b>202,8</b>	<b>0,8</b>	<b>0,7</b>	<b>-0,9</b>	<b>-200,05</b>	<b>0,01</b>	<b>199,94</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-199,96</b>	<b>0,15</b>	<b>199,48</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
	4	<b>109</b>	<b>-174,3</b>	<b>100,4</b>	<b>204,1</b>	<b>1,1</b>	<b>1,0</b>	<b>-0,5</b>	<b>-199,95</b>	<b>100,02</b>	<b>199,92</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-174,30</b>	<b>100,40</b>	<b>204,10</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
	5	<b>110</b>	<b>-171,3</b>	<b>199,0</b>	<b>204,5</b>	<b>1,4</b>	<b>1,0</b>	<b>-0,3</b>	<b>-199,93</b>	<b>200,00</b>	<b>199,93</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-196,97</b>	<b>198,73</b>	<b>199,95</b>	<b>0,3</b>	<b>0,0</b>	<b>0,2</b>
	6	<b>116</b>	<b>-75,1</b>	<b>95,9</b>	<b>202,7</b>	<b>1,1</b>	<b>1,0</b>	<b>-0,5</b>	<b>-99,96</b>	<b>99,98</b>	<b>199,90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-100,01</b>	<b>99,99</b>	<b>199,50</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
	7	<b>122</b>	<b>12,6</b>	<b>-5,1</b>	<b>200,8</b>	<b>1,1</b>	<b>0,8</b>	<b>-1,0</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>199,90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>7,87</b>	<b>4,22</b>	<b>201,15</b>	<b>-0,6</b>	<b>-0,2</b>	<b>0,0</b>
	8	<b>124</b>	<b>17,3</b>	<b>191,8</b>	<b>201,3</b>	<b>1,4</b>	<b>1,2</b>	<b>-0,2</b>	<b>0,06</b>	<b>199,99</b>	<b>199,90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,02</b>	<b>200,10</b>	<b>199,47</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
	9	<b>158</b>	<b>-182,2</b>	<b>98,8</b>	<b>303,9</b>	<b>1,0</b>	<b>0,7</b>	<b>-0,2</b>	<b>-199,95</b>	<b>100,02</b>	<b>299,92</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-200,13</b>	<b>104,22</b>	<b>300,26</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
	10	<b>165</b>	<b>-82,3</b>	<b>94,9</b>	<b>303,1</b>	<b>1,0</b>	<b>0,7</b>	<b>-0,2</b>	<b>-99,96</b>	<b>99,98</b>	<b>299,90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-99,93</b>	<b>100,20</b>	<b>299,47</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
Valeurs de positions mesurées existantes ne présentant pas de déformation	11	24	-0,4	2,1	49,7	0,2	0,9	-1,8	0,00	0,00	49,56	0	0	0	-3,34	8,03	50,44	-1,1	-0,1	-0,4
	12	40	206,0	192,0	49,3	0,8	1,4	-1,2	200,06	200,15	49,69	0	0	0	200,07	200,11	49,73	0,0	0,0	0,0
	13	73	0,7	-0,5	100,1	0,7	0,8	-1,4	0,03	0,10	99,52	0	0	0	-2,23	5,42	100,85	-0,6	-0,2	0,0
	14	89	205,5	189,6	99,2	1,5	1,5	-1,1	200,00	200,14	99,75	0	0	0	200,02	200,16	99,78	0,0	0,0	0,0
	15	138	208,4	187,7	199,4	1,8	1,2	-0,8	200,33	200,05	199,68	0	0	0	200,30	200,01	199,70	0,0	0,0	0,0
	16	171	4,8	-7,4	301,7	0,7	0,7	-0,6	0,11	-0,19	299,52	0	0	0	-3,10	4,18	300,53	-0,6	-0,1	-0,2
	17	187	210,7	185,0	299,4	1,5	1,2	-0,4	199,97	199,92	299,73	0	0	0	199,95	199,74	299,63	0,0	0,0	0,0
	18	220	6,5	-9,0	402,2	0,9	0,6	-0,2	1,05	0,05	399,50	0	0	0	1,08	0,06	399,49	0,0	0,0	0,0
	19	236	211,8	184,3	400,0	1,5	1,0	-0,2	200,22	199,88	399,57	0	0	0	200,16	202,66	400,71	-0,3	0,1	0,3
	20	<b>269</b>	6,9	-9,7	502,6	1,3	0,5	0,0	0,67	0,11	499,40	0	0	0	-2,72	1,57	499,68	0,4	-0,1	0,4

Annexe 8 : Application de la correction basée sur la forme polynomiale d'ordre 2  
Valeurs X,Y,Z (mm), Az,El,Rl (°)

	n° de la position	Valeurs d'entrées : Valeurs mesurées à corriger correspondant aux valeurs entières, fichier fvac20ptsim4.txt						Valeurs exactes attendues						valeurs corrigées						
		Xm	Ym	Zm	Azm	Elm	Rlm	Xe	Ye	Ze	Aze	Ele	Rle	Xc	Yc	Zc	Azc	Elc	Rlc	
Valeurs de positions mesurées existantes présentant une forte déformation	1	<b>60</b>	<b>-187,2</b>	<b>102,8</b>	<b>104,3</b>	<b>0,7</b>	<b>1,1</b>	<b>-0,7</b>	<b>-199,95</b>	<b>100,02</b>	<b>99,92</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-192,12</b>	<b>100,10</b>	<b>99,95</b>	<b>0,3</b>	<b>-0,1</b>	<b>0,0</b>
	2	<b>67</b>	<b>-86,9</b>	<b>100,0</b>	<b>102,7</b>	<b>0,8</b>	<b>1,1</b>	<b>-1,0</b>	<b>-99,96</b>	<b>99,98</b>	<b>99,90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-91,93</b>	<b>100,73</b>	<b>99,92</b>	<b>0,2</b>	<b>-0,1</b>	<b>-0,1</b>
	3	<b>108</b>	<b>-188,0</b>	<b>2,6</b>	<b>202,8</b>	<b>0,8</b>	<b>0,7</b>	<b>-0,9</b>	<b>-200,05</b>	<b>0,01</b>	<b>199,94</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-192,11</b>	<b>1,06</b>	<b>199,61</b>	<b>0,3</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,2</b>
	4	<b>109</b>	<b>-174,3</b>	<b>100,4</b>	<b>204,1</b>	<b>1,1</b>	<b>1,0</b>	<b>-0,5</b>	<b>-199,95</b>	<b>100,02</b>	<b>199,92</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-182,72</b>	<b>101,56</b>	<b>199,63</b>	<b>0,4</b>	<b>0,0</b>	<b>-0,1</b>
	5	<b>110</b>	<b>-171,3</b>	<b>199,0</b>	<b>204,5</b>	<b>1,4</b>	<b>1,0</b>	<b>-0,3</b>	<b>-199,93</b>	<b>200,00</b>	<b>199,93</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-183,69</b>	<b>201,67</b>	<b>199,56</b>	<b>0,4</b>	<b>0,0</b>	<b>-0,1</b>
	6	<b>116</b>	<b>-75,1</b>	<b>95,9</b>	<b>202,7</b>	<b>1,1</b>	<b>1,0</b>	<b>-0,5</b>	<b>-99,96</b>	<b>99,98</b>	<b>199,90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-83,42</b>	<b>100,50</b>	<b>199,70</b>	<b>0,2</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
	7	<b>122</b>	<b>12,6</b>	<b>-5,1</b>	<b>200,8</b>	<b>1,1</b>	<b>0,8</b>	<b>-1,0</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>199,90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>7,36</b>	<b>-0,44</b>	<b>200,43</b>	<b>0,2</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
	8	<b>124</b>	<b>17,3</b>	<b>191,8</b>	<b>201,3</b>	<b>1,4</b>	<b>1,2</b>	<b>-0,2</b>	<b>0,06</b>	<b>199,99</b>	<b>199,90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6,31</b>	<b>200,82</b>	<b>198,99</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
	9	<b>158</b>	<b>-182,2</b>	<b>98,8</b>	<b>303,9</b>	<b>1,0</b>	<b>0,7</b>	<b>-0,2</b>	<b>-199,95</b>	<b>100,02</b>	<b>299,92</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-192,75</b>	<b>101,95</b>	<b>299,01</b>	<b>0,1</b>	<b>-0,1</b>	<b>-0,1</b>
	10	<b>165</b>	<b>-82,3</b>	<b>94,9</b>	<b>303,1</b>	<b>1,0</b>	<b>0,7</b>	<b>-0,2</b>	<b>-99,96</b>	<b>99,98</b>	<b>299,90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-92,64</b>	<b>101,75</b>	<b>299,59</b>	<b>-0,1</b>	<b>-0,1</b>	<b>0,0</b>
Valeurs de positions mesurées existantes ne présentant pas de déformation	11	24	-0,4	2,1	49,7	0,2	0,9	-1,8	0,00	0,00	49,56	0	0	0	-0,33	-0,60	50,57	-0,2	-0,1	0,1
	12	40	206,0	192,0	49,3	0,8	1,4	-1,2	200,06	200,15	49,69	0	0	0	201,41	200,17	49,34	-0,3	0,0	0,0
	13	73	0,7	-0,5	100,1	0,7	0,8	-1,4	0,03	0,10	99,52	0	0	0	-1,32	-0,57	100,53	0,1	-0,1	0,2
	14	89	205,5	189,6	99,2	1,5	1,5	-1,1	200,00	200,14	99,75	0	0	0	198,95	199,70	99,13	0,3	0,1	-0,2
	15	138	208,4	187,7	199,4	1,8	1,2	-0,8	200,33	200,05	199,68	0	0	0	198,92	201,02	199,16	0,4	0,0	-0,2
	16	171	4,8	-7,4	301,7	0,7	0,7	-0,6	0,11	-0,19	299,52	0	0	0	-2,21	0,47	300,27	-0,4	0,0	0,0
	17	187	210,7	185,0	299,4	1,5	1,2	-0,4	199,97	199,92	299,73	0	0	0	199,68	200,44	299,01	0,0	0,1	-0,1
	18	220	6,5	-9,0	402,2	0,9	0,6	-0,2	1,05	0,05	399,50	0	0	0	-0,98	1,24	399,84	-0,3	0,0	0,0
	19	236	211,8	184,3	400,0	1,5	1,0	-0,2	200,22	199,88	399,57	0	0	0	200,57	200,77	399,48	0,0	0,0	0,0
	20	<b>269</b>	6,9	-9,7	502,6	1,3	0,5	0,0	0,67	0,11	499,40	0	0	0	0,31	1,79	499,32	0,2	-0,1	0,0

Annexe 8 : Application de la correction basée sur la forme polynomiale d'ordre 10  
Valeurs X,Y,Z (mm), Az,El,Rl (°)

	n° de la position	Valeurs d'entrées : Valeurs mesurées à corriger correspondant aux valeurs entières, fichier fvac20ptsim4.txt						Valeurs exactes attendues						valeurs corrigées						
		Xm	Ym	Zm	Azm	Elm	Rlm	Xe	Ye	Ze	Aze	Ele	Rle	Xc	Yc	Zc	Azc	Elc	Rlc	
Valeurs de positions mesurées existantes présentant une forte déformation	1	<b>60</b>	<b>-187,2</b>	<b>102,8</b>	<b>104,3</b>	<b>0,7</b>	<b>1,1</b>	<b>-0,7</b>	<b>-199,95</b>	<b>100,02</b>	<b>99,92</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-199,52</b>	<b>100,34</b>	<b>99,61</b>	<b>0,0</b>	<b>-0,1</b>	<b>0,0</b>
	2	<b>67</b>	<b>-86,9</b>	<b>100,0</b>	<b>102,7</b>	<b>0,8</b>	<b>1,1</b>	<b>-1,0</b>	<b>-99,96</b>	<b>99,98</b>	<b>99,90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-99,48</b>	<b>100,36</b>	<b>99,32</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
	3	<b>108</b>	<b>-188,0</b>	<b>2,6</b>	<b>202,8</b>	<b>0,8</b>	<b>0,7</b>	<b>-0,9</b>	<b>-200,05</b>	<b>0,01</b>	<b>199,94</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-199,64</b>	<b>0,10</b>	<b>199,44</b>	<b>-0,1</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
	4	<b>109</b>	<b>-174,3</b>	<b>100,4</b>	<b>204,1</b>	<b>1,1</b>	<b>1,0</b>	<b>-0,5</b>	<b>-199,95</b>	<b>100,02</b>	<b>199,92</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-200,93</b>	<b>99,97</b>	<b>199,58</b>	<b>-0,1</b>	<b>0,0</b>	<b>-0,1</b>
	5	<b>110</b>	<b>-171,3</b>	<b>199,0</b>	<b>204,5</b>	<b>1,4</b>	<b>1,0</b>	<b>-0,3</b>	<b>-199,93</b>	<b>200,00</b>	<b>199,93</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-199,31</b>	<b>200,30</b>	<b>199,43</b>	<b>0,2</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
	6	<b>116</b>	<b>-75,1</b>	<b>95,9</b>	<b>202,7</b>	<b>1,1</b>	<b>1,0</b>	<b>-0,5</b>	<b>-99,96</b>	<b>99,98</b>	<b>199,90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-99,86</b>	<b>99,60</b>	<b>199,55</b>	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>
	7	<b>122</b>	<b>12,6</b>	<b>-5,1</b>	<b>200,8</b>	<b>1,1</b>	<b>0,8</b>	<b>-1,0</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>199,90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,87</b>	<b>-0,07</b>	<b>199,52</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
	8	<b>124</b>	<b>17,3</b>	<b>191,8</b>	<b>201,3</b>	<b>1,4</b>	<b>1,2</b>	<b>-0,2</b>	<b>0,06</b>	<b>199,99</b>	<b>199,90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-0,14</b>	<b>200,04</b>	<b>199,60</b>	<b>-0,2</b>	<b>0,0</b>	<b>-0,1</b>
	9	<b>158</b>	<b>-182,2</b>	<b>98,8</b>	<b>303,9</b>	<b>1,0</b>	<b>0,7</b>	<b>-0,2</b>	<b>-199,95</b>	<b>100,02</b>	<b>299,92</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-199,25</b>	<b>100,28</b>	<b>299,56</b>	<b>0,2</b>	<b>-0,1</b>	<b>0,0</b>
	10	<b>165</b>	<b>-82,3</b>	<b>94,9</b>	<b>303,1</b>	<b>1,0</b>	<b>0,7</b>	<b>-0,2</b>	<b>-99,96</b>	<b>99,98</b>	<b>299,90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-99,29</b>	<b>100,42</b>	<b>299,47</b>	<b>0,0</b>	<b>-0,1</b>	<b>0,0</b>
Valeurs de positions mesurées existantes ne présentant pas de déformation	11	24	-0,4	2,1	49,7	0,2	0,9	-1,8	0,00	0,00	49,56	0	0	0	0,25	0,11	49,57	0,2	0,0	0,0
	12	40	206,0	192,0	49,3	0,8	1,4	-1,2	200,06	200,15	49,69	0	0	0	199,80	200,06	49,72	-0,1	0,0	0,0
	13	73	0,7	-0,5	100,1	0,7	0,8	-1,4	0,03	0,10	99,52	0	0	0	0,01	0,19	99,32	-0,2	0,0	-0,1
	14	89	205,5	189,6	99,2	1,5	1,5	-1,1	200,00	200,14	99,75	0	0	0	200,27	200,31	99,86	0,2	-0,1	0,0
	15	138	208,4	187,7	199,4	1,8	1,2	-0,8	200,33	200,05	199,68	0	0	0	200,26	199,71	199,84	-0,3	0,0	-0,1
	16	171	4,8	-7,4	301,7	0,7	0,7	-0,6	0,11	-0,19	299,52	0	0	0	0,65	-0,28	299,68	0,1	0,0	0,0
	17	187	210,7	185,0	299,4	1,5	1,2	-0,4	199,97	199,92	299,73	0	0	0	199,89	199,78	299,65	0,0	0,0	0,0
	18	220	6,5	-9,0	402,2	0,9	0,6	-0,2	1,05	0,05	399,50	0	0	0	0,04	0,10	399,51	-0,2	0,0	-0,1
	19	236	211,8	184,3	400,0	1,5	1,0	-0,2	200,22	199,88	399,57	0	0	0	200,60	200,25	399,56	0,2	0,0	0,0
	20	<b>269</b>	6,9	-9,7	502,6	1,3	0,5	0,0	0,67	0,11	499,40	0	0	0	-1,91	1,60	499,22	0,8	-0,3	0,2

## Annexe 9 : Exemples d'analyse statistique

Exemple du test Anova pour les valeurs X traitées par la méthode de correction à forme polynomiale d'ordre 2 à 10

Tableau ANOVA pour DXe-c

	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	Valeur de F	Valeur de p	Lambda	Puissance
correction	8	363,297	45,412	4,157	,0001	33,258	,995
Résidu	171	1867,920	10,924				

Tableau de moyennes pour DXe-c

Effet : correction

	Nombre	Moyenne	Dév. Std.	Err. Std.
rpfO10	20	-,026	,792	,177
rpfO2	20	-4,725	6,454	1,443
rpfO3	20	-3,287	4,811	1,076
rpfO4	20	-2,592	3,968	,887
rpfO5	20	-1,755	2,820	,631
rpfO6	20	-1,322	1,918	,429
rpfO7	20	-1,167	1,508	,337
rpfO8	20	-,743	1,376	,308
rpfO9	20	-,430	1,157	,259

Test PLSD de Fisher pour DXe-c

Effet : correction

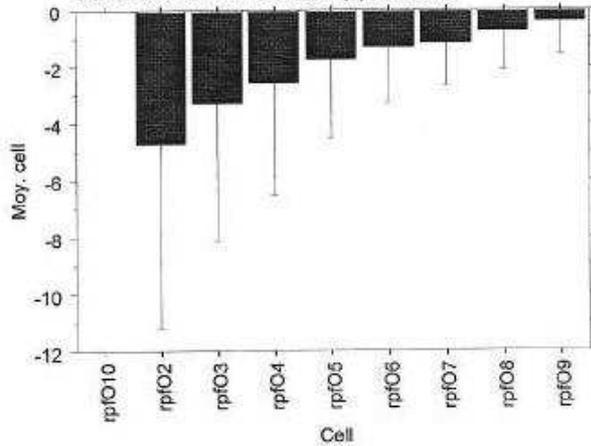
Niveau de significativité : 5 %

	Diff. moy.	Diff. crit.	Valeur p	
rpfO10, rpfO2	4,699	2,063	<,0001	S
rpfO10, rpfO3	3,261	2,063	,0021	S
rpfO10, rpfO4	2,566	2,063	,0151	S
rpfO10, rpfO5	1,728	2,063	,1000	
rpfO10, rpfO6	1,296	2,063	,2168	
rpfO10, rpfO7	1,141	2,063	,2767	
rpfO10, rpfO8	,717	2,063	,4937	
rpfO10, rpfO9	,404	2,063	,6999	
rpfO2, rpfO3	-1,438	2,063	,1707	
rpfO2, rpfO4	-2,133	2,063	,0428	S
rpfO2, rpfO5	-2,970	2,063	,0050	S
rpfO2, rpfO6	-3,403	2,063	,0014	S
rpfO2, rpfO7	-3,558	2,063	,0008	S
rpfO2, rpfO8	-3,982	2,063	,0002	S
rpfO2, rpfO9	-4,295	2,063	<,0001	S
rpfO3, rpfO4	-,695	2,063	,5068	
rpfO3, rpfO5	-1,533	2,063	,1444	
rpfO3, rpfO6	-1,965	2,063	,0618	
rpfO3, rpfO7	-2,120	2,063	,0440	S
rpfO3, rpfO8	-2,544	2,063	,0160	S
rpfO3, rpfO9	-2,857	2,063	,0069	S
rpfO4, rpfO5	-,837	2,063	,4242	
rpfO4, rpfO6	-1,270	2,063	,2260	
rpfO4, rpfO7	-1,425	2,063	,1745	
rpfO4, rpfO8	-1,849	2,063	,0787	
rpfO4, rpfO9	-2,162	2,063	,0401	S
rpfO5, rpfO6	-,433	2,063	,6794	
rpfO5, rpfO7	-,588	2,063	,5746	
rpfO5, rpfO8	-1,012	2,063	,3345	
rpfO5, rpfO9	-1,325	2,063	,2067	
rpfO6, rpfO7	-,155	2,063	,8822	
rpfO6, rpfO8	-,579	2,063	,5804	
rpfO6, rpfO9	-,892	2,063	,3945	
rpfO7, rpfO8	-,424	2,063	,6856	
rpfO7, rpfO9	-,737	2,063	,4817	
rpfO8, rpfO9	-,313	2,063	,7648	

Graphique des interactions pour DXe-c

Effet : correction

Barres d'erreur: ± 1 Déviation(s) standard



---

## **Annexe 10 : Activité professionnelle**

### *Liste des écrits et co-écrits réalisés par David SARAFIAN :*

#### **Rapports de stage de fin d'études :**

- Ergonomie et performances acoustiques de bouchons d'oreilles en aéronautique militaire, Mémoire du diplôme « Bases Facteurs Humains pour la Conception de Systèmes Homme-Machine en Aéronautique », 2011, Université Paris-Descartes
- Synchronisation d'horloges par réseaux de satellites, Examen probatoire du CNAM, 2004
- Développement d'un banc de mesures de bruits électriques basses fréquences, rapport de stage de fin d'étude Maîtrise du 1/03/01 au 13/07/01, au laboratoire d'étude de l'intégration des composants et systèmes électroniques IXL à l'Université de Bordeaux I
- Mesure de bruit électrique basse fréquence, rapport bibliographique présenté le 15/02/01 au département Génie Électrique et Informatique Industrielle à l'Université de Bordeaux I
- Mesure de concentration en gaz respiratoires sur un sujet soumis aux accélérations, rapport de stage de fin d'étude Diplôme de Qualification Supérieure (DQS) en Électronique Mesure et Essais du 19/04/93 au 11/06/93 au laboratoire de médecine aérospatiale (LAMAS) à Brétigny sur Orge
- Développement d'un banc de certification d'antigivrage pour le bec interne du Falcon 2000, rapport de stage de fin d'étude DUT Mesures Physiques, été 1991 chez Dassault Aviation à Vélizy

#### **Communications publiées dans des actes de congrès**

Sarafian D., Pellieux L., Bouy J-C., Blancard C. & Delor C. (2009) Attenuation assessment of a flight customized helmet: comparison of attenuation values with MIRE (ANSI 12.42) and REAT (ISO 4869-1) methods. Communication orale à Euronoise, Edimbourg (Royaume-Uni), 26-28 octobre

Sarafian D., Pellieux L., Bouy J-C. & Andéol G. (2010) 3D sound in the helicopter environment: localisation performance. Communication affichée au 40<sup>th</sup> International Symposium on Auditory and Audiological Research, Elseneur (Danemark), 26-28 août, proceedings pp.243-251.

V. Zimpfer, D. Sarafian, K. Buck and P. Hamery (2012), Spatial Localization of Sounds with Hearing Protection Devices Allowing Speech Communication. Communication affichée au ACOUSTICS 2012, Nantes, France, 23-27 avril 2012

Sarafian D., Andéol G., (2012) Acoustic and ergonomic characteristics of earplugs in military aeronautics Communication affichée au congrès Euronoise 2012, Prague (Tchèque), 26-28 août.

---

### Publications récentes civiles et militaires

Abel S., Baudou J., Bjorn V., Buck K., De Boodt F., Drullman R., Henry P., James S., McKinley R., **Sarafian D.** & Van Der Veken P. (2010) Hearing Protection - Needs, Technologies, and Performance. NATO RTO HFM TG-147 Report.

Andéol G, **Sarafian D.**, Pellieux L, Roumes C, Guillaume A, (2011). Le son 3D comme interface homme/machine en milieu aéronautique, Revue Acoustique & Techniques n°66

**Sarafian D.**, Andéol G, (2012). Problématique de bouchons d'oreilles en aéronautique militaire, Revue Acoustique & Techniques n°70

### Distinction OTAN obtenue (2011) :



## Attenuation assessment of a flight customized helmet: comparison of attenuation values with MIRE (ANSI 12.42) and REAT (ISO 4869-1) methods

David Sarafian, Lionel Pelleux, Jean-Christophe Bouy, Claude Blancard, and Christèle Delor, Unité Perception, Département Adaptation aux contraintes des Systèmes Opérationnels, Institut de Recherche Biomédicale des Armées, 91223 Brétigny sur Orge, France.

### 1. INTRODUCTION

Noise and noise induced hearing loss are a common and significant problem in the military. Over the decades, the levels of noise in military environments have regularly increased. New combat aircraft are often noisier than the ones they replace<sup>1</sup>. Exposure to such high levels of noise increases awareness of hearing damage risk. The maximum noise exposure limits set by international standards and legislation have become more stringent. It is mandatory to check the noise exposure of military workers. In France, the forces apply civilian legislation<sup>2</sup> (stemming from European Union Directive 2003/10/CE<sup>3</sup>) on noise exposure without special dispensation. An accurate continuous noise dose computation usually requires the acoustical attenuation or insertion loss (IL) values<sup>4</sup> of the hearing protection device (HPD). Numerous studies have shown that the reliability of using laboratory measurement with different methods is too poor<sup>5,7</sup> to predict group hearing protector attenuation. At the French Army Biomedicine Research Institute (IRBA), we are carrying out studies into acoustic protection and the enhancement of audio performances (intelligibility, alarm perception, 3D audio)<sup>8</sup>. Recently we conducted a study to estimate the A-weighted equivalent noise level for 8h ( $L_{eq,T=8h,stat}$ ) and the occupational noise exposure for a helicopter combat pilot in flight. Firstly we measured the noise in the cockpit. Secondly we had to characterize the flight helmet attenuation performance. Two primary methods are available for measuring the HPD attenuation performance: the objective MIRE method (ANSI 12.42)<sup>9</sup> and the subjective REAT method (ISO 4869-1)<sup>12</sup>. Do different methods mean different results? Which is the best for the helicopter combat environment? In our laboratory we assessed the attenuation of customized flight helmets with the two methods. Although the study was conducted in the laboratory, we tried to be close to field measurement: the study involved 15 operational pilots wearing their own helmets, as in flight.

### 2. OVERVIEW

Two methods were available for measuring the real-world attenuation performance of helmets on individual participant: Real-Ear-at-Threshold (REAT) and Microphone-in-Real-Ear (MIRE). Both are described briefly in this part with some focus on particularities.

#### A. REAT: a subjective method

The REAT method makes subjective psychophysical measurements of attenuation by evaluating audiometric hearing threshold levels on a participant with and without HPD. The attenuation in dB provided by the HPD is equivalent to the difference between the unoccluded and the occluded threshold (figure 1). The main advantage of the REAT method is that it is able to characterize many types of HPD attenuation such as helmet,

earplug, both. This method is also referenced in an international standard<sup>10</sup>. Some drawbacks of the REAT method are described:

- It is a time-consuming experiment. Each frequency tested takes at least 30 seconds, longer if multiple frequencies are to be tested. A minimum of at least one minute is needed to test the fit in each ear
- There is an inherent variability on the listener's ability to track his own threshold. The step of the threshold (5dB) could cause an imprecision of approximately  $\pm 5$ dB for typical participants
- The frequency range is generally limited to 125 Hz up to 8 kHz in octave band
- Accurate REAT measurements require low background noise so that the open-ear thresholds are not distorted
- Values of attenuation are overestimated by a few decibels in the frequencies at or below 250Hz. This is due to physiological noise masking in the occluded ear<sup>11</sup> and reported in the note 1 of the ISO 4869-1 standard
- This method is unsuited to active noise reduction HPD

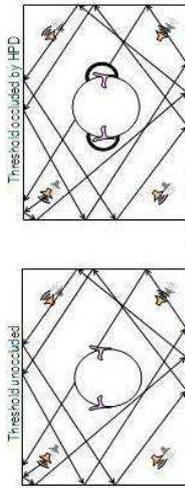


Figure 1: REAT method principle

#### B. MIRE: an objective method

In this study we consider only the MIRE method with blocked ear canal technique, i.e. a type of earplugging with a microphone and both placed in an ear canal. The microphone faces the outside. In this method, the sensor is the microphone and not the participant's hearing. The MIRE method makes objective measurements of attenuation performance. Separate measurements are made without and with an HPD in a monitored noisy sound field (figure 2). As reported in §3 of ANSI S12.42 standard, MIRE attenuation values approximate real-ear attenuation values except for low-frequency. At or below 250Hz, the MIRE attenuation values are often lower than real-ear values at threshold. Some advantages are following:

- It is an objective method, the participant's hearing is not used
- It is faster than REAT measurement, about 1min (MIRE) versus 10min (REAT) of measurement. Repetitions are easily performed
- Because each ear may be measured, it is able to measure asymmetric attenuation performance (left/right).
- The analysis may be finer than REAT: third octave band analysis with a wide range from 16 Hz up to 12 kHz
- This method is available for active noise reduction earmuff
- This method is referenced in an international standard (in ISO 11904-1) to determine noise exposure from sources close to the ear.

A drawback is that the MIRE method (blocked ear canal technique) is not available for all type of earplugs. Another drawback: this method is not used in the ISO 4869-2 standard for computation of noise dose so the noise dose estimation may be not accepted from a statutory point of view.

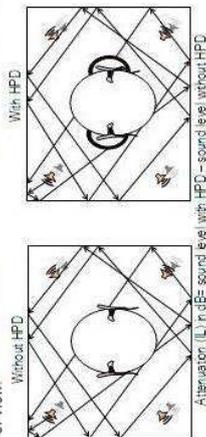


Figure 2: MIRE method principle

### 3. METHODS

**A. Participants and inclusion criteria**  
 The fifteen participants were men, highly experienced helicopter combat pilots, common users of helmets. They were recruited from 3 different squadrons and their qualifications varied from pilot to instructor. They were 39 (mean) years old (minimum 33, maximum 48). Before recording the REAT results, an inclusion process was followed by the participants. All participants had an otoscopy then an audiogram. The otoscopy assured that the ear canal was unoccluded. The audiogram took place in an audiometric room with a Grason-Stadler GSI 66 audiometer device. The audiogram had a range from 125 Hz to 8 kHz. Participants exhibited normal hearing, i.e. at least for one ear, the audiogram was compliant to age range normal hearing limits in 0.1-0.9 percentile brackets. In accordance with the REAT procedure concerning steady participant's response, each participant made 3 unoccluded tests before the attenuation measurements. In this way we checked that there was no threshold difference more than 6dB for each octave between the 3 repetitions. At the end of the tests, all the participants were in accordance with inclusion and test criteria.

### B. Hearing protectors

The hearing protector tested was TopOwl BH (Thales Company, France). This helmet (figure 3) was designed for a visual system (visor projected images concept) and had a customized helmet liner. Ear shells (figure 4) were very light (about 30g) and their position could be adjusted with an exterior roll button. All participants had their own customized helmet. The chin strap adjustment and the ear shell pressure were fixed for each participant. The helmets were recent equipment, 2.5 (mean) years old, and exhibited only 10 to 300 flight hours. Participants wore their helmets as in flight.



Figure 3: TopOwl flight helmet view



Figure 4: Ear shell view

### C. REAT measurement systems

Usually the REAT method required a well sound insulated reverberant room<sup>15</sup>. But at IRBA the background noise reverberant room was higher than the REAT standard specification. So we had to find another test room. The major difficulty was that the noise of the room had to be below -4dBSP at 4 kHz. And the speaker had to be able to provide sound level from -20dBSP to 100dBSP, without distortion and interference. Therefore, an electro-acoustic system was designed and placed in a half anechoic room (volume: 152m<sup>3</sup>). This system generated a diffuse sound field close to standard ISO 4869-1 from uncorrelated acoustical signals transmitted by eight speakers. The eight speakers were built with Fostex FE166E and FT166H devices and adjusted in a baffle to achieve wide range in frequency, high efficiency, and low distortion. The speakers were fixed at each corner of a cube (3.3m edge). Figure 5 illustrates the installation. The figure 6 shows a participant and a baffle in the room. A stimulus signal was created with pink noise filtered in the third octave band. The stimulus signal was emitted given out with random latency. A processor TDT RX8 with 5 DSP sharks and several electronic devices used as an amplifier (Crown devices) were programmed with graphic language (RPVds). With this system the frequencies tested were 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 16 kHz. Video monitoring with markers was used to ensure that the participant held his head in the diffuse sound field. In the software program with Matlab language, we also verified systematically during the REAT measurement that the required stimulus level was kept in the range of our REAT measurement system. This full system was described in an IRBA technical report<sup>16</sup>.

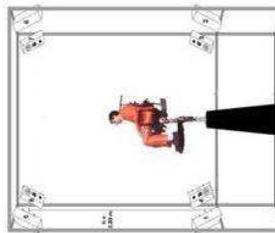


Figure 5: REAT installation



Figure 6: A participant in REAT room

We successfully checked compliance of our REAT system with the standard ISO 4869-1:1990 (E). E.g. concerning background noise measurement, we used a low level microphone Bruel&Kjaer type 4179 with a preamplifier B&K 2660-W-001 and an amplifier NEXUS on battery. The figure 7 shows the measurement result when all the equipment in our REAT system was in order. The level of the background noise was compliant with ISO 4869-1:1990 (E) S4-2-3. Another example was the validation of acoustic field directivity. A step of 15° was chosen (figure 8). 266 positions were measured for 5 frequencies separately produced. So 1330 points were measured. The microphone used was cardioid type. Finally, the sound field measured checked the omni directivity specification of the standard ISO 4869-1:1990 (E) S4-2-1, b). All the other standard specifications were of course checked.

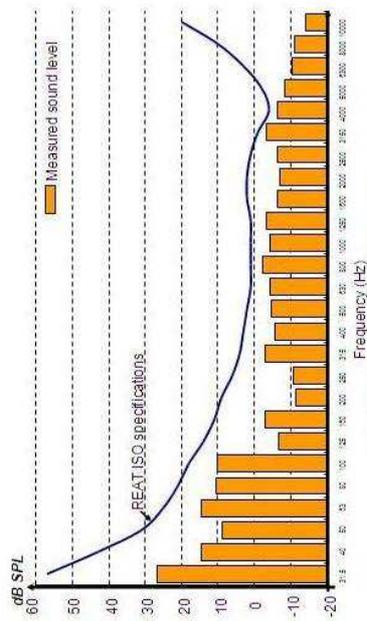


Figure 7: Background noise in REAT room

**D. MIRE measurement systems**

We used a reverberant room (volume: 204m<sup>3</sup>). There were 9 speakers: 6 Bose type 802, 2 Bose type 302 and 1 Altec Lansing model 182A. We checked that the sound field was diffused at the measurement location. Two microphones (Sennheiser KE 4 211-2) were used, one in each ear and fitted in earplugs (figure 9). A third octave band analyser type Helwett Packard 35670A made the measurement with 60s average time. The two measurement steps are described in figure 10. Without HPD, participant's noise exposure was 85dBA to avoid hearing damage risk. With HPD, the exposure level was higher than 20dB i.e. 105dBA to get at least 70dB signal to noise ratio. The sound level shift between without and with HPD was about 20dB. In fact for the attenuation computation, each third octave band had its own shift factor. A participant is shown in the room (figure 11).

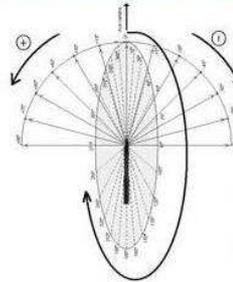


Figure 8: Measurement points for omni directivity

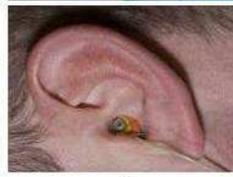


Figure 9: MIRE microphone in MIRE room

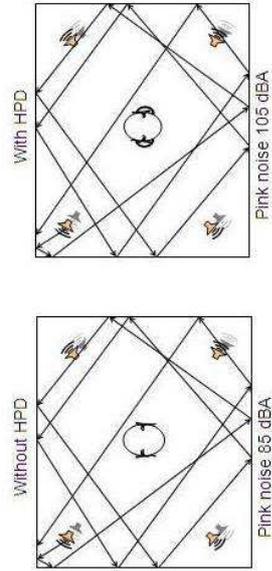


Figure 10: MIRE measurement  
Attenuation (IL) (dB)= Third octave spectrum without HPD (dB)+ 20 dB - Third octave spectrum with HPD (dB)

**E. Protocols**

**REAT:** The participants fitted HPD or not in cross order with a minimal pause time of 10 min between each measurement. No repetition was performed, there was only one computed attenuation (63Hz to 8kHz octave band) for each participant.  
**MIRE:** Three repetitions were performed. Between each repetition, the helmet was refitted. The mean attenuation for each participant was calculated with 6 attenuations (3 right, 3 left). Then, the attenuation values (63Hz to 8 kHz octave band) were recorded.

**4. RESULTS**

The attenuation of the flight helmet was determined using two methods: objective Mire (ANSI 12.42) and subjective REAT (ISO 4869-1) as shown in figure 12.

**A. REAT attenuation**

The attenuation values varied between 2.7 dB and 41.0dB. The weak attenuation values (less than 4.2dB) for the frequencies below 250Hz were due to the light weight of the ear shells. The standard deviation (table 1) was around 5dB except for 4 kHz and 8 kHz.

Table 1: REAT vs. MIRE standard deviation (dB)

	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
REAT	5.2	5.1	5.9	4.1	3.9	4.0	7.8	8.0
MIRE	1.3	2.1	4.4	4.1	4.0	3.5	7.5	8.4

**B. MIRE attenuation**

The attenuation values varied between -2.1 dB and 40.6dB. At low frequencies below 250Hz, amplification was observed (-0.8 dB; -2.1 dB; -0.7 dB). The standard deviation (table 1) was around 4dB except for 4 kHz and 8 kHz.

**C. REAT vs. MIRE attenuation**

MIRE and REAT attenuation values were compared (figure 12). MIRE standard deviation was generally smaller than REAT standard deviation (table 1). The MIRE method seemed to be more accurate than the REAT method. The statistical used test was a paired T-test. The result was compliant with both standards: statistically significant differences (\*\*, \*\*\*)

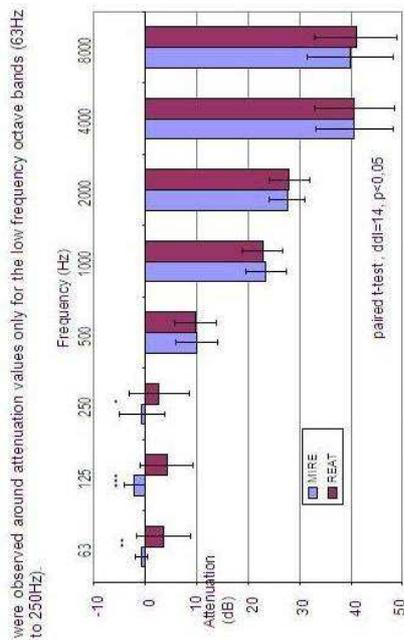


Figure 12: Attenuations of the flight helmet mean and standard deviation with objective Mire (ANSI 12.42) and subjective REAT (ISO 4869-1) methods, 15 participants

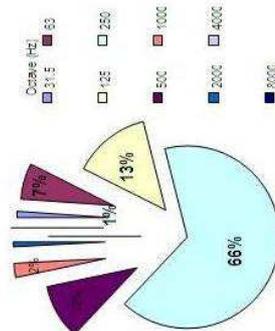


Figure 13: Octave percentage distribution of A-weighted sound pressure for a helicopter pilot in flight fitted with Topowal helmet (REAT values)

### 5. DISCUSSION

The attenuation of customized helicopter flight helmets was carefully assessed and compared with two methods: The REAT and MIRE standards<sup>4,10</sup>. At and below 250Hz, attenuation differences were compliant with the two standards: i.e. the MIRE attenuation values were lower than real-ear values at threshold. From a practical point of view it is important to know the best method to use for helicopter environment noise dose estimation. The REAT attenuation values are overestimated<sup>10,11</sup> at low

frequencies. MIRE attenuation values and standard deviation were less than a few decibels at low frequencies. The attenuation given by MIRE method may be more close to the real attenuation values. Is this small difference relevant to noise dose estimation? In the French combat helicopter cockpit, 87% of A-weighted sound pressure (figure 13) stemmed from the noise level at low frequencies<sup>10</sup>. Therefore an overestimation of the REAT attenuation at low frequencies underestimated the Level<sup>10,11</sup> by a few decibels and consequently the noise dose. This underestimation may be a hearing damage risk. In conclusion, we advise using MIRE attenuation for noise dose computation in helicopter environment.

### ACKNOWLEDGMENTS

We gratefully acknowledge all the participants from 5ème RHC of Pau, from EFA of Le Luc en Provence and from GAM/STAT of Valence. The authors wish to thank the facility at which this study was conducted, as well as COMALAT and DGA/UM/HELL. This study would not have been possible without their support and assistance.

### REFERENCES

1. R. McKinley, "The implementation of hearing protection in the US forces", in *Proceedings of Research meeting topic 2.12 Acoustics and Protection of the Soldier*, French-German Research Institute of Saint-Louis (ISL), France, march 24-25, (2009)
2. French statutory order n°2006-892 of Department for Employment, "Prescriptions for security and health in the event of noise exposure at work", (19 July 2006)
3. *European Union Directive 2003/70/EC*, "Risks arising from physical agents", (2003)
4. ISO 4869-2:1994(E), "Estimation of effective A-weighted sound pressure levels when hearing protectors are worn", *Acoustics: ISO Standards Handbook*, Vol. 1, pp 518-529
5. E.H. Berger, J. Vok, and R.W. Kleper, "Methods of developing and validating a field-MIRE approach for measuring hearing protector attenuation", *Spectrum*, Vol. 24, Suppl. 1, February, (2007)
6. J. Casali, D. Mauney and J.A. Burks, "Physical vs. psychophysical measurement of hearing protector attenuation—a MIRE vs. REAT", *Journal of Sound and Vibration*, 29 20-7 (1995)
7. E.H. Berger, J.R. Franks and F. Lindgren, "International review of field studies of hearing protector attenuation. Scientific basis of noise-induced hearing loss", NY: Thieme Medical Publishers Inc, pp 361-77, (1996)
8. L. Pelieux, D. Sarafian and G. Reymond, "Assessment of active noise reduction hearing protectors: noise attenuation and speech intelligibility", *Agard Conference Proceedings* 596, pp.16-1-16-19, (1986)
9. ANSI S12.42-1995, "Microphone in real ear and acoustic test fixture methods for the measurement of insertion loss of circumaural hearing protection devices", *American National Standard Institute, Inc.*
10. ISO 4869-1:1990(E), "Hearing protectors-Subjective method for the measurement of sound attenuation", *Acoustics: ISO Standards Handbook*, Vol. 1, pp 509-515
11. E.H. Berger and J.E. Kenyon, "Influence of physiological noise and the occlusion effect on the measurement of real ear attenuation at threshold", *Journal of the Acoustical Society of America*, 74, pp81-94, (1983)
12. N.K. Allen, "Real ear attenuation testing system (RATS)", report AL-7R-981-0073, systems directorate, body dynamics and biocommunications division, Air Force systems command Wright Patterson Air Force Base, (1991)
13. L. Pelieux, J.C. Boly, C. Blancard, D. Sarafian and A. Guillaume, "Etude et réalisation d'un dispositif expérimental créant dans une salle semi anéchoïque un champ acoustique diffus permettant la mesure de protections auditives par la méthode subjective REAT", *IRBA, Rapport Technique n°07-12*, (2007)
14. D. Sarafian, "Noise dose estimation about Tiger helicopter pilot", unpublished, DGA-BWB Workshop, French-German Research Institute of Saint-Louis (ISL), France, (1 of October 2008)

---

## 6. Bibliographie

La rédaction des références est inspirée de la norme ISO 690-2 : 1997 (Z44-005-2).

- [1] NICOL, Rozenn. *Binaural Technology*. New York, USA : AES Monograph, 2009, 77 p.
- [2] ANDÉOL, Guillaume. Sound localization in the horizontal plane : interest for the use of 3D audio displays. **In** : ISL, *3<sup>rd</sup> Workshop on "Battlefield Acoustics", April 20<sup>th</sup> & 21<sup>th</sup>, Saint-Louis, France*. Saint-Louis : ISL, 2012, CD-ROM. (Communication orale)
- [3] SARAFIAN, David, *et al.* 3D sound in the helicopter environment: localisation performance. **In** : ISAAR, *Proceedings of 40<sup>th</sup> International Symposium on Auditory and Audiological Research, 26-28 August 2009, Elseneur, Danemark*. BUCHDHOLZ, J, DAU, T, DALSGAARD, J, POULSEN, T (ed.), 2010, p. 243-251. (Binaural Processing and Spatial Hearing)
- [4] ABDALLAHI, Houari, LAWTON, James, OZSEN, Deniz, *et al.* Virtual Environments: Tracking. **In** : UCL Computer Science, *Seminar Tracker, 2005, London*. London, UK : UCL Computer Science, 2005, (Communication orale, disponible sur le site [www0.cs.ucl.ac.uk/teaching/VE/Seminars/2004-2005/seminar3-tracking.ppt](http://www0.cs.ucl.ac.uk/teaching/VE/Seminars/2004-2005/seminar3-tracking.ppt), consulté en 2006)
- [5] ADAM, Jean-Pierre. Groma et chorobate, exercices de topographie antique. *MEFRA*, 1982, vol. 94, article n°2, p. 1003-1029.
- [6] FILIPPI, Rosella. Le procedure. **In** : PANINI, F.C. *Misurare la terra centuriazione e coloni nel mondo romano, 1983, Modena, Italia*. Settis Salvatore (ed.), 1993. (ISBN-9788876860133)
- [7] DÜRER, Albrecht. *Instructions sur la manière de mesurer avec le compas et la règle, les lignes, les surfaces, les corps entiers*, Nuremberg, Allemagne : Imprimerie de Nuremberg, 1525, (source Bibliothèque National de France)
- [8] SUTHERLAND, Yvan. A head-mounted three-dimensional display. **In** : *AFIPS Conference*, 1968, vol. 33, p 757-764.
- [9] GRASSET, Raphael, GASCUEL, Jean-Dominique. Réalité Augmentée et environnement collaboratif : un tour d'horizon. **In** : *AFIG'03, Saint-Denis, France*. 2003. (communication orale)
- [10] GILKEY, Robert, GOOD, Michael, ERICSON, Mark, *et al.* A pointing technique for rapidly collecting localization responses in auditory research. *Behavior research methods, Instruments & Computers*, 1995, vol. 27, n°1, p. 1-11.
- [11] FUCHS, Philippe, MOREAU, Guillaume, PAPIN, Jean-Paul. *Le traité de la réalité virtuelle*. Paris : Les Presses de l'Ecole des Mines, 2001, p. 155-191.
- [12] FOXLIN, Eric, HARRINGTON, Michael, ALTSHUKER, Yury. Miniature 6-DOF inertial system for tracking HMDs. **In** : SPIE, *Aerosense 98, April 13-14 1998, Orlando, FL*,. SPIE, 1998, vol. 3362, p. 1-15. (Helmet and Head mounted display III)
- [13] RAAB, F., BLOOD, E., STEIONER, T., *et al.* Magnetic position and orientation tracking system. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1979, vol. 15, n°5, p. 709-718.
- [14] ADELSTEIN, B., JOHNSTON, E., ELLIS, S. Dynamic response of electromagnetic spatial displacement trackers. *Presence: Telepresence and Virtual Environments*, 1996, 5(3), p. 302-318.
- [15] *3SPACE FASTRAK User's Manual*. Rev. E. Colchester, U.S.A : Polhemus Inc., April 2005, 124 p.
- [16] *The Flock of Birds Installation and Operation Guide*. 910141 Rev A1. Burlington, USA : Ascension Technology Corp, 2002, 156 p.

- 
- [17] SAKURADA T., ATODA O., NAKAGAWA M., *et al.* Algorithm Design and Prototype of a Low-cost Electromagnetic Inductance Real-Time 6D-tracker. **In** : *15<sup>th</sup> International Conference on Information Networking, 31 January-2 February 2001, Beppu City, Japan.* IEEE Computer Society, 2001, p. 726-732.
- [18] LE MENN, Marc. *Etude d'une méthode de mesure de rotations utilisant une lumière modulée en polarisation: application aux mouvements de la tête.* Mémoire d'Ingénieur, Physique-Instrumentation. Paris, France : C.N.A.M., 1991
- [18b] FUCHS, Philippe. *Les interfaces de la réalité virtuelle.* Paris : Les Presses de l'Ecole des Mines, 1996, p. 147-161. (ISBN 2-9509954-0-3)
- [19] FERRIN, F, *et al.* Survey of helmet tracking technologies. **In** : SPIE, *Large screen Projection, Avionic, and HMD, 1991, San José, CA, USA.* Proc. SPIE vol. 1546, 1991.
- [20] FENNER, David. The PLADAR, tracking system. *The Virtual Reality Newsletter*, 1993, 2(5), vol. June. (Cydata Limited, London, England)
- [21] WANG, J.F., CHI, V. FUCHS, H. A real-time optical 3D tracker for HMD systems. *Computer graphics*, 1990, n°2, p. 24.
- [22] WELCH, Greg, BISHOP, Gary, VICCI, Leandra, *et al.* The HiBall Tracker: High-Performance Wide-Area Tracking for Virtual and Augmented Environments. **In** : VRST 99, *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, December 20-22 1999, University College London.* ACM SVRST, 2001, p. 1-11.
- [23] ASCH, Georges, *et coll.* *Les capteurs en instrumentation industrielle.* 7<sup>ème</sup> éd.. Paris : Dunod, 2010, 866 p.
- [24a] RADIX, Jean-Claude. Gyroscopes et gyromètres mécaniques avec élément rotatif. **In** : *Techniques de l'ingénieur : Traité Mesures et Contrôle*, R1940. Paris : Techniques de l'ingénieur, 1999, p. 1-10.
- [24b] GUIZIOU, Robert. *Système de Contrôle d'Attitude et d'Orbite.* Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II : DESS Air & Espace, Cours, 2001, Volume IV (Techniques Inertielles)
- [25] BAILLOT, Y., ROLLAND, J. Fundamental Principles of Tracking Technology for Virtual Environments. Technical Report TR96-004. Orlando, USA : Center for Research and Education in Optics and Lasers, November 1996.
- [26] GRABOWSKI, B., RIPOLL, C., *et coll.* *Aide-mémoire Electronique.* 5<sup>ème</sup> éd.. Paris : Dunod, 2008, Chap. E-7, p. 148-150.
- [27] KHOSHELHAM K., ELBERINK, S.O. Accuracy and resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications. *Sensors*, 2012, 12, p. 1437-1454.
- [28] GUILLAUME, MC, LECOMPTE, VAA, CHAVARY, VSSA, *et al.*. *Conséquences biomécaniques sur le système musculaire cervical du port d'un casque avec viseur.* Rapport de recherche DR n°06-02. Brétigny sur Orge, France : IMASSA, 2006.
- [29] BRUNGART, D., SIMPSON, B., MCKINLEY, R. The interaction between Head tracker latency, source duration, and response time in the localization of virtual sound sources. **In** : *Proceedings of ICAD 04 - Tenth Meeting of the International Conference on Auditory Display, July 6-9 2004, Sydney, Australia.* 2004, p. 1-7.
- [30] KINDRATENKO, V. A comparison of the Accuracy of an electromagnetic and a hybrid ultrasound-inertia position tracking system. *Presence*, 2001, vol. 10, n°6, December 2001, p. 657-663.

- 
- [31] KINDRATENKO, V. A survey of electromagnetic position tracker calibration techniques. *Virtual Reality: Research, Development, and Applications*, 2000, vol. 5, n°3, p. 169-182.
- [32] MEYER, K., APPLEWHITE, H., BIOCCA, F. A survey of position trackers. *Presence*, 1992, vol. 1, n°2, p. 173-200.
- [33] CRUZ-NEIRA, C., SANDIN, D., DeFANTI, T. Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE. **In** : *Proceedings of SIGGRAPH '93 Computer Graphics Conference*, ACM SIGGRAPH, August 1993, p. 135-142.
- [34] ZACHMANN, G. Distortion Correction of Magnetic Fields for Position Tracking. **In** : CGI'97, *Proc. Computer Graphics International, June 23-27 1997, Hasselt and Diepenbeek, Belgium*. 1997, p. 1-8.
- [35] FRANTZ, Donald, KIRSCH, Stefan, WILES, Andrew. Specifying 3D Tracking System Accuracy, One Manufacturer's Views. **In** : Tolxdorff (ed.) *Proc. Bildverarbeitung für die Medizin, 29-30 mars 2004, Berlin*. 2004, p. 234-238. (ISBN 978-3-540-21059-7)
- [36] TIAN, X., LING, K.V., NG, W.S. Magnetic tracker calibration for an augmented reality system for therapy. **In** : *Proceeding of Institution Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. January 2001, vol. 215(1), p. 51-59.
- [37] WILES, Andrew, THOMPSON, David, FRANTZ, Donald. Accuracy assessment and interpretation for optical tracking systems. **In** : SPIE, *Proc. Medical Imaging, February 2004, San Diego, CA, USA*. 2004, vol. 5367, 1-12.
- [38] NIXON, M.A., McCALLUM, B.C., FRIGHT, W. R., *et al.* The Effects of Metals and Interfering Fields on Electromagnetic Trackers. *Presence*, April 1998, vol. 7, n°2, p. 204-218.
- [39] MURRY, Herschell. *Magnetic Tracker Distortion*. 2004. [**en ligne**]. Disponible sur : <[www.polhemus.com](http://www.polhemus.com)> (consulté le 06/04/2006)
- [40] CZERNUSZENKO, Marek, SANDIN, Daniel, DeFANTI, Thomas. Line of Sight Method for Tracker Calibration in Projection-Based VR Systems. **In** : *Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Immersive Projection Technology Workshop, May 11-12 1998, Ames, Iowa, USA*. 1998, p. 1-7.
- [41] GHAZISAEDY, M., ADAMCZYK, D., SANDIN, D., *et al.* Ultrasonic Calibration of a Magnetic Tracker in a Virtual Reality Space. **In** : VRAIS '95, *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, 11-15 March 1995, Research Triangle Park, NC*. p. 179-188.
- [42] LIVINGSTON, M.A., STATE, A. Magnetic Tracker Calibration for Improved Augmented Reality Registration. *Presence*, October 1997, vol. 6, n°5, p. 532-546.
- [43] PRESS, W., TEUKOLSKY, S., VETTERLING, W., *et al.* *Numerical Recipes in C*. 2<sup>nd</sup> ed., 1997, Cambridge University Press.
- [44] BRYSON, S. Measurement and Calibration of Static Distortion of Position Data from 3D Trackers. **In** : *Proceedings of SPIE Conference on Stereoscopic Displays and Applications III, February 1992, San Jose, CA, USA*. 1992, p. 244-255.
- [45] ZACHMANN, G. *Virtual Reality in Assembly Simulation - Collision Detection, Simulation Algorithms, and Interaction Techniques*. PhD Dissertation, TU Darmstadt, Germany, 2000.
- [46] ELLIS, S., ADELSTEIN, B, BAUMELER, S, *et al.* Sensor spatial distortion, visual latency, and update rate effects on 3D tracking in virtual environments. **In** : IEEE VR '99, *Proceedings IEEE Virtual Reality Conference, March 1999, Houston, TX, USA*. 1999, p. 218-221.

- 
- [47] KENWRIGHT, D., LANE, A. Interactive time-dependent particle tracing using tetrahedral decomposition. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*; 1996, 2(2), p. 120-129.
- [48] BRIGGS, W. Magnetic Calibration by Tetrahedral Interpolation. **In** : *Proceedings of NIST-ASME Industrial Virtual Reality Symposium, November 1999, Chicago, IL, USA*. 1999, MH vol. 5/MED-vol. 9, p. 27-32.
- [49] KINDRATENKO, V., BENNETT, A. Evaluation of Rotation Correction Techniques for Electromagnetic Position Tracking Systems. **In** : *Proc. Virtual Environments 2000 Eurographics Workshop*. 2000, p. 13-22.
- [50] KINDRATENKO, V. Calibration of electromagnetic tracking devices. *Virtual Reality: Research, Development, and Applications*, 1999, vol. 4, p. 139-150.
- [51] IKITS, Milan, BREDESON, Dean, HANSEN, Charles, *et al.* An Improved Calibration Framework for Electromagnetic Tracking Devices. **In** : *IEEE Virtual Reality, March 2001, Yokohama, Japan*. 2001, p. 63-70.
- [52] SALEH, Tammer, KINDRATENKO, Volodymyr, SHERMAN, William. On Using Neural Networks to Calibrate Electromagnetic Tracking Systems. Technical Report December 7. IL, USA : NCSA, 2000, 5 p. (consulté sur <[www.researchgate.net /publication](http://www.researchgate.net/publication)> en 2006)
- [53] DAY, J., MURDOCH, D., DUMAS, G. Calibration of position and angular data from a magnetic tracking device. *Journal of Biomechanics*, 2000, vol. 33, p. 1039-1045.
- [54] NAKADA, Kazuhisa, NAKAMOTO, Masahiko, SATO, Yoshinoha *et al.* A rapid method for magnetic tracker calibration using a magneto-optic hybrid tracker. MICCAI 2, 2003, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2879, p. 285-293.
- [55] NEEDHAM, C., BOYLE, R., Performance evaluation metrics and statistics for positional tracker evaluation. ICVS, 2003, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2626, p. 278-289.
- [56] HUMMEL, J., BAX, M., FIGI, M., *et al.* Design and application of an assessment protocol for electromagnetic tracking systems. *Med. Phys*, July 2005, 32 (7), p. 2371-2379.
- [57] ORGANISATION INTERGOUVERNEMENTALE DE LA CONVENTION DU METRE. *Le Système international d'unités (SI)*. 8<sup>ème</sup> éd. Sèvres, France : Bureau international des poids et mesures, 2006, 96 p. (Paris : STEDI Media, ISBN 92-822-2213-6)
- [58] JCGM 200 : 2012. *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*. 3<sup>ème</sup> éd. Sèvres, France : Bureau international des poids et mesures, 2012, 108 p.
- [59] JCGM 100 : 2008(F). *Evaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*. 1<sup>ère</sup> éd. Sèvres, France : Bureau international des poids et mesures, Septembre 2008, 132 p. (Document GUM produit par le groupe de travail 1 du Comité Commun pour les guides en métrologie JCGM/WG1)

---

## 7. Liste des figures

Figure 1 : Appellations françaises et anglaises rencontrées dans la littérature pour les angles d'orientation .....	4
Figure 2 : Différence perceptive de la restitution sonore sous casque entre le Son3D et la stéréophonie, dessin d'après Andéol [2] .....	8
Figure 3 : Illustrations de différentes applications possibles du Son3D à bord d'un avion de chasse, dessin d'après Terma (Courtesy of TERMA A/S, www.terma.com, 2009).....	9
Figure 4 : Ecoute en dynamique et évaluation du Son3D (Photo. CERMA, 1995).....	11
Figure 5 : Tâche de désignation à l'aide d'un stylet (Photo. IRBA 2010).....	11
Figure 6 : Photographie vue du ciel de l'IRBA, Photo. IRBA (2010).....	12
Figure 7 : Utilisation de la <i>groma</i> pour le bornage dans l'antiquité, dessin d'après l'illustration de G. Moscara (1983) dans l'ouvrage « Misurare » [6].....	15
Figure 8 : Représentation de l'artiste Daraughsman en train de dessiner en perspective une femme allongée par rapport à un plan de coupe au moyen de repères quadrillés, dessin de Dürer [7].....	16
Figure 9 : Système de détection de déplacement appelé « Epée de Damoclès » 1966, source AFIPS Joint Computer Conference Archive (1968) .....	16
Figure 10 : Applications de la réalité augmentée : a) localisation et vue d'un objet à manipuler, b) identification et délimitation de zone d'organe sur un patient, illustration d'après Grasset <i>et al.</i> [9] .....	17
Figure 11 : Casque de vol modifié pour l'étude expérimentale du Son3D (Photo. IMASSA 1999).....	18
Figure 12 : Développement de la méthode GELP (Photo. IRBA 2008).....	18
Figure 13 : Traqueur électromagnétique de position à bord de l'hélicoptère Tigre (Photo. Extrait du site www.aviation-francaise.com, Topowl.jpg, 2013) .....	19
Figure 14 : Principe basé sur les mesures de distances d'après Fuchs [11].....	22
Figure 15 : Traqueur de localisation mécanique de tête, image d'après Abdallahi <i>et al.</i> [4]...	22
Figure 16 : Mesure de la position d'un doigt et du retour d'effort sur celui-ci d'après Fuchs [11] .....	23
Figure 17 : Bras de mesure de précision d'après Foxlin <i>et al.</i> [12] .....	24
Figure 18 : Bras de mesure dimensionnelle Faro type Platinum, www.faro.com (2012).....	24
Figure 19 : Principe et dispositif d'un système de localisation à base de capteur électromagnétique d'après Fuchs <i>et al.</i> [11] .....	24
Figure 20 : Traqueur de type Liberty de Polhemus, www.polhemus.com (2012).....	27
Figure 21 : Récepteur sans fil du Liberty Latus, www.polhemus.com (2012) .....	27
Figure 22 : Traqueur Nest of Bird d'Ascension, www.ascension-tech.com (2007) .....	28
Figure 23 : Traqueur Bird d'Ascension, www.ascension-tech.com (2007).....	28
Figure 24 : Récepteur microBird de 1,3 et 1,8mm de diamètre, www.ascension-tech.com (2010) .....	28
Figure 25 : système Aurora, www.ndigital.com (2006).....	28
Figure 26 : Dispositif d'un traqueur de localisation à ultrasons, d'après Fuchs <i>et al.</i> [11] .....	29
Figure 27 : Traqueur acoustique de tête (Logitech), www.vrdepot.com (2006).....	30
Figure 28 : Traqueur acoustique « souris 3D », (Technical Reference Manual Rev. C, Logitech, 2006) .....	30
Figure 29 : Technique de l'extérieur vers l'intérieur pour un capteur de localisation optique, d'après Fuchs <i>et al.</i> [11].....	31

Figure 30 : Technique de l'intérieur vers l'extérieur pour un capteur de localisation optique, d'après Fuchs <i>et al.</i> [11] .....	31
Figure 31 Capteur de localisation optique avec récepteurs ponctuels, Fuchs <i>et al.</i> [11] .....	32
Figure 32 : Traqueur optique DynaSight pour le suivi de mouvement de tête, www.orin.com (2012) .....	33
Figure 33 : Traqueur optique Polaris de NDI, www.ndigital.com (2013) .....	33
Figure 34 : Capteur de localisation optique Optotrak Certus de Northern Digital Inc présenté à l'horizontale, www.ndigital.com (2006) .....	34
Figure 35 : Système Hiball de UNC Tracker research Group, [22] .....	34
Figure 36 : Laser Bird 2 de Ascension Technology Corporation, pour simulateur de vol, www.ascension-tech.com (2006) .....	35
Figure 37 : ARTtrack1 de Advanced Realtime tracking GmbH, www.ar-tracking.com (2006) .....	35
Figure 38 : Système Vicon avec caméra muni de LED infrarouges et marqueurs auto-réfléchissants, www.vicon.com (2007) .....	35
Figure 39 : Schéma d'un accéléromètre, d'après www.ni.com (Capteurs de vibrations 28/04/2011) .....	36
Figure 40 : Schéma d'un gyroscope à cardan d'après Guiziou [24b] .....	37
Figure 41 : Le traqueur Gyropoint II Pro sans fil de IXmicro Gyropoint, copyright photo IXMicro Gyropoint .....	38
Figure 42 : Principe d'un inclinomètre, d'après Baillot <i>et al.</i> [25] .....	39
Figure 43 : Traqueur de tête InterTrax2 à 3 ddl d'orientation à technologie inertielle monté sur des lunettes stéréoscopiques, www.insense.com (2005) .....	40
Figure 44 : Diagramme fonctionnel de traqueur hybride .....	40
Figure 45 : Traqueur 600 Mark2 de Intersense, www.isense.com (2007) .....	41
Figure 46 : Traqueur Kinect et ses capteurs, www.msdn.microsoft.com (26/03/2013) .....	42
Figure 47 : Domaine d'incertitude en fonction du temps de latence pour chaque type de traqueur .....	45
Figure 48 : Vues de synthèse d'un véhicule avant (image de gauche) et après correction (image de droite) du champ magnétique cartographié, d'après Zachmann [34] .....	47
Figure 49 : Différentes représentations des erreurs d'un traqueur, d'après Frantz <i>et al.</i> [35], 48	
Figure 50 : Objet d'étalonnage optique (Wiles <i>et al.</i> [37]) .....	49
Figure 51 : Représentation spatiale des erreurs de position mesurées avec le système optique Polaris d'après Wiles <i>et al.</i> [37] .....	49
Figure 52 : Distance limite de perturbation de traqueur magnétique [39] .....	52
Figure 53 : Représentation de l'erreur de localisation d'un réseau de points formé par des cubes de 40 cm de côté, d'après Zachmann [34] .....	60
Figure 54 : Système expérimental d'étalonnage d'après Day <i>et al.</i> [53] .....	66
Figure 55 : Système expérimental d'après Hummel <i>et al.</i> [56] .....	68
Figure 56 : Traqueur Fastrak composé du gros cube gris émetteur, du petit capteur de position (récepteur), du boîtier gris d'interface et d'une alimentation secteur, d'après le manuel d'emploi Fastrak (2007) .....	73
Figure 57 : Schéma de principe du dispositif d'étalonnage des coordonnées cartésiennes afin d'obtenir un réseau de points reproductible .....	75
Figure 58 : Schéma de principe du dispositif d'étalonnage à cardans des coordonnées angulaires .....	76
Figure 59 : Vue de l'échiquier, des colonnes et support de capteur, photo IRBA 2009 .....	76
Figure 60 : Pièces du système d'étalonnage en localisation et en orientation fixe .....	77
Figure 61 : Supports de capteur à pente fixe .....	77
Figure 62 : Vue d'ensemble et zoom sur la graduation de l'orientateur .....	78

Figure 63 : Dispositifs d'étalonnage statique en localisation.....	79
Figure 64 : Identification et écarts des points de mesure de l'échiquier .....	81
Figure 65 : a) Vue générale du banc de mesure LK utilisé pour constituer le réseau de points de référence, b) zoom sur le palpeur pointant sur le centre du support pour l'une des 294 positions mesurées.....	83
Figure 66 : a) Plan du positionnement, b) vue du capteur électromagnétique sur sa cale .....	86
Figure 67 : Positionnement de l'émetteur .....	87
Figure 68 : Vue du repère XYZ gravé sur le cube de l'émetteur Fastrak .....	87
Figure 69 : Repères du traqueur Fastrak et de l'échiquier .....	88
Figure 70 : Menu d'alignement du repère Fastrak avec les valeurs saisies .....	89
Figure 71 : Vue XY des valeurs mesurées .....	90
Figure 72 : Application du traqueur pour l'étude PERTIA, méthode GELP.....	91
Figure 73 : Angle d'erreur entre la position de référence (R) et la position délivrée par le système Fastrak (F) .....	91
Figure 74 : Diagramme des sources et facteurs d'erreurs, type « 5M ».....	93
Figure 75 : Vue XY des valeurs mesurées par le traqueur aux positions de références en chambre réverbérante .....	98
Figure 76 : Evaluation d'une condition d'utilisation du traqueur pour l'étude PERTIA.....	99
Figure 77 : Problématique de la méthode de « proximité » vue dans le plan XY d'un réseau de points .....	101
Figure 78 : Etapes du programme de correction « polyfit ».....	103
Figure 79 : Etapes du programme de correction « itp ».....	104
Figure 80 : Principe de la fonction « interp3d ».....	105
Figure 81 : Vue XY des valeurs mesurées et simulées à corriger.....	106
Figure 82 : Boîte à moustaches de Tukey .....	109
Figure 83 : Lecture de la matrice de significativité.....	109
Figure 84 : Schéma de la réalisation de la correction polynomiale .....	110
Figure 85 : Evolution des effets de la correction en fonction l'ordre polynomiale .....	110
Figure 86 : Obtention des valeurs corrigées via « interpolk » .....	113
Figure 87 : Classement des corrections pour l'axe X.....	116
Figure 88 : Classement des corrections pour l'axe Y.....	117
Figure 89 : Classement des corrections pour l'axe Z .....	117
Figure 90 : Classement des corrections pour l'azimut .....	118
Figure 91 : Classement des corrections pour l'élévation .....	118
Figure 92 : Classement des corrections pour le roulis .....	119
Figure 93 : Comparaison des corrections en position apportées par quatre méthodes .....	120
Figure 94 : Comparaison des corrections en orientation apportées par quatre méthodes .....	120

---

## 8. Liste des tableaux

Tableau I : Synthèse de la caractérisation de l'échiquier de 49 trous.....	80
Tableau II : Caractéristiques dimensionnelles du support de capteur.....	81
Tableau III : Caractéristiques dimensionnelles des colonnes classées par ordre croissant des hauteurs .....	82
Tableau IV : Construction du réseau de 294 points de référence.....	82
Tableau V : Synthèse de la caractérisation du réseau 294 de points de référence .....	83
Tableau VI : Synthèse de la caractérisation des supports de capteurs à pentes fixes .....	85
Tableau VII : Synthèse de la caractérisation de 130 angles du positionneur angulaire .....	85
Tableau VIII : Configuration du système Fastrak.....	88
Tableau IX : Synthèse de l'étalonnage du réseau de 294 points.....	90
Tableau X : Estimation de l'erreur de répétabilité .....	94
Tableau XI : Estimation de l'erreur de reproductibilité .....	94
Tableau XII : Budget des incertitudes-types .....	96
Tableau XIII : Synthèse de l'étalonnage du réseau de 294 points en chambre réverbérante...	98
Tableau XIV : Points de test .....	107
Tableau XV : Synthèse des corrections pour les ordres polynomiaux de 2 à 6 .....	111
Tableau XVI : Synthèse des corrections pour les ordres polynomiaux de 7 à 11 .....	112
Tableau XVII : Synthèse des corrections selon trois types d'interpolation .....	114
Tableau XVIII : Synthèse des corrections par la méthode de « proximité » .....	115
Tableau XIX : Synthèse des tests Anova réalisées pour quatre méthodes de correction.....	121
Tableau XX : Comparaison d'efficacité globale des indicateurs .....	121
Tableau XXI : Comparaison des indicateurs de réduction d'écarts .....	122
Tableau XXII : Comparaison du classement des méthodes.....	122

---

Etalonnage statique d'un capteur électromagnétique de position et  
choix d'une méthode de correction : application aux expérimentations relatives au son 3D.  
Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Paris 2013

---

### Résumé

Dans le cadre de nos expérimentations en psycho acoustique (son 3D) menées en laboratoire, l'utilisation d'un capteur de position appelé « traqueur » est requise. Quel type de traqueur faut-il choisir, comment l'étalonner et corriger ses erreurs de mesure ?

En première partie, les traqueurs en laboratoire, les techniques et outils dédiés à leur étalonnage, ainsi que les méthodes de corrections sont décrits au travers d'une revue bibliographique. Le choix d'un traqueur électromagnétique, la spécification d'un système d'étalonnage, la sélection de méthodes de correction sont établis.

Dans une deuxième partie, la méthode d'étalonnage statique est proposée, puis le système d'étalonnage conçu est caractérisé et mis en œuvre. Enfin les résultats de l'étalonnage sont rapportés et les incertitudes associées sont estimées. Suite à l'étalonnage, les écarts constatés imposent une correction.

Dans une troisième partie, les logiciels de correction sont repris et modifiés, développés, puis appliqués. Les résultats des corrections sont rapportés et comparés statistiquement. Un indicateur d'efficacité pour la réduction des écarts est évalué. Deux corrections répondant à notre problématique se distinguent : une correction à base de forme polynomiale d'ordre 2 et une autre correction dite de « proximité ».

En conclusion, les perspectives relatives à cette étude sont annoncées.

*Mots clés : traqueur, électromagnétisme, étalonnage, écart, correction, son 3D, laboratoire, statique.*

---

Laboratory Tracker's: calibration method and correction techniques for 3D audio application

### Abstract

Use of tracker is necessary in our 3D audio applications. Which type of tracker is the best? How calibrate it? How reduce measurement errors?

First of all, a survey of various trackers and techniques used to calibrate position tracking systems is carried out. Error correction techniques are surveyed. The choice of electromagnetic tracker, calibration device specifications, correction methods are drawn up.

The second part deals with the static calibration. A specific calibration system is designed, built and operated. Calibration results and uncertainties are assessed. Localisation tracker errors require corrections.

In the last part, current correction software are modified, or developed, then processed. Results, comparisons and the statically choice of correction methods are made. Effectiveness indicator is evaluated for errors reduction. Two correction methods stand out: a 2<sup>nd</sup> order polynomial fit correction and the so-called "nearest" method.

In conclusion, some prospects are given.

*Key words: Tracker, Electromagnetic, calibration, error, correction, 3D audio, laboratory, static.*