

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département : Génie électrique  
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الهندسة الكهربائية  
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de  
**Doctorat 3ème cycle LMD en : Electronique**

**Spécialité (Option) : Signaux et communications**

**Conception d'Algorithmes d'Optimisation pour  
l'Identification du Positionnement Optimal des  
Caméras pour la Motion Capture**

Présentée par :  
**Azeddine AISSAOUI**

Soutenue publiquement le .....

**Devant le jury composé de :**

Pr. DJEDI Nouredine	Professeur	Président	Université de Biskra
Pr. BAARIR Zine-Eddine	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Pr. PUDLO Philippe	Professeur	Co-Rapporteur	Université de Valenciennes
Pr. TALEB-AHMED Abdelmalik	Professeur	Co-Rapporteur	Université de Valenciennes
Pr. DOGHMANE Nouredine	Professeur	Examineur	Université d'Annaba
Dr. OUAFI Abdelkrim	Maitre de Conférences 'A'	Examineur	Université de Biskra

# REMERCIEMENTS

Je remercie avant tout "DIEU" le tout puissant, de m'avoir donné la santé, le courage et la patience pour mener à bon terme cette thèse de doctorat.

Il me serait très difficile de remercier toutes les personnes car c'est grâce à l'aide de nombreuses personnes que j'ai pu mener cette thèse à son terme.

Je voudrais remercier essentiellement mon directeur de thèse, le Professeur Zine-Eddine BAARIR, pour son aide précieuse. J'étais ravi d'être sous sa direction car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse.

Au cours de ces années, j'ai fait partie de l'équipe "Traitement du signal et de l'image" au sein du Laboratoire de recherche LESIA de l'université de Biskra et de l'équipe "contrôle automatique et Systèmes homme-machine" du Laboratoire LAMIH de l'université de valenciennes en France. Les discussions que j'ai pu mener avec les Professeurs Philippe PUDLO et Abdelmalik TALEB-AHMED, m'ont beaucoup apporté. Je tiens à remercier particulièrement le Pr. Philippe PUDLO pour ses conseils tout au long de ma thèse et le Pr. Abdelmalik TALEB-AHMED pour son esprit large, sa compréhension, sa disponibilité et son soutien durant toutes ces années.

Mes remerciements vont aussi au Dr. Abdelkrim OUAFI, pour ses conseils, ses fructueuses lectures et son suivi qui méritent toute la gratitude et l'estime de ma part.

Je remercie aussi les membres du projet Dr. Mohamed Chaouki BABAHNINI, Dr. Foudil CHRIF, Dr. Christophe Gillet, Dr. Foued DERRAZ.

Je remercie l'ensemble des membres du jury : Pr. Nouredine DJEDDI, Pr. Nouredine DOGHMANE et Pr. Abdelouahab MOUSSAOUI pour l'intérêt qu'ils ont accordé à mon travail et pour avoir accepté de participer à ce jury.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cette thèse et en particulier ma famille.

# Résumé

Actuellement, la capture de mouvement optique est un outil important dans plusieurs domaines tels que le divertissement numérique, l'analyse médicale et les applications sportives. Dans l'avenir, cet outil aura le potentiel d'offrir de grands avantages dans les interfaces de contrôle avancées pour les robots qui peuvent être utilisés pour des tâches de télémanipulation. Dans chacun de ces domaines, le mouvement capturé avec précision peut être utilisé pour soutenir la suppression de l'incrédulité, appuyer l'analyse avec précision et effectuer le contrôle détaillé.

Dans les systèmes de capture de mouvement optiques (appelés aussi à base de multi-caméras), le placement des caméras a un grand impact sur leurs performances. La détermination des configurations des caméras (positions et orientations) est encore un problème ouvert. A l'heure actuelle, les configurations sont principalement guidées par l'intuition de l'opérateur humain, et demandent toujours de l'expérience et de l'expertise, surtout lorsque la scène à acquérir est complexe et encombrée. Par conséquent, divers problèmes surgissent à cause d'une mauvaise configuration des caméras. Ces problèmes comprennent : i) la perte des données causée par des occlusions et ii) l'incapacité d'identifier des marqueurs. Pour explorer la façon dont ces problèmes peuvent être résolus, cette recherche propose un système d'aide au placement des caméras. Il s'agit de simuler la meilleure position des caméras permettant la capture de tags (les futurs marqueurs) placés sur un humanoïde de synthèse. Cet humanoïde virtuel réalise un mouvement similaire au mouvement que ferait le sujet en réalité et est positionné dans un environnement semblable à l'environnement réel (ex. création d'obstacles virtuels si besoin). La problématique est alors de simuler le meilleur réseau de caméras pour la scène virtuelle spécifiée.

Pour guider le développement de ce Système d'Aide au Placement des Caméras pour la Motion Capture (SAPC-MOCAP), une méthodologie de recherche a été adoptée et un prototype capable de suivre les tags a été construit. Pour évaluer la précision et la robustesse de la technologie développée, une série de simulations a été menée sur trois scénarios d'étude (marche, course et saut). Les résultats de ces simulations, indiquent que le SAPC-MOCAP peut soutenir l'amélioration des performances des systèmes actuels de capture de mouvement optique. Cette amélioration inclut : i) la réduction du nombre moyen des occlusions, ii) la réduction de la durée moyenne des occlusions et iii) l'identification pertinente des marqueurs, sans contraindre les mouvements. Les améliorations dans ces domaines représentent une amélioration significative de la performance et de la précision des systèmes de capture de mouvement optique et peuvent augmenter considérablement le nombre de domaines d'application.

**Mots-clés :** Motion Capture, systèmes de capture de mouvement optique, configuration d'une caméra, occlusions, identifier des marqueurs, humanoïde de synthèse, réseau de caméras, Système d'aide, configuration optimale, algorithme génétique.

# Abstract

Currently, optical motion capture is an important tool in many fields such as digital entertainment, medical analysis and sport applications. In future, it will have the potential to offer great advantages in advanced control interfaces for robots which can be used for remote handling tasks. In each of these areas, captured movement can be used to support suspension of disbelief, accurate analysis and detailed control in an effective and efficient way.

In optical motion capture systems (also called based multi-cameras), the placement of cameras has a great impact on their performance. The determination of camera configurations (positions and orientations) is still an open problem. At present, the configurations are primarily guided by intuition of the human operator and always require experience and expertise, especially when the scene to acquire is complex and crowded. Therefore, many problems arise because of a bad configuration of the cameras. These problems include: i) the loss of data due to occlusions and ii) the inability to identify the markers. To explore how these problems can be solved, this research offers a support system to the placement of cameras. It consists to simulate the best camera position for capturing tags (future markers) placed on a virtual humanoid. This humanoid performs a movement similar to that would make subject in reality and is positioned in an environment similar to the real environment (i.e. creating virtual obstacles if necessary). The problem is then to simulate the best camera network for the specified virtual scene.

To guide the development of this Assistance System of Cameras Placement for Motion Capture (ASCP-MOCAP), a research methodology was adopted and a prototype capable of tracking tags was built. To assess the accuracy and robustness of the technology developed, a series of simulations were conducted on three scenarios studies (walking, running and jumping). The results of these simulations indicate that the ASCP-MOCAP can support improved performance of existing optical motion capture systems. Performance improvements include: i) reduction of average number of occlusions, ii) reduction in the average length of occlusions, iii) relevant marker identification, without restricting movement. Improvements in these areas are a significant improvement in the performance and accuracy of the optical motion capture systems and can substantially increase the number of application areas.

**Keywords:** Motion Capture, optical motion capture systems, camera configuration, occlusions, markers identification, virtual humanoid, camera network, assistance system, optimal configuration, genetic algorithm.

## ملخص

في الوقت الحالي، التقاط الحركة بواسطة عدسات الكاميرة يمثل أداة هامة في العديد من المجالات مثل: الترفيه الرقمي، التحاليل الطبية والتطبيقات الرياضية. أما مستقبلا، فانه يمتلك القدرة على تقديم مزايا كبيرة في واجهات التحكم المتقدمة للروبوتات، والتي يمكن استخدامها في مهام التحكم عن بعد. في كل من هذه المجالات، يمكن استخدام الحركة الملتقطة بدقة متناهية في تثبيت مدى قربها للواقع، بالإضافة إلى تأكيد تحليلها بدقة و مراقبتها بالتفصيل.

بالنسبة لأنظمة التقاط الحركة البصرية (التي تسمى أيضا: متعددة الكاميرات)، تثبيت الكاميرات لديه تأثير كبير على أدائها. تحديد تعديلات الكاميرات (الموقع والوجهة) لا يزال مشكلة مفتوحة. في الوقت الحاضر، تسترشد التعديلات في المقام الأول على توجيهات المشغل البشري، والتي تتطلب دائما خبرة ودراسة كبيرتين خصوصا عندما تكون الحركة معقدة مع وجود عوائق. لذلك، تنشأ العديد من المشاكل بسبب التعديل السيئ للكاميرات. تتمثل هذه المشاكل في: أولا) فقدان البيانات بسبب العوائق، ثانيا) عدم القدرة على التعرف على العلامات. لاستكشاف كيف يمكن حل هذه المشاكل، يقدم هذا البحث نظام دعم لوضع الكاميرات. يتعلق الموضوع بمحاكاة أفضل تعديل للكاميرات، الذي يسمح بالتقاط العلامات الموضوعية على الروبوت الاصطناعي بأفضل طريقة. هذا الروبوت الافتراضي ينفذ حركة مشابهة للحركة في الواقع، والمتمركزة في بيئة مماثلة للبيئة الحقيقية (إنشاء الحواجز الافتراضية إذا لزم الأمر). تكمن المشكلة إذا في الحصول على أفضل محاكاة لشبكة الكاميرات من أجل التقاط حركة الروبوت الافتراضي.

لتوجيه تطوير نظام مساعدة وضع الكاميرات لالتقاط الحركة (SAPC-MOCAP)، قمنا بالاعتماد على منهجية بحث بحيث تم بناء نموذج قادر على تتبع العلامات. لتقييم دقة ومثانة التكنولوجيا المطورة، أجرينا سلسلة من عمليات المحاكاة على ثلاث السيناريوهات دراسة (المشي والجري والقفز). نتائج هذه المحاكاة تشير إلى أن SAPC-MOCAP يدعم تحسين أداء أنظمة التقاط الحركة البصرية الحالية. تتضمن تحسينات الأداء: أولا) تخفيض متوسط عدد العوائق أثناء التقاط الحركة، ثانيا) تخفيض مدة عرقلة التقاط الحركة، وثالثا) تحديد أمثل للعلامة، دون تقييد الحركة. تمثل التحسينات في هذه المجالات تطورا ضخما في أداء ودقة أنظمة التقاط الحركة البصرية ويمكن أن يزيد مداها إلى حد كبير في مجالات التطبيق.

**الكلمات المفتاحية:** التقاط الحركة، الأنظمة البصرية لإتقاط الحركة، تعديل الكاميرات، عوائق، تحديد العلامات، روبوت افتراضي، شبكة الكاميرا، التعديل الأمثل، الخوارزمية الجينية.

# Productions scientifiques

## 1. Publications

- Aissaoui, A., Baarir, Z., Ouafi, A., Pudlo, P., Taleb-Ahmed, A., Gillet, C., & Deraz, F. (2014). Optimisation technique of camera placement for motion capture simulations. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 17(sup1), 122-123.
- Aissaoui, A., Baarir, Z., Ouafi, A., Pudlo, P., Taleb-Ahmed, A., Gillet, C., & Deraz, F. (2015). Conception of an Assistance Cameras Placement System for Human Motion Capture based on a Guided Genetic Algorithm. *Virtual Reality*, Under Review.

## 2. Communications

- Azeddine Aissaoui, Zine-Eddine Baarir, Abdelkrim Ouafi, Philippe Pudlo, Abdelmalik Taleb-ahmed, Christophe Gillet, Foued Derraz, «Optimization technique for Motion capture simulations», 39<sup>ème</sup> congrès de la Société de Biomécanique 'SB2014', Valenciennes, France 27-29 aout 2014.
- Azeddine Aissaoui, Zine-Eddine Baarir, Abdelkrim Ouafi, Philippe Pudlo, Abdelmalik Taleb-ahmed, Christophe Gillet, Foued Derraz, «Evaluating and optimizing multi-camera network positioning for motion capture tasks », First International Conference on Electrical Engineering ICEEB'14, Biskra, 07-08 December, 2014.

## 3. Workshops

- Azeddine Aissaoui, Zine-Eddine Baarir, Abdelkrim Ouafi, Philippe Pudlo, Abdelmalik Taleb-ahmed, Christophe Gillet, Foued Derraz, «Système d'optimisation de positionnement des caméras pour la Motion capture», 1<sup>er</sup> Workshop in Images, Graphiques et Vie Artificielle 'IGVA'2013', Biskra, Algérie 16-18 juin 2013.
- Azeddine Aissaoui, Zine-Eddine Baarir, Abdelkrim Ouafi, Philippe Pudlo, Abdelmalik Taleb-ahmed, Christophe Gillet, Foued Derraz, «Optimisation de placement de caméras pour la simulation biomécanique basée sur la Motion Capture», 2<sup>ème</sup> Workshop in Images, Graphiques et Vie Artificielle 'IGVA'2014', Biskra, Algérie 08-10 juin 2014.

# Table des matières

<b>Table des matières</b> .....	i
<b>Liste des figures</b> .....	iii
<b>Liste des tableaux</b> .....	v
<b>Chapitre 1 : Introduction</b>	
1.1. Vue d'ensemble .....	3
1.1.1. Aperçu sur la Motion Capture .....	3
1.1.2. Approches optique pour la Motion Capture .....	4
1.2. Problématique.....	6
1.3. Contribution.....	6
1.4. Questions de recherche.....	7
1.5. Importance .....	7
1.6. Structure de la thèse.....	7
<b>Chapitre 2 : Motion Capture (MOCAP) <i>(État de l'art)</i></b>	
2.1 Introduction .....	10
2.2 Motion Capture.....	10
2.3 Applications de la Motion Capture.....	10
2.3.1 Film, Réalité virtuelle et Jeux.....	11
2.3.2 Sciences du mouvement .....	11
2.3.3 Médecine .....	12
2.3.4 Art et conception .....	12
2.3.5 Contrôle et interfaces.....	12
2.4 Motion Capture pour le mouvement humain.....	12
2.5 Technologies pour la Motion Capture .....	13
2.5.1 Systèmes Optiques.....	13
2.5.2 Systèmes de lumière structurée .....	14
2.5.3 Systèmes à fibres optiques.....	15
2.5.4 Systèmes acoustiques .....	15
2.5.5 Systèmes à Radiofréquences .....	16
2.5.6 Systèmes mécaniques .....	16
2.5.7 Systèmes à bases de bandes résistives et capteurs tactiles .....	17
2.5.8 Systèmes a bases de capteurs Inertiels / magnétiques .....	17
2.6 Problèmes liés aux technologies actuelles de la Motion Capture.....	18

2.7	Approches optique pour la Motion Capture .....	19
2.7.1	Motion Capture optique à base de marqueurs .....	20
2.7.2	Problème de perte des données.....	25
2.7.3	Problème d'identification de marqueurs.....	27
2.7.4	Problème de reconstruction 3D des marqueurs .....	29
2.8	Défis pour cette recherche .....	30
2.9	Conclusion .....	31

### **Chapitre 3 : Système d'Aide au Placement des Caméras pour la Motion Capture (Configuration optimale des caméras)**

3.1	Introduction .....	32
3.2	Défis liés au système d'aide au placement des caméras .....	33
3.3	Travaux liés à la recherche .....	34
3.4	Conception d'un système d'aide au placement des caméras pour la Motion Capture .....	36
3.5	Approche proposée .....	38
3.5.1	Module 1 : Modèle graphique .....	41
3.5.2	Module 2 : Optimisation de placement des caméras par l'algorithme génétique guidé .....	44
3.6	Conclusion .....	66

### **Chapitre 4 : Mise en œuvre, résultats et discussions**

4.1	Introduction .....	68
4.2	Outils de programmation .....	69
4.2.1	Langage de programmation.....	69
4.2.2	Langage « Virtual Reality Modeling » .....	69
4.3	Simulation.....	70
4.3.1	Scénarios de simulation.....	70
4.3.2	Mesures de performance.....	72
4.3.3	Paramètres de simulation.....	72
4.4	Résultats et discussions .....	74
4.4.1	Qualité d'optimisation.....	74
4.4.2	Durée d'optimisation.....	75
4.4.3	Taux de reconstruction .....	77
4.5	Conclusion.....	82

### **Chapitre 5 : Conclusion générale et perspectives**

5.1.	Conclusion générale .....	83
5.2.	Perspectives .....	86

<b>Bibliographie.....</b>	<b>88</b>
---------------------------	-----------



## Liste des figures

<b>Figure 1.1.</b> Architecture de système pour la résolution de problème de positionnement des caméras. . 2	
<b>Figure 2.1.</b> Costume utilisé pour la capture de mouvement optique.....14	14
<b>Figure 2.2.</b> Analyse d'une tête dans un ordinateur avec un scanner laser. .... 14	14
<b>Figure 2.3.</b> Costume utilisé pour la capture de mouvement à base de fibres optiques. .... 15	15
<b>Figure 2.4.</b> Systèmes acoustiques pour détecter une balle avec des impulsions ultrasonores. .... 16	16
<b>Figure 2.5.</b> GPS pour le suivi de mouvement à grandes distances. .... 16	16
<b>Figure 2.6.</b> Système de capture de mouvement mécanique..... 17	17
<b>Figure 2.7.</b> Gant de capteur équipé de bandes résistives et capteurs tactiles..... 17	17
<b>Figure 2.8.</b> Costume utilisé pour la capture de mouvement MARG. .... 18	18
<b>Figure 2.9.</b> Exemple de 4 types de caméras utilisées pour la capture de mouvement optique. .... 19	19
<b>Figure 2.10.</b> Exemple de 2 marqueurs sphériques passifs. .... 21	21
<b>Figure 2.11.</b> Exemple d'un marqueur sphérique actif. .... 23	23
<b>Figure 3.1.</b> Diagramme de l'algorithme de placement de caméras.....37	37
<b>Figure 3.2.</b> Processus d'optimisation par le système d'aide au placement des caméras pour la Motion Capture.....40	40
<b>Figure 3.3.</b> Modélisation d'une scène de capture de mouvement en 3D.....41	41
<b>Figure 3.4.</b> Modélisation d'une caméra en 3D : La caméra est placée selon les paramètres $x, y, z, \alpha, \beta$ et $\gamma$ par rapport à son repère.....42	42
<b>Figure 3.5.</b> Représentation d'un exemple de positionnement des tags sur des segments du corps de l'humanoïde conformément à ce qui est envisagé dans le monde réel.....43	43
<b>Figure 3.6.</b> Modélisation d'une scène de capture de mouvement en 3D, avec un humanoïde et des caméras. La caméra est placée selon les paramètres $x, y, z, \alpha, \beta$ et $\gamma$ par rapport à son repère.....43	43
<b>Figure 3.7.</b> Organigramme de la procédure d'initialisation.....49	49
<b>Figure 3.8.</b> Zone de recherche des emplacements initiaux des caméras (zone de capture).....50	50
<b>Figure 3.9.</b> Calcul des orientations $\alpha$ et $\beta$ d'une caméra positionnée $[X', Y', Z']$ par rapport à son cas initial $[X, Y, Z]$ .....51	51
<b>Figure 3.10.</b> Schématisation de la TDE.....53	53
<b>Figure 3.11.</b> Exemple illustrant l'algorithme de labellisation.....56	56
<b>Figure 3.12.</b> Exemple d'acquisition d'une caméra sur la même partie de l'humanoïde de la Figure 3.11 (b).....57	57
<b>Figure 3.13.</b> Contraintes que doit satisfaire un emplacement optimal de caméras pour la Motion Capture.....60	60
<b>Figure 3.14.</b> Emplacement des 5 tags de la tête de l'humanoïde.....61	61
<b>Figure 3.15.</b> Mouvement de la tête de la droite vers la gauche sur 8 trames.....61	61

<b>Figure 3.16.</b> Emplacement d'un réseau de 5 caméras pour capturer les 5 tags de la tête.....	61
<b>Figure 3.17.</b> Récupération des coordonnées des tags selon le tableau 3.3.....	64
<b>Figure 3.18.</b> Taux de récupération des tags par un réseau de caméras pour capturer les 5 tags de la tête.....	65
<b>Figure 4.1.</b> Interface du VRML.....	70
<b>Figure 4.2.</b> Trois scénarios de test pour évaluer les performances d'AGG vs AG.....	71
<b>Figure 4.3.</b> Qualité d'optimisation de AGG vs AG selon la valeur de fitness des réseaux de caméras générés.....	75
<b>Figure 4.4.</b> Durée d'optimisation du placement des caméras selon le nombre de tags reconstruits par rapport au nombre d'itérations effectuées par l'AGG et l'AG.....	76
<b>Figure 4.5.</b> Coût d'optimisation des deux algorithmes AGG vs AG donné par le taux de reconstruction des tags avec 4, 6 et 10 caméras.....	78
<b>Figure 4.6.</b> Représentation de la meilleure configuration d'un réseau de caméras par l'AGG et l'AG pour les 3 scénarios et les 2 environnements. (a, b, c).....	81

---

---

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau 2.1.</b> Exemple de méthodes d'identification de marqueurs communément utilisées.....	27
<b>Tableau 3.1.</b> Paramètres utilisés dans le travail.....	39
<b>Tableau 3.2.</b> Perception des 5 tags par les 5 caméras sur 8 trames.....	62
<b>Tableau 3.3.</b> Nombre de caméras captant chaque tag pour les différentes trames.....	63
<b>Tableau 3.4.</b> Nature des caméras captant chaque tag pour les différentes trames.....	63
<b>Tableau 4.1.</b> Paramètres des caméras utilisées et leurs valeurs nominales.....	73
<b>Tableau 4.2.</b> Paramètres des deux algorithmes (AGG et AG).....	73
<b>Tableau 4.3.</b> Modèle de l'humanoïde utilisé dans le VRML et paramètres de tests.....	73

---

## Introduction

---

### Sommaire

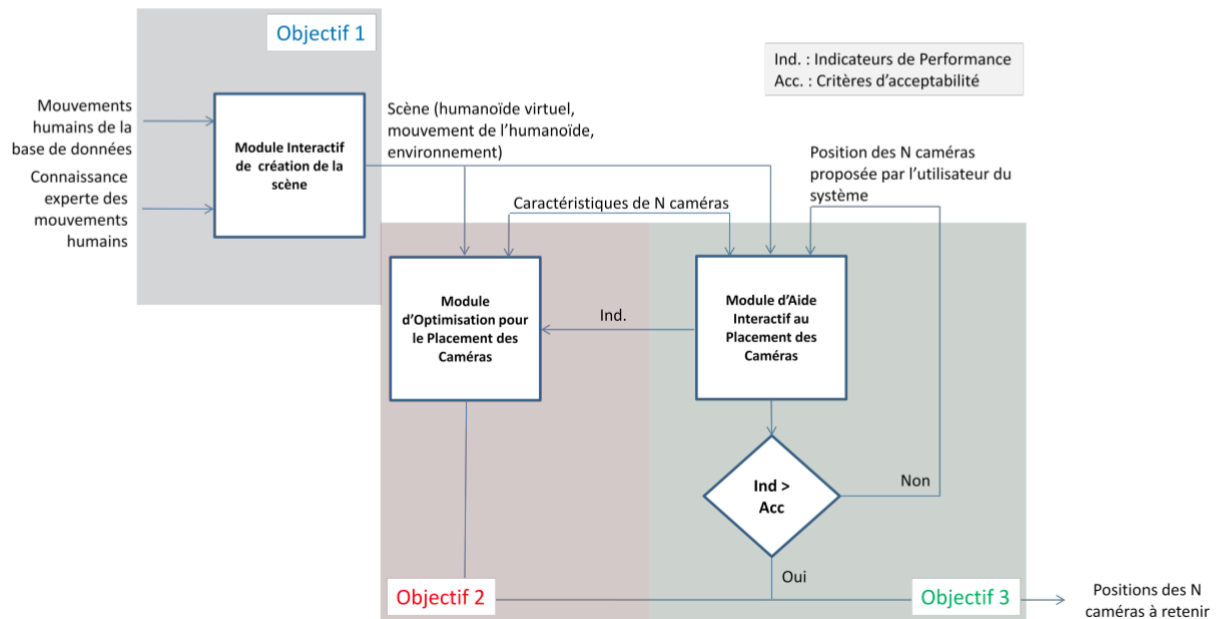
---

1.1. Vue d'ensemble .....	3
1.1.1. Aperçu sur la Motion Capture .....	3
1.1.2. Approches optique pour la Motion Capture .....	4
1.2. Problématique.....	6
1.3. Contribution.....	6
1.4. Questions de recherche.....	7
1.5. Importance.....	7
1.6. Structure de la thèse.....	7

---

Cette thèse de doctorat est l'aboutissement d'une collaboration entre le Laboratoire de Recherche des Systèmes Experts, Imagerie et leurs Applications dans l'ingénierie "LESIA" de l'Université Mohamed Khider de Biskra en Algérie et le Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines "LAMIH" de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis en France. Le projet traite la problématique de positionnement automatique des caméras dans un système de Motion Capture à base de marqueurs. En effet, le problème est dû au positionnement manuel des caméras dans la scène par un opérateur humain, ce qui représente un travail fastidieux et peu précis nécessitant l'utilisation d'un nombre élevé de caméras.

Le projet proposé vise à développer un système qui prend en entrée une scène virtuelle, simulant la scène réelle, un personnage virtuel simulant le sujet réel, et le mouvement souhaité du sujet. Ce système produit en sortie le nombre optimal de caméras nécessaires à la capture du mouvement de l'objet réel ainsi que les positions optimales de ces caméras. Pour résoudre cette problématique, ce projet a été divisé selon trois modules (Figure 1.1).



**Figure 1.1.** Architecture du système pour la résolution du problème de positionnement des caméras.

- 1. Module interactif de création de la scène :** il vise à développer un outil de création de scène en vue de positionnement de caméras. Cette partie consiste à modéliser une scène virtuelle, simulant la scène réelle.
- 2. Module d'optimisation pour le placement des caméras :** Les informations sur l'objet, son mouvement et l'environnement sont fournis comme entrées à ce module qui les utilise avec des algorithmes d'optimisation adéquats pour fournir un positionnement optimal des caméras.
- 3. Module d'Aide Interactif au Positionnement des Caméras :** Ce module sert à optimiser le module précédent en lui proposant des positions initiales permettant sa convergence. Ces positions peuvent être extraites d'une base de cas après une étude de similarité.

Cette thèse s'intéresse au deuxième module, visant l'optimisation du placement des caméras pour la capture d'un mouvement.

Ce chapitre introduit notre thèse. Il commence, tout d'abord, par un vue d'ensemble du domaine de recherche. Il représente, ensuite, la problématique de l'étude et enfin notre contribution au cours de cette thèse.

### 1.1. Vue d'ensemble

La capture de mouvements à l'aide de marqueurs est aujourd'hui une technologie fondamentale dans l'étude et l'analyse du mouvement humain. Cette technologie utilise des caméras pour extraire des informations de mouvement à partir du sujet d'intérêt. Cela se fait généralement, grâce à l'utilisation d'une dizaine (ou plus) de caméras placés autour d'une zone de capture bien définie, de manière que chaque marqueur disposé sur le sujet soit vu par au moins deux caméras. Les positions tridimensionnelles des marqueurs sont calculées par triangulation et définissent ainsi le mouvement du sujet. Quand le mouvement est complexe et/ou qu'il se réalise en présence d'obstacles, la capture des marqueurs est plus difficile. L'opérateur humain recherche alors la position des caméras permettant de minimiser les occlusions des marqueurs. Cette tâche reste aujourd'hui encore difficile et demande du temps et de nombreux essais de validation, et ce malgré la grande expérience et expertise de l'opérateur humain.

Notre étude a pour objectif de développer un algorithme informatique pour aider l'opérateur au placement des caméras afin d'améliorer la capture des mouvements humains. Il s'agit de simuler la meilleure position des caméras permettant la capture de tags (futurs marqueurs) attachés à un humanoïde de synthèse. Cet humanoïde virtuel réalise un mouvement similaire au mouvement que ferait le sujet en réalité et est positionné dans un environnement semblable à l'environnement réel (ex. création d'obstacles virtuels si besoin). La problématique est alors de simuler le meilleur réseau de caméras pour la scène virtuelle spécifiée. Cette approche intégrée permet à l'opérateur du système de modéliser et examiner les scénarios de son étude tout en bénéficiant d'un placement automatique des caméras, ce qui pourrait lui servir grandement.

#### 1.1.1. Aperçu sur la Motion Capture

L'étude et l'analyse du mouvement humain intéressent de nombreux domaines d'application. Dans le domaine médical par exemple, des disciplines telles que la physiologie, la biomécanique ou encore les neurosciences cherchent à comprendre et à interpréter au mieux le mouvement humain. Dans le sport, l'étude du mouvement et du geste a pris une grande importance pour améliorer les performances des sportifs. Plus récemment, les domaines du multimédia (jeux vidéo, cinéma ...), cherchant à animer des humains virtuels de manière réaliste, s'intéressent également à l'analyse du mouvement humain. La robotique humanoïde est

également un domaine qui s'inspire de l'étude du mouvement humain pour animer des robots anthropomorphes. C'est ainsi que des systèmes d'observation des corps en mouvement connaissent un essor qui ne cesse d'évoluer avec le développement des nouvelles technologies.

Il existe, à l'heure actuelle, des systèmes de capture de mouvement commerciaux classiquement utilisés pour les domaines d'application cités précédemment. Ces systèmes comprennent :

1. Les systèmes optiques
2. Les systèmes à base de bandes résistives
3. Les systèmes à base de capteurs inertiels / magnétiques

Ces trois technologies sont citées ici afin de fournir un bref aperçu de quelques technologies de capture de mouvement les plus utilisées. Un aperçu plus détaillé des technologies disponibles est présenté dans le chapitre 2.

Les systèmes de capture de mouvement optiques proviennent de la vision par ordinateur et utilisent des caméras pour capturer le mouvement. Cette technologie est préférable dans la plupart des productions en raison de sa haute précision [1]. La technologie à base de bandes résistives est incorporée dans des combinaisons ou dans des gants de capteur pour permettre la capture de poses à intervalles de temps discrets [2, 3]. Les systèmes de suivi inertiels / magnétiques utilisent des capteurs et des accéléromètres de vitesse angulaire en combinaison avec des capteurs magnétiques pour capturer le mouvement [4]. Ce type de systèmes sont également appelés dans la littérature MARG utilisés avec succès pour suivre l'ensemble du corps humain en temps réel [5].

Dans cette recherche, nous nous intéressons principalement aux systèmes de capture de mouvements optiques, car il y a un certain nombre d'avantages liés à cette technologie par rapport aux autres technologies. Une explication plus approfondie de la façon dont cette conclusion a été atteinte est présenté dans le chapitre 2.

### **1.1.2. Approches optique pour la Motion Capture**

La capture de mouvement optique utilise des caméras pour extraire des informations de mouvement à partir des sujets d'intérêt [6, 7]. Lors du positionnement de ces caméras autour du volume de capture, il est important d'utiliser des paramètres de translation et de rotation définis avec précision. Ceci est causé par le fait que les résultats du processus de capture de mouvement

ne seront valides que dans le volume de visibilité exprimée par les caméras, et seulement dans les zones du volume de visibilité, où l'objet suivi peut être observé à partir d'au moins de deux caméras simultanément.

Il existe deux classes principales de la technologie de capture de mouvement optique. Ces deux classes sont couramment appelées systèmes de capture de mouvements optiques à base de marqueurs et sans marqueurs. Les systèmes sans marqueurs sont développés dans le but d'éliminer les encombrements dans les systèmes de capture de mouvement, et sont utilisés dans la surveillance et le contrôle des applications où il est difficile de monter des marqueurs sur les sujets [8, 9]. Les systèmes sans marqueurs actuels ne sont pas capables de suivre des mouvements complexes et détaillés de manière suffisamment efficace pour appuyer le traitement en temps réel [8, 10]. Les systèmes de capture de mouvement optique à base de marqueurs résout ce problème en conservant les principaux problèmes de vision en utilisant un éclairage contrôlé, des caméras optiques connues et par des marqueurs fixés sur les sujets à suivre [11, 12]. On peut donc dire que les systèmes de capture de mouvement optique à base de marqueurs, en dépit de tous les progrès des systèmes sans marqueurs, sont encore les plus précis et les plus robustes pour le suivi 3D [13, 14].

Il existe deux principales catégories de systèmes de capture de mouvement optique à base de marqueurs et la différence entre ces systèmes réside dans le type de marqueurs qui sont utilisés. Ces deux types de marqueurs peuvent être désignés comme actifs et passifs. Pour les marqueurs actifs, leur identification se fait de manière automatique, le plus souvent en attribuant une série de flashes individuels pour chaque marqueur [15, 16]. Cela permet de traiter les données beaucoup plus rapidement. Par contre, leur principal inconvénient est qu'ils ne peuvent pas être identifiés automatiquement dans une seule image, sans restreindre les mouvements de l'utilisateur. Un autre problème avec les marqueurs actifs réside dans le fait que les occlusions causent facilement la disparition des informations importantes.

Le principal inconvénient des marqueurs passifs réside dans le fait qu'ils doivent être étiquetés manuellement ou que le sujet doit exprimer une pose de démarrage bien spécifiée, afin d'identifier correctement chaque marqueur. Un autre problème avec les marqueurs passifs est que leur identité est perdue après une occlusion, même si tous les marqueurs ont été correctement identifiés initialement. Par conséquent, le logiciel de suivi détecte à tort un "nouveau" marqueur à chaque fois qu'un marqueur occulté réapparaît, et les trajectoires des marqueurs valides doivent donc être traitées manuellement pour résoudre ce problème [17].



Cependant, malgré les inconvénients avec les systèmes à base de marqueurs, ils fournissent toujours actuellement la forme la plus précise, robuste et rapide de suivi 3D [13, 15, 16]. Une analyse plus détaillée des marqueurs passifs et actifs est présentée dans le chapitre 2.

### **1.2. Problématique**

Le but principal de ce travail de thèse est d'améliorer le processus de capture de mouvement à base de marqueurs. Nous avons constaté que dans la pratique, il y a un besoin d'améliorer une activité principale. Cette activité consiste à trouver le placement optimal des caméras dans une scène donnée, compte tenu des diverses contraintes associées aux caméras et à l'environnement de capture. En se basant sur ce constat un algorithme d'optimisation est conçu et mis en œuvre pour répondre à ce besoin (désigné comme SAPC-AGG, Système d'Aide au Placement des Caméras par un Algorithme Génétique Guidé). Ce système est décrit en détails dans les chapitres suivants.

Le résultat de cette étude est double. D'une part, ce modèle donnera un aperçu vérifiable à un domaine où les décisions de conception sont largement régies par l'intuition de l'opérateur humain qui manipule le système de Motion Capture. Une mise en œuvre de logiciels de ce modèle donnera à cet opérateur un outil pour tester rapidement les configurations possibles. D'autre part, nous démontrerons comment une meilleure compréhension théorique de réseaux multi-caméras peut conduire à des algorithmes spécifiques à la Motion Capture qui surpassent la méthode standard.

### **1.3. Contribution**

L'investigation et le développement d'un Support de Modélisation des Scènes de Capture de Mouvements ainsi que la conception et la construction d'un nouvel algorithme d'optimisation pour résoudre le Problème de Positionnement Automatique de Réseau de Caméras dans une zone de capture sont nos deux contributions principales.

Le SAPC-AGG aboutit à une suggestion automatique améliorée d'une solution heuristique afin de maximiser la capture des marqueurs tout en minimisant le nombre de caméras utilisées, en tenant compte des contraintes associées à la tâche. Le SAPC-AGG, comparé aux autres modèles d'optimisation mis en œuvre, améliore la qualité, la durée et le coût d'optimisation en termes de capture des marqueurs avec le minimum de caméras possible.

#### **1.4. Questions de recherche**

Pour guider l'enquête menée dans cette recherche, plusieurs questions de recherche ont été mises au point. Ces questions sont énumérées ci-dessous :

1. Est-ce qu'un système d'aide au placement des caméras peut aider à la réduction de complexité des données à traiter après une capture de mouvement ?
2. Est-ce qu'un système d'aide au placement des caméras peut réduire les problèmes associés à la perte des données ?
3. Est-ce qu'un système d'aide au placement des caméras peut résoudre les problèmes d'identification de marqueurs ?
4. Est-ce qu'un système d'aide au placement des caméras peut aider à l'amélioration de la reconstruction 3D des données de capture de mouvement ?

Pour répondre à ces questions, nous effectuons une série de simulations pour mesurer les performances de notre nouveau processus d'aide, le SAPC-AGG.

#### **1.5. Importance**

Cette recherche vise à améliorer la technologie de capture de mouvement optique actuelle basée sur les marqueurs. Bien que la capture de mouvement optique par marqueurs est actuellement la méthode la plus précise et la plus robuste pour le suivi 3D [13, 14], ces systèmes présentent un certain nombre d'inconvénients et limitations majeurs, qui ont un impact sur leur précision, efficacité et coût. Cette recherche a le potentiel d'améliorer le domaine de la capture de mouvement dans son ensemble en abordant ces problèmes.

#### **1.6. Structure de la thèse**

Cette thèse est structurée comme suit :

Le chapitre 2 présente un état de l'art qui couvre les principaux domaines appropriés à cette recherche. L'objectif est de fournir au lecteur des informations de base nécessaires pour enquêter sur ce thème et d'identifier les problèmes avec les systèmes de capture de mouvements actuels.

Dans le chapitre 3 la conception du système d'aide au placement des caméras pour la Motion Capture est présentée. Cette conception tient compte des problèmes associés aux systèmes de capture de mouvements actuels. Dans cette conception, nous étudierons la variation

des paramètres du système et les sources d'erreur et leur un impact sur les performances de capture en 3D.

Le Chapitre 4 présente les résultats de simulation effectuée pour évaluer la fonctionnalité du système d'aide au placement des caméras conçu pour la Motion Capture optique. Ces résultats concernent la qualité et la durée d'optimisation ainsi que le taux de reconstruction. Des discussions concernant ces paramètres sont ensuite données.

Le chapitre 5 présente une conclusion générale sur notre travail de recherche réalisé, ainsi que certaines perspectives éventuelles.

## Motion Capture (MOCAP)

*(État de l'art)*

---

### Sommaire

---

2.1	Introduction .....	10
2.2	Motion Capture.....	10
2.3	Applications de la Motion Capture.....	10
2.3.1	Film, Réalité virtuelle et Jeux .....	11
2.3.2	Sciences du mouvement .....	11
2.3.3	Médecine .....	12
2.3.4	Art et conception .....	12
2.3.5	Contrôle et interfaces .....	12
2.4	Motion Capture pour le mouvement humain.....	12
2.5	Technologies pour la Motion Capture .....	13
2.5.1	Systèmes Optiques .....	13
2.5.2	Systèmes de lumière structurée .....	14
2.5.3	Systèmes à fibres optiques .....	15
2.5.4	Systèmes acoustiques .....	15
2.5.5	Systèmes à Radiofréquences .....	16
2.5.6	Systèmes mécaniques .....	16
2.5.7	Systèmes à bases de bandes résistives et capteurs tactiles.....	17
2.5.8	Systèmes a bases de capteurs Inertiels / magnétiques.....	17
2.6	Problèmes liés aux technologies actuelles de la Motion Capture .....	18
2.7	Approches optique pour la Motion Capture .....	19
2.7.1	Motion Capture optique à base de marqueurs .....	20
2.7.2	Problème de perte des données.....	25
2.7.3	Problème d'identification de marqueurs.....	27
2.7.4	Problème de reconstruction 3D des marqueurs .....	30
2.8	Défis pour cette recherche .....	30
2.9	Conclusion .....	31

---

### 2.1 Introduction

Ce chapitre donne un aperçu de la littérature disponible dans le domaine de la capture de mouvement et une discussion détaillée des questions liées directement à cette recherche. Les approches optiques sont actuellement les techniques de suivi 3D les plus robustes et précises disponibles [13, 14]. L'accent sera mis sur les systèmes à base de marqueurs parce qu'ils sont les plus largement utilisés, et parce qu'il y a place pour des améliorations dans leur conception. Ce chapitre résume les problèmes associés à la technologie de capture de mouvement optique actuelle basée sur les marqueurs et une interrogation sur les processus nécessaires pour capturer et reconstruire les données 3D de façon précise et robuste. Les questions identifiées précédemment formeront le point de départ pour la conception d'un nouveau système d'aide capable de fournir les informations nécessaires pour améliorer la reconstruction et l'identification des positions 3D des marqueurs.

### 2.2 Motion Capture

La Motion Capture est le processus de capture d'un mouvement réel. Parfois, la définition comprend également les processus impliqués dans la reconstruction de ce mouvement capturé. La capture de mouvement peut donc être utilisée pour capturer et reconstruire les mouvements réalistes qui contiennent les détails et les nuances produites par les sujets suivis [11]. La capture de mouvement en tant que domaine de recherche est assez récente. *Tom Calvert* a été un leader dans l'industrie et a développé un des premiers systèmes de capture de mouvement en coopération avec Labanotation dans les années 1980 [18]. Depuis, plusieurs travaux de recherche ont été menés dans ce domaine. La capture de mouvement est élaborée pour soutenir le réalisme dans les cas où l'on vise à simuler le mouvement complexe d'objets du monde réel. Elle est donc largement utilisée à la fois dans l'industrie du cinéma et des jeux où le réalisme est un facteur important pour la suspension de l'incrédulité du spectateur / réalisateur. La capture de mouvement est également devenue populaire car elle peut accélérer le processus d'animer des objets. L'applicabilité des systèmes de capture de mouvement est largement démontrée dans la littérature.

### 2.3 Applications de la Motion Capture

Divers domaines d'application sont concernés par la capture de mouvement tels que :

1. Films, Réalité virtuelle et Jeux

2. Sciences du mouvement
3. Médecine
4. Art et conception
5. Contrôle et interfaces

### **2.3.1 Films, Réalité virtuelle et Jeux**

La capture de mouvement est largement utilisée dans le domaine du divertissement numérique et en particulier dans des domaines tels que les films, les simulations, la réalité virtuelle et les jeux. Elle est largement utilisée dans les industries du divertissement, car ils dépendent sur le réalisme du mouvement, en particulier pour les personnages humains, afin de maintenir l'effet de l'audience "suspension de l'incrédulité". La capture de mouvement permet à cet effet d'atteindre un processus rapide, précis et relativement peu coûteux [1, 6]. En conséquence, la Motion Capture a fourni un impact économique important sur le jeu et les industries du contenu numérique [19].

### **2.3.2 Sciences du mouvement**

La Motion Capture est utilisée à différentes fins par des chercheurs et des développeurs de produit travaillant dans le cadre des sciences du mouvement. L'extrême exactitude de la Motion Capture et son utilisation en dynamique sont grandement mises à profit dans la recherche biomécanique, les sciences sportives, la rééducation et l'ergonomie. L'analyse du mouvement complexe est largement utilisée dans les études biomécaniques des humains et des animaux [12, 20, 21, 22, 23, 24]. Dans ces cas, les environnements sont contrôlés et des modèles sont utilisés pour interpréter les données [9]. Une procédure typique utilisée pour la réalisation d'études biomécaniques, implique "l'obtention des données 3D, l'exécution d'une analyse cinématique et le calcul des forces et des moments correspondants pour un mouvement d'intérêt" [12]. Ce genre d'études peut fournir une meilleure compréhension du mouvement humain [25]. Cette connaissance peut alors aider dans le processus de formulation des modèles de mouvement idéal pour différentes tâches ou événements. Ces modèles de mouvement peuvent à leur tour être utilisés comme normes pour les comparer avec les mouvements capturés dans les systèmes d'amélioration des performances sportives. Une grande quantité d'effort de recherche a donc été mis dans le développement des systèmes de capture de mouvement pour les études biomédicales des épreuves sportives. Certains sports où la capture de mouvement a été utilisée avec succès comprennent : course à pied, saut à la perche, javelot, course de fond,

saut en longueur, saut en hauteur, golf, tennis, gymnastique, natation et lancer de marteau [24, 25].

### **2.3.3 Médecine**

La capture de mouvement est également utilisée dans des applications médicales pour aider à déterminer le degré de la maladie chez les patients atteints de la maladie de Parkinson, paralysie cérébrale, lésion cérébrale traumatique et d'autres troubles neurologiques [25-27]. La technologie de capture de mouvement est aussi utilisée comme un outil d'aide pour l'analyse des mouvements des patients qui sont en réhabilitation de blessures [28]. Plusieurs travaux de recherche sur la capture de mouvement pour les applications médicales ont mis l'accent sur les blessures sportives, du fait qu'ils représentent une dépense de soins majeure. L'analyse des mouvements capturés dans le cas du traitement des blessures sportives est utilisée comme outil de diagnostic pour évaluer les traitements et développer de nouvelles méthodes de traitement plus efficaces.

### **2.3.4 Art et conception**

La capture de mouvement peut également être utilisée dans les domaines de l'art et de la conception. Les connaissances sur le mouvement humain peuvent, dans ce cas, être utilisées pour guider la conception d'objets ergonomiques et pour animer des mannequins virtuels [29]. La capture de mouvement est également suggérée pour une utilisation dans les visites virtuelles à travers les musées et les galeries [9, 12, 28, 29, 30, 31].

### **2.3.5 Contrôle et interfaces**

D'autres recherches suggèrent l'utilisation de la Motion Capture comme composante dans le pilotage gestuel des interfaces de contrôles, qui peut être utilisé pour les tâches de télémanipulation dans des environnements distants et / ou dangereux [9, 12, 30, 31]. Cela pourrait impliquer le contrôle des télécommandes soit simples ou multiples. Ce dernier pourrait soutenir un seul homme avec mappage et d'interagir avec de multiples sites distants à tout moment.

## **2.4 Motion Capture pour le mouvement humain**

Il est possible de suivre les mouvements de deux objets : rigide avec des formes statiques et/ou articulés au corps souples. Les objets suivis peuvent donc être soit fixes, animés, animaux

ou humains. Ce qui est important est que la technologie de capture de mouvement est adaptée aux domaines d'applications impliquant l'être humain ou non. Par exemple, il est nécessaire d'utiliser une technologie de capture différente pour enregistrer le mouvement d'un oiseau qui vole loin, de celle pour enregistrer les mouvements d'un corps humain qui se déplace dans un petit espace restreint.

Cette thèse se concentre sur les technologies de capture de mouvement utilisées pour capturer le mouvement humain.

### **2.5 Technologies pour la Motion Capture**

Différentes technologies de capture de mouvement sont développées. La plupart de ces technologies utilisent un ou plusieurs systèmes de capteurs suivants pour capturer le mouvement :

1. Systèmes optiques
2. Systèmes de lumière structurée
3. Systèmes à fibres optiques
4. Systèmes acoustiques
5. Systèmes à Radiofréquences
6. Systèmes mécaniques
7. Systèmes à bases de Bandes résistives et capteurs tactiles
8. Systèmes à bases de capteurs Inertiels / magnétiques

#### **2.5.1 Systèmes Optiques**

Les systèmes de capture de mouvement optiques utilisent des caméras pour capturer une série d'images d'un sujet. L'information d'intensité dans ces images est ensuite utilisée pour estimer la pose et le mouvement des sujets suivis [1]. Cette technologie est préférable dans la plupart des productions en raison de sa haute précision [14, 30, 32]. Dans la figure 2.1, on peut observer un acteur dans un costume utilisé dans la capture de mouvement à base de marqueurs.

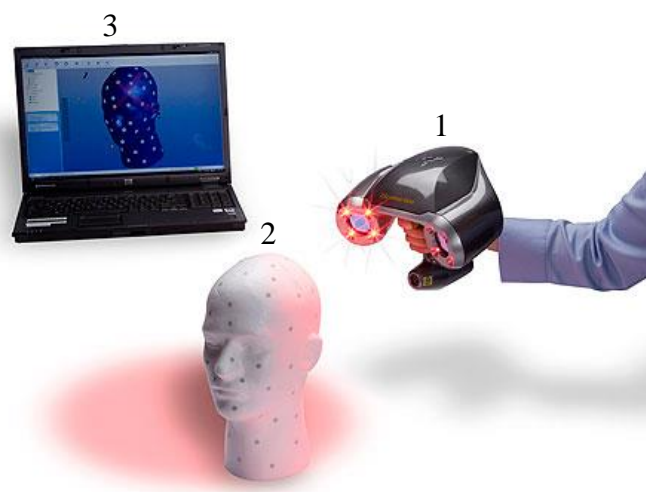




**Figure 2.1.** Costume utilisé pour la capture de mouvement optique.

### 2.5.2 Systèmes de lumière structurée

Les systèmes de lumière structurée utilisent soit des interféromètres laser pour suivre les données de point à partir de rétroviseurs répartis sur un objet, ou des scanners laser pour capturer des parties d'intérêts d'une scène. Ce groupe de techniques peut donc être utilisé pour suivre les représentations ponctuelles sur les corps en mouvement, ou des organes mobiles complets [33]. On peut observer comment la structure 3D d'une tête est numérisée dans un ordinateur avec un scanner laser, dans la figure 2.2. Un modèle de scanner 3D est présenté dans l'image 1. Une tête est présentée dans l'image 2, on peut observer comment des bandes de couleurs alternées, sont projetées sur la tête. Dans la troisième image, on peut observer le modèle résultant de la tête sur l'ordinateur.



**Figure 2.2.** Analyse d'une tête dans un ordinateur avec un scanner laser.

### 2.5.3 Systèmes à fibres optiques

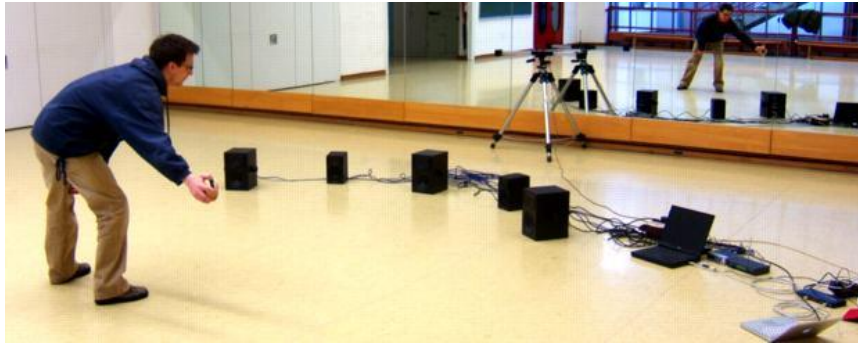
Les systèmes à base de fibres optiques utilisent des câbles optiques attachés le long des chemins principaux qui s'étendent à travers les joints de l'objet suivi, afin de capturer les poses du corps à des intervalles de temps discrets. Dans ces systèmes, des émetteurs de lumière sont attachés à une extrémité des câbles optiques et des capteurs de lumière à l'autre extrémité. On peut observer un acteur dans un costume utilisé dans la capture de mouvement à base de fibres optiques dans la figure 2.3. Pour capturer le mouvement, les angles entre les articulations sont mesurés de manière itérative par l'analyse de la quantité de lumière qui est détecté par le capteur. Le changement apparent de la quantité de lumière enregistrée par le capteur est soit un effet de la variation de la géométrie des fibres ou des changements dans les fluides de couplage [34].



**Figure 2.3.** Costume utilisé pour la capture de mouvement à base de fibres optiques.

### 2.5.4 Systèmes acoustiques

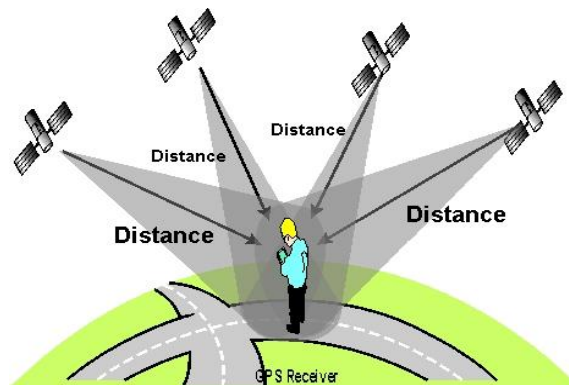
Les systèmes acoustiques détectent également la position des objets à intervalles de temps discrets. Toutefois, ces systèmes utilisent des impulsions ultrasonores pour le suivi. Cela peut être fait soit par des émetteurs sonores posés sur le corps suivi et des capteurs dans l'environnement, ou par le montage d'émetteurs sonores dans l'environnement et des capteurs sur l'objet suivi. Un exemple est présenté dans la figure 2.4. Dans de tels systèmes, la triangulation est souvent utilisée pour déterminer les positions des cibles dans l'espace 3D [34].



**Figure 2.4.** Systèmes acoustiques pour détecter une balle avec des impulsions ultrasonores.

### 2.5.5 Systèmes à Radiofréquences

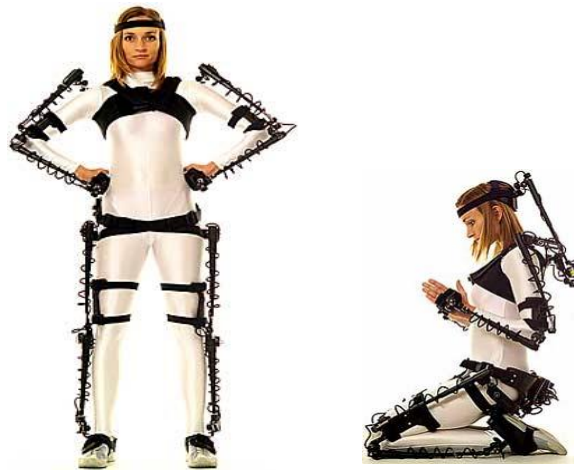
Un des types les plus connus des systèmes à Radiofréquences est le Global Positioning System (GPS), qui peut être utilisé pour le suivi de mouvement à grandes distances. Les progrès récents dans ces types de systèmes rendent possible le suivi des mouvements avec une précision de quelques millimètres, si le système à radiofréquences se situe à quelques centaines de mètres de l'objet suivi [35]. Le suivi avec les systèmes à radiofréquences est semblable à celui des systèmes acoustiques, il est réalisé par triangulation de signaux de données, un exemple de GPS est illustré dans la figure 2.5.



**Figure 2.5.** GPS pour le suivi de mouvement à grandes distances.

### 2.5.6 Systèmes mécaniques

Les systèmes mécaniques sont parmi les technologies les plus anciennes de suivi de mouvement [34]. Ces systèmes utilisent souvent un exosquelette avec des goniomètres comme des dispositifs de mesure d'angle. Ils sont utilisés dans le suivi d'une partie du corps ainsi que dans le suivi de l'ensemble du corps [28, 36]. Un système de suivi mécanique de corps entier est représenté dans la figure 2.6.



**Figure 2.6.** Système de capture de mouvement mécanique.

### 2.5.7 Systèmes à bases de bandes résistives et capteurs tactiles

Les systèmes à bases de bandes résistives et capteurs tactiles peuvent être utilisés en conjonction, et peuvent être incorporés dans des combinaisons ou des gants de capteur pour permettre la capture de poses à intervalles de temps. La CyberGlove est une technologie récente qui utilise des capteurs à bande résistive pour le suivi des mains et des doigts [34]. Un gant équipé d'un capteur tactile et un capteur de pliage est illustré dans la figure 2.7.



**Figure 2.7.** Gant de capteur équipé de bandes résistives et capteurs tactiles.

### 2.5.8 Systèmes à bases de capteurs Inertiels / magnétiques

Ces systèmes de suivi utilisent des capteurs et des accéléromètres de vitesse angulaire en combinaison avec des capteurs magnétiques pour capturer le mouvement [37]. Ils sont également appelés dans la littérature MARG. Les systèmes de suivi Inertiel / magnétiques sont

utilisés avec succès pour suivre l'ensemble du corps humain en temps réel [28, 38]. Un costume utilisé pour le MARG est représenté en figure 2.8.



**Figure 2.8.** Costume utilisé pour la capture de mouvement MARG.

### 2.6 Problèmes liés aux technologies actuelles de la Motion Capture

Toutes les technologies qui peuvent être utilisées pour la capture de mouvement ont leurs forces et leurs faiblesses. Les systèmes de lumière structurée, optique et acoustique ont des difficultés avec le suivi avec précision en présence des occlusions [1, 34]. Certains chercheurs tentent de résoudre ce problème en utilisant des capteurs inertiels / magnétiques, car ils ne sont pas affectés par les occlusions visuelles [34]. Toutefois, il existe un problème d'interférence entre le métal et les composants de ces systèmes. Cela peut rendre difficile de procéder à un suivi normal à l'intérieur d'un laboratoire par exemple, comme la plupart des constructions modernes sont constituées d'un grand nombre de structures métalliques. Un second problème avec les capteurs inertiels / magnétiques est qu'ils sont généralement raccordés à un ordinateur de traitement, qui à son tour limite la liberté de mouvement des utilisateurs [34]. Les systèmes à Radiofréquences sont incapables de pénétrer les objets métalliques et ont des difficultés à résoudre les problèmes liés à l'écho [34]. Les systèmes mécaniques souffrent de problèmes de portée et des interfaces non-conviviales. Ces deux inconvénients compromettent l'un des objectifs principaux de la Motion Capture, qui est de capturer le mouvement de manière réaliste [13]. Le problème avec les systèmes à bandes résistives, câbles de fibres optiques et capteurs tactiles est qu'ils doivent être intégrés dans un costume, ce qui fait qu'il est difficile de calibrer les systèmes pour différents utilisateurs.

Dans les autres parties de ce chapitre, l'accent sera mis sur l'approche optique pour la capture de mouvement, parce que certaines des techniques dans cette catégorie sont actuellement les technologies de suivi 3D les plus robustes et les plus précises disponibles [14, 30]. Apporter des améliorations à cette catégorie de techniques peut donc aider au développement du domaine de la Motion Capture dans son ensemble. Un aperçu plus détaillé des approches optiques pour la Motion Capture est fourni dans la section suivante.

### 2.7 Approches optique pour la Motion Capture

Les systèmes de capture de mouvement optiques utilisent généralement entre 1 et 32 caméras (ou plus) pour capturer le mouvement [39]. L'inconvénient d'utiliser une seule caméra est que la zone où les mouvements peuvent être capturés devient relativement étroite, due au champ de vision limité de la caméra. Pour agrandir la zone de capture, on peut placer plusieurs caméras à différents endroits autour de la zone d'intérêt, de sorte que les sujets soient dans le champ de vision des caméras. La mise en place de plusieurs caméras contribue également à réduire le problème de perte des données causé par les occlusions [38].

Différents types de caméras peuvent être utilisées. Certaines caméras capturent des informations thermiques, d'autres (comme les Capteurs photographiques) captent la lumière du même spectre de couleur [30]. La vitesse de capture des caméras varie également. Certaines caméras, capturent les images avec une taille d'image de 640x480 à 15 images par seconde (ips), d'autres peuvent capturer des images à une résolution de 1280 x 1024 et à des cadences allant jusqu'à 500 ips. Il existe d'autres modèles de caméras qui peuvent avoir des résolutions et des cadences de prise d'images plus élevées. Dans la figure 2.5, on peut observer quatre types de caméras qui peuvent capturer des images à différentes cadences avec différentes résolutions. Elles sont directement connectées à des ordinateurs et sont utilisées pour la capture de mouvement.



**Figure 2.9.** Exemple de 4 types de caméras utilisées pour la capture de mouvement optique.

Il existe deux principaux groupes de systèmes de capture de mouvement optiques dans la littérature. Ces deux groupes sont appelés :

1. Approches sans-marqueurs
2. Approches à base de marqueurs

Les techniques conçues à partir de ces deux groupes sont utilisées pour estimer la pose et le mouvement en analysant les informations d'intensité dans une série d'images [9].

Les systèmes de capture de mouvement sans-marqueurs sont développés dans le but d'éliminer les systèmes de capture de mouvement à base de marqueurs, estimé encombrants [8]. Ces systèmes sont utilisés dans des applications de surveillance et de contrôle où il est difficile de monter des marqueurs sur les sujets suivis [8, 10]. Cependant, le problème avec les systèmes sans-marqueurs actuels, est qu'ils sont incapables de suivre les mouvements complexes et détaillés de manière suffisamment efficace pour effectuer le traitement en temps réel [13]. Les chercheurs dans [13] indiquent qu'il y a de sérieux problèmes avec les approches sans-marqueurs actuelles pour la capture de mouvement optique, d'autres chercheurs affirment que les systèmes de capture de mouvement optique à base de marqueurs sont actuellement les technologies de suivi 3D les plus précises et les plus robustes [11, 12, 14]. Cette recherche est donc concentrée sur l'amélioration des technologies de capture de mouvement optique à base de marqueurs, puisque des améliorations sur ces technologies peuvent avoir le potentiel de faire progresser l'ensemble du domaine de la capture de mouvement 3D. Une description détaillée des systèmes de Motion Capture optiques à base de marqueurs est fournie dans les sections suivantes.

### **2.7.1 Motion Capture optique à base de marqueurs**

Ce que les systèmes de capture de mouvement optique à base de marqueurs ont en commun, est qu'ils se dissocient des problèmes associés aux technologies de capture de mouvement optique sans marqueurs, par la conception de systèmes qui gardent au loin les majeurs problèmes de vision. Ceci est réalisé en utilisant un éclairage contrôlé des caméras optiques et des marqueurs fixés sur les sujets suivis [40, 41]. Le procédé de suivi est réalisé avec précision en utilisant un nombre prédéfini de marqueurs répartis sur des points clés du sujet suivi [18, 42, 43]. Différents types de répartitions de marqueurs sont possibles. Il est donc important d'employer la répartition qui satisfait aux mieux les exigences du domaine



d'application étudié. Deux grandes classes de systèmes peuvent être utilisées pour la capture de mouvement optique à base de marqueurs, ils peuvent être désignés comme :

1. Les systèmes à base de marqueurs passifs.
2. Les systèmes à base de marqueurs actifs.

Ces systèmes sont décrits dans les deux sections suivantes.

### 2.7.1.1 Systèmes à base de marqueurs passifs

Les marqueurs passifs doivent être identifiés manuellement, car ils ne possèdent pas des caractéristiques qui les séparent les uns des autres. Les marqueurs passifs les plus connus sont constitués de petites sphères (de 2,5 à 5 cm de diamètre) couverts d'un matériau hautement réfléchissant [32]. Un exemple de marqueur passif sphérique est représenté en figure 2.10.



**Figure 2.10.** Exemple de 2 marqueurs sphériques passifs.

Afin de pouvoir utiliser ces marqueurs dans la capture du mouvement humain, ils doivent d'abord être répartis sur le corps du sujet à suivre. La lumière doit ensuite être projetée à partir de sources positionnées autour de l'objectif des caméras de capture sur le matériau réfléchissant couvrant les marqueurs. Cela donne aux marqueurs une couleur blanche facilement distinguable. Lorsque les marqueurs sont faciles à détecter, le mouvement de l'objet peut être capturé en utilisant n'importe quel nombre de caméras optiques. Un opérateur humain doit labéliser manuellement les reflets blancs de chaque marqueur (poignet gauche, coude gauche, l'épaule gauche, etc.) une fois que le mouvement est capturé. Il doit également exclure les marqueurs fantômes enregistrés par erreur à la suite de présence de motifs réfléchissants dans l'environnement de suivi [17]. Les réflexions des marqueurs labélisés peuvent enfin être suivies sur des séries d'images en utilisant le logiciel de capture.



- **Problèmes associés aux marqueurs passifs**

Le principal inconvénient avec les marqueurs passifs est qu'un opérateur humain expérimenté doit assister dans le processus de leur identification. Certains chercheurs tentent de résoudre ce "problème d'identification de marqueurs" en demandant aux sujets d'exprimer une pose prédéfinie au début de la session de capture afin de permettre la labellisation automatique des marqueurs en utilisant les connaissances sur leurs positions 2D dans les images capturées. Le problème qui en découle se présente de cette façon est que les identités des marqueurs sont perdues après une occlusion, même si tous les marqueurs sont correctement identifiés initialement. En conséquence, à chaque fois qu'un marqueur occulté apparaît, il sera émergé comme un nouveau marqueur inconnu. Certains chercheurs ont tenté de résoudre ce problème en traitant manuellement l'ensemble des trajectoires valides des marqueurs avant la reconstruction du mouvement capturé [44, 45]. Cependant, cela introduit à nouveau la nécessité d'un opérateur humain demandant du temps et de nombreux essais de validation. De nombreux chercheurs ont donc essayé de résoudre le problème d'occlusion. Toutefois, pour assurer une bonne identification de chaque marqueur dans l'environnement et résoudre le problème d'occlusion, un placement attentif des caméras est indispensable.

### **2.7.1.2 Systèmes à base de marqueurs actifs**

Il existe plusieurs types de marqueurs actifs. Ce qu'ils ont en commun est qu'ils fournissent suffisamment d'informations pour aider à l'identification automatique des marqueurs [17, 24, 46].

Le système de capture de mouvement à base de marqueurs actifs couramment utilisé, est constitué d'un ensemble de diodes électroluminescentes sphériques à lumière clignotante (LED), qui communiquent leur identité à travers des impulsions de lumière [47]. Un marqueur actif à base de LED clignotant est représenté dans la figure 2.11. Les LED sont reliées à un ordinateur externe qui leur fournit leurs séquences de flashes distinctifs. L'ordinateur externe assure également la synchronisation des marqueurs avec les caméras de capture [17, 24, 46]. Il faut noter que ce type de marqueurs peut apparaître brouillé dans les images capturées si des LED à haute intensité sont utilisées [48]. Cela peut confondre le processus de localisation des marqueurs et on devra donc diminuer l'ouverture des volets des caméras de capture pour réduire cet effet.



**Figure 2.11.** Exemple d'un marqueur sphérique actif.

Des marqueurs actifs avec une forme carrée sont également disponibles. Différents types de ces marqueurs sont présentés en [49] et [18]. D'autres marqueurs sont évoqués en [50] en fixant des bandes rétro réfléchissantes sur un costume.

- **Problèmes avec les marqueurs actifs**

Les systèmes à base de marqueurs actifs ne génèrent pas des marqueurs fantômes et ne nécessitent pas l'intervention d'un opérateur humain pour les identifier. Cela résout certains des inconvénients majeurs avec les marqueurs passifs. Cependant, un certain nombre de problèmes sont également identifiés avec les marqueurs actifs tels que :

- 1 La perte des données causées par les occlusions (résultats erronés).
- 2 Les difficultés associées à l'identification des marqueurs.
- 3 La restriction de la liberté du mouvement du sujet à suivre.
- 4 Les erreurs de localisation.

Les occlusions peuvent facilement causer des pertes des informations importantes pour les systèmes à base de marqueurs actifs (par exemple la perte d'une partie de la séquence de flash des marqueurs LED). Le problème de l'occlusion doit donc être discuté si on veut assurer un robuste suivi, peu importe le type de marqueur que porte le sujet [17]. Des méthodes plus efficaces pour résoudre le problème d'occlusions doivent donc être étudiées, afin d'assurer que les mouvements peuvent être capturés de façon aussi précise que possible.

Pour les marqueurs actifs à base de LED, l'identification se fait par l'analyse d'une série d'images, puisque ces marqueurs utilisent des séquences de flash pour communiquer leurs

identités. En conséquence, plus de traitements sont nécessaires, par rapport aux marqueurs passifs qui soutiennent l'identification dans une seule image. Certains chercheurs ont résolu ce problème en utilisant des " indices de couleurs " pour communiquer les identités des marqueurs, à la place des séquences de flashes. Mais le problème qui surgit lors de l'utilisation de ces indices, est que les couleurs ont tendance à changer quand ils sont exposés à un éclairage différent. Cela peut rendre le processus d'identification des marqueurs instable [51]. Un problème d'identification, se pose lors de l'utilisation des marqueurs en couleurs [18] utilisés qui supposent que seuls huit différentes identités de marqueurs peuvent être générées sans restreindre les mouvements de l'utilisateur. Ceci est un sérieux problème, car l'un des objectifs principaux de la capture de mouvement est de capturer les mouvements naturels, et on peut facilement limiter les chances d'atteindre cet objectif si l'on restreint les mouvements des sujets suivis.

Le problème qui se pose avec les marqueurs carrés proposé par [49], est que les mouvements ne peuvent être capturés qu'à l'intérieur d'un volume de taille très limitée, étant donné que ces marqueurs ne peuvent être correctement identifiés qu'à partir d'une distance de quelques centimètres des caméras.

Le problème qui se pose pour les systèmes à base des bandes rétro réfléchissantes, est qu'un nombre très élevé de marqueurs est utilisé (plus de 408 marqueurs) et il est difficile de labéliser plusieurs centaines de marqueurs correctement [50]. Comme on peut l'observer, le problème d'identification de marqueurs est commun pour tous les systèmes de capture de mouvement à base de marqueurs. Très peu de références évoquent les méthodes optimales pour résoudre ce problème ; il est donc important de trouver des mesures qui minimisent les effets négatifs du problème de l'identification de marqueurs.

En résumé, un système d'aide à la décision doit être conçu pour résoudre les problèmes suivants qui limitent les systèmes actuels à base de marqueurs passifs et/ou actifs :

1. Le problème de perte des données causées par les occlusions.
2. Le problème d'identification des marqueurs.
3. Le problème de reconstruction 3D des marqueurs

Si un nouveau système d'aide au placement de caméras doit être mis au point, il doit être intégré dans un système de capture de mouvement optique de sorte que les emplacements des

caméras peuvent être évalués. Pour concevoir ce système, les questions précédentes doivent être abordées. Ces questions seront décrites plus en détail dans les sections suivantes :

### **2.7.2 Problème de perte des données**

Les résultats obtenus à partir des systèmes de capture de mouvement se dégradent facilement à cause des données manquantes (perdus). Des pertes dans les trajectoires d'un mouvement capturé peuvent le rendre incomplet et irréaliste. Ceci contredit directement l'objectif principal de la Motion Capture, (qui est de capturer les mouvements réalistes contenant des nuances et des détails spécifiques aux sujets suivis). La perte des données est donc un problème primordial pour les systèmes de capture de mouvement [11]. Ce problème est soutenu par le fait que la plupart des données obtenues à partir du monde réel sont incomplètes [52].

Dans les systèmes de capture de mouvements optiques, les données peuvent être perdues à cause des occlusions, de champ de vision des caméras limité ou des erreurs dans l'identification des marqueurs [15, 17, 53]. Notre objectif dans ce travail est d'aborder ces problèmes en mettant au point un nouveau système d'aide au placement de caméras capable de conserver suffisamment de données pour appuyer un suivi précis, même si le mouvement suivi est complexe et encombré. Ce système d'aide se base sur la conception d'une technique qui peut placer les caméras d'une façon optimale, de sorte que les effets négatifs associés à la perte des données peuvent être réduites davantage. Les occlusions peuvent être la principale source d'erreur dans les systèmes de capture de mouvements optiques à base de marqueurs [54, 55, 56].

#### **2.7.2.1 Occlusions**

Dans la capture de mouvement optique, une occlusion est considérée comme une obstruction qui bloque la ligne de vue entre les caméras et un élément suivi (tel qu'un marqueur). Les occlusions peuvent donc provoquer la disparition des données des marqueurs au cours du processus de suivi et il est difficile, voire impossible, de déterminer les positions 3D des marqueurs suivis [54, 55]. Le problème de l'occlusion est donc un des problèmes les plus importants dans la capture de mouvement optique à base de marqueurs et le problème doit être abordé si l'on veut obtenir un suivi robuste et précis [1, 54, 55].

### 2.7.2.2 Comment réduire le problème d'occlusion ?

Pour faire face au problème d'occlusions, on devrait considérer les points suivants :

1. Est-il nécessaire de trouver les données des marqueurs occultés pour obtenir des résultats acceptables ?
2. Est-il possible de réduire ou éliminer les risques de perte de données des marqueurs causés par les occlusions ?

S'il est inutile de trouver les données des marqueurs occultés pour obtenir des résultats acceptables, alors la façon la plus simple pour faire face à ce problème consiste à ignorer les cas manquants [52]. Cependant, dans la majorité des situations, ignorer les cas manquants n'est pas la meilleure solution.

S'il est important de trouver les données des marqueurs occultés, alors on devrait d'abord trouver la façon d'obtenir les données originales (réelles) de ces marqueurs, puisque ces données produisent généralement des résultats plus précis [1]. De ce fait, si plusieurs caméras sont utilisées dans le système de capture de mouvement, alors la façon la plus simple de le faire est d'examiner si les caméras du système ont bien capturé les données. S'il y a des caméras qui n'ont pas enregistré les données, alors on peut avoir à répéter la session de capture de mouvement en augmentant le nombre de caméras pour augmenter les chances d'enregistrer les données et/ou revoir leur placement pour mieux capturer les données [32]. L'inconvénient de ce faire est que plusieurs caméras rendent le processus de suivi plus complexe, ce qui entraîne plus de temps de traitement. Pour pallier cet inconvénient, on doit faire appel à une technique d'optimisation pour régler au mieux l'emplacement et le nombre de caméras utilisé dans une capture de mouvement. Une autre solution consiste à augmenter le nombre de marqueurs, mais cela se traduit par une augmentation du "facteur de confusion", ce qui rend plus difficile la distinction entre les différents marqueurs [57, 58].

S'il est possible de réduire ou éliminer les risques de perte de données des marqueurs causés par les occlusions, la solution précédente pourra donc également aider à résoudre ce problème en analysant les données capturées par les caméras du système, en augmentant le nombre de caméras et en corrigeant leur emplacement pour mieux acquérir les données.

### 2.7.3 Problème d'identification de marqueurs

Quand un système de capture de mouvement optique à base de marqueurs est utilisé pour le suivi d'un corps humain, le processus de suivi sollicite la capacité d'identifier chaque marqueur durant la séance de capture [59]. Cela est nécessaire afin de :

1. Déterminer l'emplacement des différentes parties du corps,
2. Parvenir à faire la correspondance entre les parties du corps suivi et les objets utilisés, pour reconstituer le mouvement capturé.
3. Reconnaître les parties du corps au fil du temps.

Un certain nombre de méthodes d'identification de marqueurs sont actuellement disponibles. La principale différence entre ces méthodes est que certaines exigent une intervention humaine, et d'autres pas. Celles qui nécessitent une intervention humaine sont utilisées pour identifier des marqueurs passifs et celles automatiques sont utilisées pour identifier des marqueurs actifs. Elles sont donc forcément différentes. Cependant, il existe différentes méthodes d'identification disponibles pour chaque type de marqueurs. Nous citons quelques méthodes les plus utilisées, dans le tableau 2.1.

<b>Méthodes d'identification de marqueurs les plus utilisées</b>	
Marqueurs passifs	Identification manuelle [41]
	Pose de démarrage [17]
Marqueurs actifs	Impulsions lumineuses [47]
	Motifs sur les surfaces de marqueurs [49]
	Couleur sur chaque marqueur [18]
	Informations de connectivité [50]

**Tableau 2.1.** Exemple de méthodes d'identification de marqueurs communément utilisées.

Le principal inconvénient des méthodes d'identification utilisées pour les marqueurs passifs est qu'ils ont besoin d'intervention humaine. La méthode "d'identification manuelle" a cet inconvénient car elle nécessite un opérateur humain pour labéliser manuellement les marqueurs et exclure les marqueurs fantômes extraits par erreur dans l'environnement de suivi [17]. L'opérateur humain doit également ré-labéliser les marqueurs qui ont perdu leur identité après une occlusion. La méthode de "pose de démarrage" est une autre méthode d'identification

couramment utilisée pour les marqueurs passifs. Cette méthode labélise les marqueurs en se basant sur leurs positions initiales dans le volume de capture et exige que les sujets suivis prennent une pose de démarrage spécifique. Le problème avec la "Pose de démarrage" est que les marqueurs perdent toujours leur identité après une occlusion et doivent donc être ré-labélisés manuellement par un opérateur humain. Le lecteur peut se référer à la section 2.7.1.1 "Systèmes à base de marqueurs passifs" pour plus d'informations sur les marqueurs passifs et leurs méthodes d'identification.

Les méthodes d'identification utilisées pour les marqueurs actifs reconnaissent les marqueurs sans intervention humaine. Ces méthodes résolvent donc un problème capital associé aux méthodes d'identification utilisées pour les marqueurs passifs [17, 24, 46]. La méthode d'identification la plus couramment utilisée pour les marqueurs actifs est la méthode "d'impulsions lumineuses". Cette méthode exprime les identités des marqueurs à travers des motifs lumineux clignotants émis par les LED situées dans chaque marqueur [47]. Les impulsions lumineuses sont générées par un ordinateur qui fournit à chaque marqueur sa propre séquence de flash distinctif et veille à ce que les "flashes" des marqueurs soient en synchronisation avec les volets numériques des caméras [17, 24, 46]. (Le dernier point est important pour s'assurer que chaque impulsion de lumière est correctement détectée par les caméras). La transmission d'informations entre l'ordinateur et les marqueurs est réalisée grâce au câblage physique des marqueurs à l'ordinateur. Un majeur problème avec cette méthode est que les fils qui relient les marqueurs à l'ordinateur, limitent la liberté de mouvement des sujets suivis et rend le processus de capture lourd et encombrant. Cela peut être un problème, majeur en particulier dans les applications médicales où les utilisateurs peuvent avoir une sorte de mouvement handicap [18]. Un autre problème avec cette méthode est que le traitement est réalisé sur plusieurs séquences d'images, ralentissant de ce fait inutilement le processus d'identification de marqueurs.

Les marqueurs actifs qui utilisent La méthode des "motifs triangulaires répartis sur leurs surfaces" [49], ne sont pas reliés à un ordinateur et ils peuvent être identifiés dans une seule image. L'inconvénient de cette méthode est que les marqueurs ne peuvent être identifiés qu'à quelques centimètres des caméras, ce qui rend difficile leur utilisation pour la capture de mouvement à grande échelle.

La méthode de "couleur sur chaque marqueur" présentée en [18] exprime son identité à travers l'une des huit couleurs. Cela rend leur processus d'identification moins affecté par la

distance aux caméras que dans la méthode des "motifs sur les surfaces» [49], car aucun petit motif complexe ne doit être identifié. Cependant, le problème avec la labélisation des marqueurs est que seuls huit différentes identités de marqueurs peuvent être générées directement, et cela ne suffit pas pour le suivi d'un corps humain entier. Pour résoudre ce problème, certains chercheurs [18] utilisent des contraintes, ce qui permet d'identifier deux des marqueurs de la même couleur, à condition que l'un d'eux soit situé sur la partie supérieure du corps et l'autre sur la partie inférieure. Le problème est que ces contraintes rendent également impossible le sujet suivi de s'accroupir, s'allonger ou se jeter par exemple. Ceci est un sérieux problème, car on réduit les chances d'atteindre l'un des principaux objectifs de la capture de mouvement, qui est de capturer le mouvement de façon naturelle, en limitant le mouvement de sujet suivi. Si on veut utiliser cette méthode pour l'identification automatique des marqueurs, il faut être aussi conscient du fait que les couleurs reflétées ont tendance à changer quand elles sont exposées à différentes conditions d'éclairage [51]. Il est important de prendre note de cela, parce que l'effet qui fait changer les couleurs, peut rendre le processus d'identification de marqueurs instable lorsque les couleurs sont utilisées comme un moyen pour l'identification.

La méthode qui utilise les informations de connectivité pour identifier les marqueurs sont souvent incorrectement identifiés [50]. Il est donc nécessaire d'utiliser un nombre très élevé de marqueurs (centaines de marqueurs) pour assurer un suivi satisfaisant. Le problème est que le traitement est ralenti inutilement, car il a été démontré que le corps humain peut être suivi avec précision avec seulement quelques dizaines de marqueurs [43]. Le fait que les marqueurs ne sont pas correctement enregistrés, rend également nécessaire la surveillance de l'ensemble du processus de suivi pour être très robuste envers les erreurs [50]. Ceci crée la nécessité d'un système de traitement excessivement complexe.

Il est important que les problèmes associés aux méthodes d'identification de marqueurs actuelles soient abordés, car :

1. Il est indispensable d'identifier les marqueurs lors d'une capture de mouvements optiques à base de marqueurs afin de suivre le mouvement correctement.
2. Il y a de sérieux problèmes avec les méthodes d'identification de marqueurs actuels.

### **2.7.4 Problème de reconstruction 3D des marqueurs**

Dans la capture de mouvement optique à base de marqueurs, le terme reconstruction 3D se réfère au processus de transformation des projections 2D des marqueurs en 3D. Le problème



de la reconstruction 3D a été un aspect prioritaire en matière de la vision par ordinateur et la capture de mouvement optique pour de nombreuses années [60, 61]. La principale raison à cela est que les données 3D capturées sur des images 2D avec des caméras optiques, doivent être reconstruites pour reproduire les informations capturées dans sa forme originale.

La première chose que l'on doit remarquer en tentant de reconstruire les emplacements 3D des marqueurs à partir des données dans les images 2D est que le marqueur doit être observé à partir d'au moins deux points de vue différents [40]. Il est donc fréquent d'utiliser plusieurs caméras placées à des endroits différents, pour assurer que suffisamment de données sont capturées pour faciliter le processus de reconstruction 3D.

### **2.8 Défis pour cette recherche**

Après un examen de la littérature sur la capture de mouvement optique à base de marqueurs, nous avons constaté qu'aucune solution n'est proposée pour tous les problèmes présentés précédemment liés à ce domaine. Nous avons donc décidé de concevoir une nouvelle technologie de capture de mouvement qui pourrait être utilisée pour répondre à ces problèmes et aider à l'amélioration du processus de capture optique à base de marqueurs. Deux objectifs principaux sont réalisés pour ce faire :

1. Concevoir un système d'aide au placement des caméras qui aborde les problèmes identifiés avec les systèmes à base de marqueurs actuels et qui les assiste dans le processus de capture.
2. Utiliser une technique d'optimisation pour trouver le nombre et les placements optimaux aux différents mouvements des sujets suivis.

Pour atteindre ces deux objectifs, nous nous sommes confrontés à une série de défis :

1. Rendre la Motion Capture optique robuste envers les occlusions,
2. Appuyer l'identification des marqueurs,
3. Ne pas entraver les mouvements de l'utilisateur.

Afin de concevoir la technique d'optimisation pour trouver le nombre et les placements optimaux des caméras qui s'adaptent aux différents mouvements des sujets suivis, nous avons suivi les étapes suivantes :

1. Concevoir des techniques de prétraitement qui pourraient simplifier les données capturées,

2. Concevoir un processus qui pourrait estimer les données manquantes des marqueurs avec précision,
3. Elaborer une technique d'optimisation et de reconstruction 3D qui pourrait récupérer et reconstruire les positions 3D des marqueurs.

### **2.9 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre, les différents systèmes actuellement utilisés pour la Motion Capture, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Notre recherche nous a conduits à conclure que les systèmes optiques à base de marqueurs sont les plus robustes et les plus précis et que les améliorations apportées à ces derniers entraîneraient des améliorations dans les différents domaines de la Motion Capture. Cependant, il faut faire face à plusieurs problèmes tels que : la perte des données, les occlusions, l'identification des marqueurs et la reconstruction 3D. Ces problèmes sont directement liés au mauvais placement des caméras. Nous avons donc choisi de concevoir un système capable d'optimiser le nombre de caméras utilisées dans le système de capture de mouvement optique à base de marqueurs ainsi que leur emplacement.

Le chapitre suivant décrit les caractéristiques et le développement de ce système afin de surmonter ces limites.

## Systeme d'Aide au Placement des Caméras pour la Motion Capture

*(Configuration Optimal des Caméras)*

---

### Sommaire

---

3.1	Introduction .....	32
3.2	Défis liés au système d'aide au placement des caméras .....	33
3.3	Travaux liés à la recherche .....	34
3.4	Conception d'un système d'aide au placement des caméras pour la Motion Capture .....	36
3.5	Approche proposée .....	38
3.5.1	Module 1 : Modèle graphique .....	42
3.5.2	Module 2 : Optimisation de placement des caméras par l'algorithme génétique guidé .....	45
3.6	Conclusion .....	69

---

### 3.1 Introduction

L'analyse dans le chapitre 2 met en évidence la complexité de fournir une configuration optimale d'un réseau de caméras pour une capture de mouvement. Le placement défavorable d'une caméra du réseau, ou une mauvaise fixation d'un certain nombre de paramètres d'une caméra peuvent avoir des effets négatifs sur les performances du système. À l'heure actuelle, la configuration du réseau de caméras est principalement basée sur l'opérateur humain (lorsque les exigences de performance ne sont pas strictes, une approche manuelle peut suffire).

On peut constater que cette technologie est largement limitée par la configuration manuelle des caméras pour les sessions de capture. L'élaboration d'une méthode automatisée pour le placement optimal des caméras est cruciale pour la Motion Capture afin de pouvoir passer d'une technique expérimentale à un dispositif pratique. Auparavant, nous avons défini une

configuration optimale d'un réseau de caméras capable de réduire les occlusions, d'identifier les marqueurs et de minimiser l'erreur moyenne de reconstruction 3D des marqueurs.

### 3.2 Défis liés au système d'aide au placement des caméras

Pour que les systèmes de Motion Capture optique soient compétitifs il est nécessaire d'assister l'opérateur humain dans le réglage des paramètres. Même avec l'aide d'un environnement de simulation, cela reste toujours une tâche difficile. Les défis que le système d'aide doit satisfaire sont :

- Interdépendance entre les paramètres : Le lien complexe entre les paramètres signifie qu'un seul paramètre peut rarement être modifié de manière isolée des autres. Par exemple, on pourrait vouloir augmenter le volume de travail en augmentant le champ de vue des caméras. Cependant, pour maintenir le même niveau de précision, le nombre des caméras dans le réseau devrait aussi augmenter, et les caméras devront être placées de façon optimale.
- Expertise du concepteur : Actuellement, configurer un réseau de caméras pour une Motion Capture est autant un art qu'une science. En raison de l'absence d'un processus de conception clairement définie, de nombreuses décisions sont subjectives et dépendent de l'expertise et de l'expérience de l'opérateur humain du système de capture. Le résultat de reconstruction obtenu dépendra du choix de l'opérateur.
- Dépendance par rapport à l'environnement : Le placement d'une caméra en présence d'une occlusion arbitraire représente un défi. Vu que les caméras sont des capteurs visuels, des précautions doivent être prises en compte pour veiller à ce que tout l'environnement soit bien couvert. Les environnements très encombrés tels que les scènes utilisant des entités nécessitent différentes considérations par rapport aux environnements clairsemés.
- Dépendance à l'application : La configuration du réseau de caméras d'un système de capture de mouvement doit être appropriée pour les exigences de précision de l'application étudiée. Les différentes applications de la Motion Capture sont détaillées dans la section 2.3.

Dans les cas simples, ces défis peuvent être facilement traités. Pour les environnements rectangulaires et sans obstacles, une approche manuelle pour le placement optimal des caméras est assez facile. Dans de tels environnements, une très bonne précision peut être obtenue par un opérateur qualifié. En dehors des environnements simples, ces techniques sont insuffisantes. Dans ce travail, les obstacles volumineux rendant la géométrie de la scène plus complexes, sont pris en considération. Pour les systèmes de capture de mouvement, une approche capable de minimiser l'interaction de l'opérateur humain est nécessaire. Une méthode automatisée solliciterait seulement une description du volume de travail (y compris les dispositifs d'occlusion) et les spécifications des caméras (nombre d'unités, champ de vision, et résolution).

Dans ce chapitre, nous mettons en œuvre une approche d'optimisation pour le placement automatisé des caméras pour la Motion Capture.

### 3.3 Travaux liés à la recherche

Le problème d'automatisation de placement de caméras pour la Motion Capture, n'a été abordé que de façon superficielle. Les paramètres d'une caméra doivent être choisis pour optimiser un objectif global (par exemple, maximiser la zone de capture pour une salle de Motion Capture donnée).

Pourtant, le problème de trouver le placement optimal d'une caméra a été étudié depuis longtemps. Les premiers travaux sur le sujet, sont basés sur le célèbre problème de "la Galerie d'Art" (PGA) qui est un problème bien connu en géométrie algorithmique [62]. L'objectif principal de ce dernier est de trouver le nombre minimal de gardes pouvant surveiller un nombre fixe de peintures dans une galerie. Les formulations initiales du problème "Galerie d'Art" manquaient de modèles réalistes pour les caméras et l'environnement [63, 64]. PGA assume le plus fondamental des modèles où à la fois la scène et les observateurs (gardes) sont limités au domaine 2D, et la couverture est strictement binaire et basée sur un calcul de visibilité. À l'inverse des caméras réelles, la résolution des gardes est supposée infinie. Des recherches ultérieures ont intégré progressivement des modèles plus élevés en visibilité et en fidélité. Une extension décrite dans [65], élargit l'espace du problème à la 3D et assume une résolution finie. Leur approche attribue des textures uniques à chaque surface dans un modèle de la scène et compte le nombre de textures visibles.

Contrairement au PGA, ainsi qu'aux travaux formulés dans les espaces 2D ou 3D continus [66, 67], la plupart des approches récentes considèrent entièrement le problème dans le domaine

discret [68, 69, 70]. Au lieu d'optimiser une fonction continue en utilisant le calcul variationnel, les approches dans le domaine discret quantifient l'espace de recherche en un nombre fini de positions "candidates" et recherchent les meilleures configurations pour optimiser une fonction de coût donnée. Cette stratégie conduit naturellement à des problèmes combinatoires. Des efforts ont été faits pour élaborer des problèmes discrets de positionnement de caméras en utilisant la programmation linéaire de type binaire [68, 71, 72] et la programmation quadratique [73]. Bien que la majorité de ces formulations conduisent à des problèmes NP-hard, une multitude de solutions pratiques telles que l'Optimisation Linéaire en Nombres Entiers (OLNE) [68, 74], l'Approche Gloutonne [75], les Heuristiques Gloutonnes [76], les Simulations de Monte Carlo (SMC) [70], la Programmation Semi-Définie (PSD) [69], les Algorithmes Evolutionnaires tels que les Algorithmes Génétiques (AG) et l'Optimisation par Essaims Particulaires (OEP) [77, 78, 79] ont été proposés par le passé. La grande dimensionnalité de l'espace de recherche et la non-linéarité du problème ont mené les chercheurs à favoriser l'utilisation des algorithmes génétiques (AG) pour ce type de problème. C'est pourquoi, les AG sont retenus dans le cadre de ce travail.

Les AG sont des algorithmes évolutionnistes qui s'appliquent bien au problème d'optimisation de placement de caméra [77, 78, 80, 81]. Dans [77], les auteurs ont utilisé un algorithme génétique pour évaluer un ensemble de configurations d'un réseau de caméras en se basant sur les deux paramètres d'orientation (angles horizontaux  $\alpha$  et verticaux  $\beta$ ). Ils ont proposé une mesure de l'incertitude de reconstruction 3D en utilisant une fonction scalaire de la matrice de covariance. On reproche à cette méthode de proposer la contrainte de résolution comme la seule cause de l'incertitude 3D. De ce fait, une métrique de qualité a été construite considérant la résolution et l'occlusion dans [80]. Une autre étude, dans [81], propose l'optimisation de l'emplacement d'un réseau de caméras par l'utilisation d'un algorithme génétique en se basant sur cinq paramètres d'une caméra ( $x, y, z, \alpha, \beta$ ). Cette étude définit une matrice de couverture par la division de la zone à photographier en grilles uniformes classées chacune comme point de priorité, point de non-priorité ou un obstacle. Cette méthode devient inefficace lorsqu'elle est exécutée pour un nombre élevé de grilles. Récemment, des chercheurs, dans [78], ont adopté le travail de [77] en utilisant la même mesure d'incertitude de reconstruction 3D, mais en considérant les six paramètres de la caméra ( $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ ) pour trouver l'emplacement optimal du réseau. Cependant, cette méthode apparaît inefficace pour résoudre le problème de la Motion Capture puisqu'elle ne fournit pas toujours le bon emplacement des caméras en tombant dans des minimas locaux. De plus, l'ajustement de la

taille de la population ou le taux de croisement et de mutation se fait manuellement (intervention du programmeur), ce qui limite l'efficacité de la méthode.

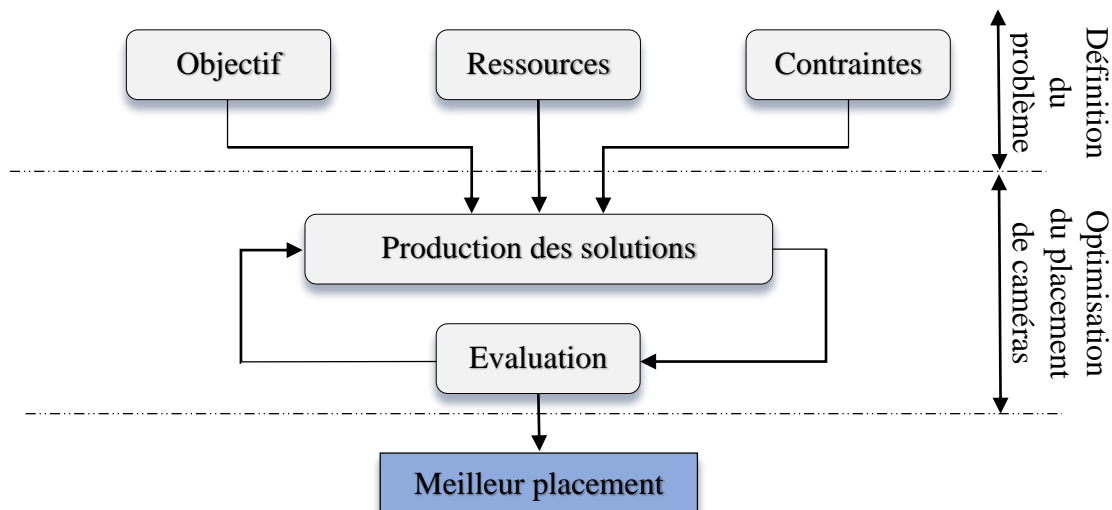
Les principaux éléments qui déterminent les différences entre les approches précédentes sont le nombre de paramètres d'une caméra et la fonction objectif. Les chercheurs ont augmenté ce nombre progressivement jusqu'à l'utilisation des six paramètres de la caméra pour trouver des solutions adéquates qui ne nécessitent pas une intervention manuelle. Néanmoins, ces algorithmes souffrent de leur temps de calcul excessif puisqu'ils traitent plusieurs solutions simultanément. Le plus pénalisant est le calcul de la fitness (mesure abstraite) retenue par une fonction objective pour évaluer la performance des solutions proposées. En outre, l'ajustement d'un algorithme génétique est délicat pour déterminer des paramètres comme la taille de la population ou le taux de mutation, ce qui limite l'efficacité de l'algorithme. Un des problèmes majeurs est celui de la dérive génétique qui considère les minimas locaux comme solution optimale, ce qui n'est pas forcément le cas.

A cet effet, dans ce travail, nous proposons un algorithme génétique guidé (GGA) qui apporte des solutions aux limitations précédentes pour trouver l'emplacement optimal d'un réseau de caméras. Nous optimisons l'algorithme de façon à éviter de surévaluer souvent la fitness par l'intégration d'une technique de distribution et d'estimation (TDE) afin de minimiser le temps de calcul. La TDE permet de délimiter le volume dans lequel est réalisé le mouvement afin d'éviter l'examen de tout l'espace de recherche. Par ailleurs, nous ajustons des opérateurs de reproduction adaptatifs qui permettent de préciser la probabilité de croisement et la probabilité de mutation de façon dynamique selon la valeur de fitness pour éviter le problème de la dérive génétique.

Dans les sections suivantes, nous explorerons l'applicabilité des algorithmes génétiques pour le problème de placement de la caméra et nous détaillerons le fonctionnement de notre approche AGG.

### **3.4 Conception d'un système d'aide au placement des caméras pour la Motion Capture**

Dans cette section, nous décrivons tout d'abord, les processus impliqués dans la conception d'un système d'aide au placement des caméras pour la Motion Capture, qui abordent les problèmes de capture de mouvement optique. À la fin de la section, la conception finale du système d'aide est présentée. Le diagramme du système est représenté en Figure 3.1.



**Figure 3.1.** Diagramme de l'algorithme de placement de caméras.

- Définition du problème : La première étape consiste à définir à quoi ressemble une "bonne" configuration d'une caméra. Plus formellement, cela consiste à choisir une fonction objective appropriée qui permet aux configurations candidates d'être évaluées et classées. La fonction objective pour la Motion Capture optique inclut la maximisation du taux de récupération des marqueurs et la minimisation du nombre de caméras utilisées pour ce faire.
- Identification des ressources : La deuxième étape consiste à décrire les composantes du système d'aide. Cela comprend une description des caméras (avec leurs paramètres associés), la géométrie de la scène (à la fois la forme de la pièce ainsi que la position de toutes les occlusions) et l'humanoïde virtuel (avec un mouvement similaire au mouvement que ferait le sujet en réalité).
- Intégration des contraintes : Chaque application peut avoir un ensemble unique de contraintes qu'une solution potentielle doit répondre. De telles contraintes peuvent être appliquées aux caméras (par exemple, un nombre maximum de caméras tel que déterminé par le budget du projet) ou à la scène (caméras ne pouvant être placées qu'à des endroits spécifiques et prédéterminées).
- Analyse : C'est l'étape du processus de l'algorithme d'optimisation automatisée. L'algorithme considère la fonction objective ainsi que les définitions des ressources et des contraintes comme entrée et délivre à la sortie un vecteur optimisé des positions et des orientations des caméras.



- **Installation** : Des précautions doivent être prises pour assurer le positionnement et l'orientation des caméras comme spécifié par l'algorithme d'optimisation. Cela peut être réalisé à l'aide de dispositifs de vérité au sol ou par l'observation de points de la scène avec des coordonnées connues. Bien que cette étape soit souvent négligée dans les discussions sur le placement des caméras en raison de sa nature difficile, elle est extrêmement importante pour la conception d'un système d'aide précis.

En utilisant ce contexte de conception, nous mettrons en œuvre une nouvelle approche de placement de caméras basée sur le paradigme de l'algorithme génétique. Cette technique puissante et conceptuellement simple s'adapte parfaitement à la complexité des problèmes.

Pour vérifier la validité de notre Algorithme Génétique Guidé (AGG) dans ce contexte, nous le comparerons également avec l'Algorithme Génétique Classique (AG).

### 3.5 Approche proposée

La méthodologie, d'aide au choix de l'emplacement des caméras, compte 2 étapes associées à 2 modules (Figure 3.2). Le premier module correspond au modèle graphique, le second concerne l'optimisation du placement des caméras.

Tout d'abord, le modèle graphique de la scène virtuelle est défini (Figure 3.2, module 1). Il rassemble la scène, les caméras et l'humanoïde. Les paramètres et les contraintes (occlusions, champ de vue, résolution, angle de vue et visibilité) associés au modèle sont adaptés au monde réel.

Par la suite, un algorithme génétique guidé (AGG) est appliqué comme une méthode d'optimisation au scénario créé (Figure 3.2, module 2). Ce scénario rassemble le modèle graphique et le mouvement que l'humanoïde réalisera, et ce de manière la plus semblable possible au mouvement que nous souhaitons capturer dans le monde réel. Ce mouvement peut être enregistré et modifié, ou construit. Des critères d'arrêt sont associés à l'algorithme pour évaluer la fitness des réseaux de caméras proposés. Dans le cas où la fitness satisfait l'un des critères d'arrêt, le réseau correspondant est gardé comme une solution optimale. Dans le cas contraire, une sélection des meilleurs réseaux parmi les réseaux initiaux est réalisée afin de reproduire des nouveaux emplacements en passant par les opérations de croisement et de mutation. Les nouveaux emplacements sont évalués à leur tour pour évaluer leur fitness. Ce traitement est itéré jusqu'à satisfaction de l'un des critères d'arrêt.

Afin d'adapter notre algorithme au problème de placement des caméras pour la Motion Capture, nous intégrons en plus une technique de distribution et d'estimation pour réduire l'espace de recherche et produire des propositions initiales d'emplacements des caméras convergentes. Nous intégrons aussi, dans l'étape d'évaluation une fonction d'optimisation pour calculer la qualité de ces emplacements. Cela permet de réduire le temps de calcul de l'algorithme et améliorer la qualité des emplacements finaux (réseau optimal). Le tableau 3.1 regroupe tous les paramètres utilisés dans ce travail.

Symbole	Définition
$\langle O_m, x_m, y_m, z_m \rangle$	Repère monde
$\langle O_c, x_c, y_c, z_c \rangle$	Repère caméra
$tag_j$	Tag j (futur marqueur j)
$K$	Matrice des paramètres intrinsèques
$\delta$	Champs de vue
$\Theta$	Angle du champ de vue
$\varepsilon$	Direction d'observation de la caméra
$D$	Diamètre de l'image de la caméra
$F$	Distance focale de la caméra
$Rés_{min}, Rés_{max}$	Résolution minimale et maximale de la caméra
$v_i$	Vecteur unitaire
$Occ$	Occlusion
$SL_{Ctag}$	Rayon droit entre la caméra et le Tag
$t[x,y,z]$	Vecteur de translation
$R_x, R_y, R_z$	Paramètres de poses
$\alpha, \beta, \gamma$	Angles de poses
$Fe$	Fréquence d'échantillonnage
$C_i$	Caméra
$Nc$	Nombre de caméras
$f_k$	Trame k
$Nt$	Nombre de Tags
$Nf$	Nombre de Trames
$t_{mouv}$	Durée du mouvement
$E_r$	Erreur de capture
$P$	Projection
$P_i$	Point d'intérêt
$R$	Rotation
$V$	Visibilité
$P_c$	Probabilité de croisement
$P_m$	Probabilité de mutation

**Tableau 3.1.** Paramètres utilisés dans le travail.

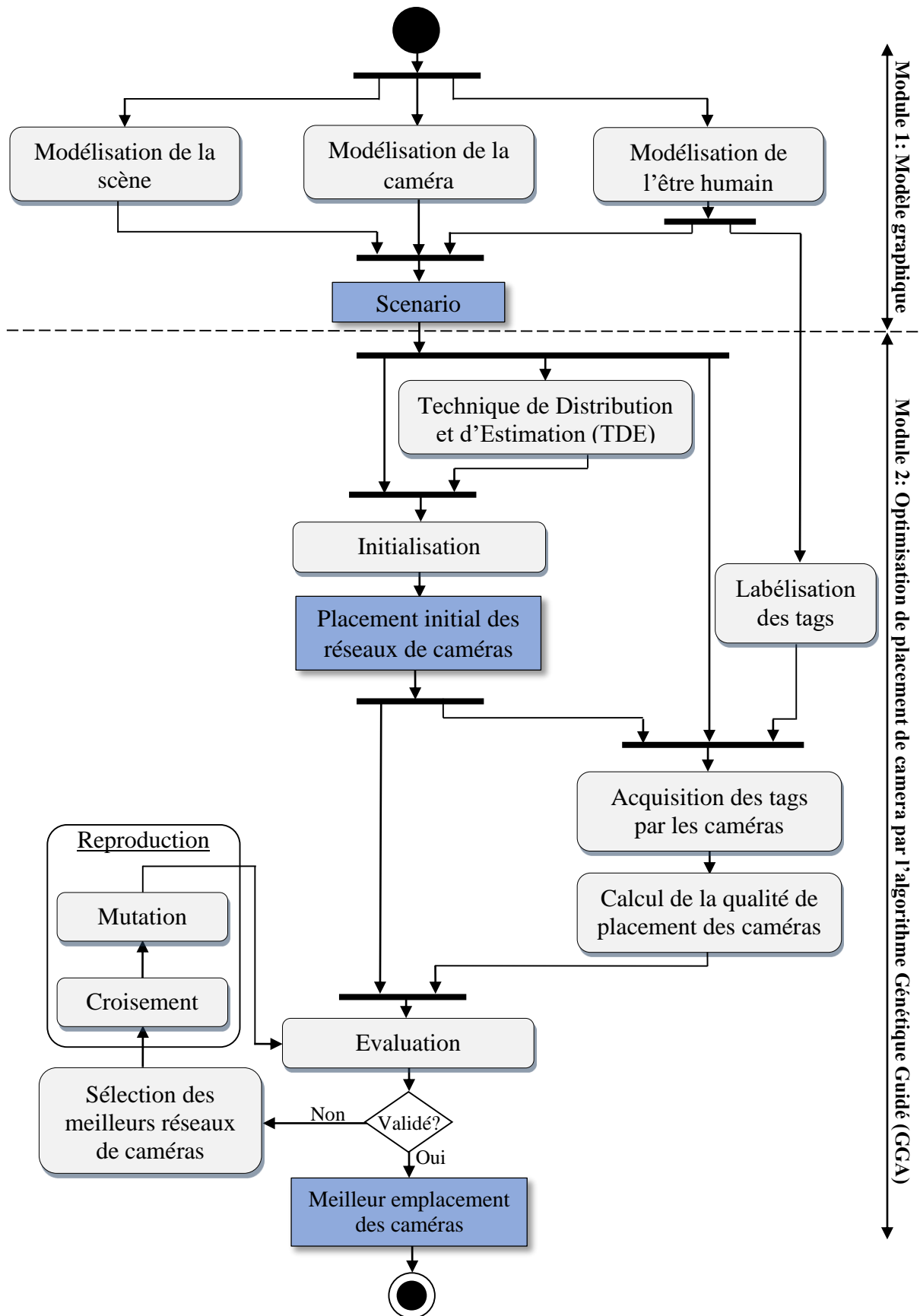


Figure 3.2. Processus d'optimisation par le système d'aide au placement des caméras pour la Motion Capture.

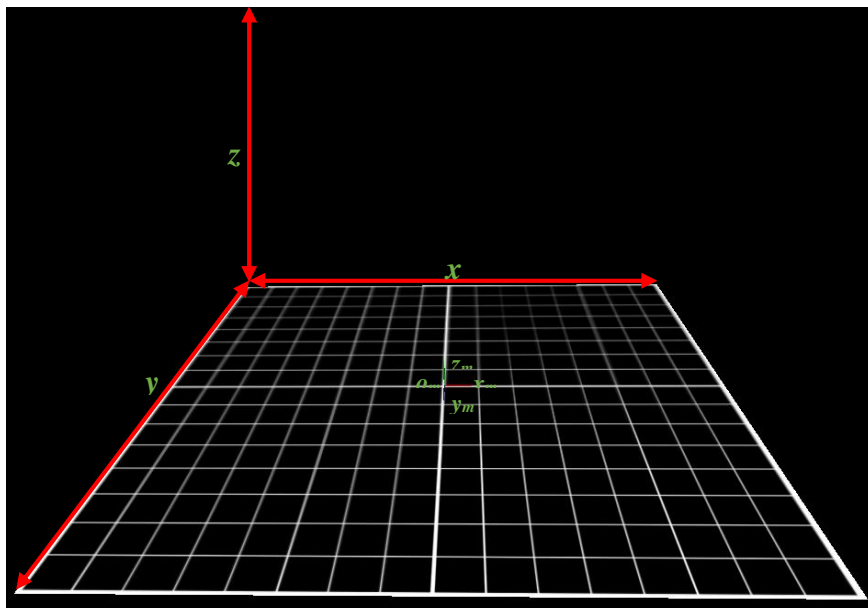
### 3.5.1 Module 1 : Modèle graphique

Dans cette partie, le modèle graphique qui nous permet la création du scénario virtuel similaire à celui du monde réel est défini. Ce modèle graphique est considéré comme le point de départ du processus d'optimisation. Il compte trois étapes :

1. La modélisation de la scène,
2. La modélisation de la caméra,
3. La modélisation de l'être humain.

#### 3.5.1.1 Modélisation de la scène

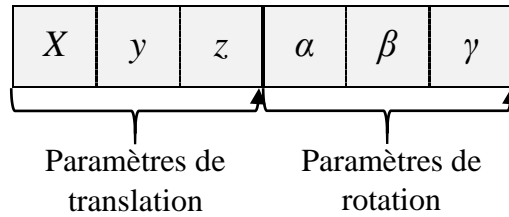
La scène définit le volume de travail dans lequel les caméras  $C_i$  ainsi que l'humanoïde animé peuvent être placés. L'utilisateur spécifie les valeurs minimales et maximales de chaque dimension de la scène selon  $x$ ,  $y$  et  $z$  suivant le repère de la scène  $(o_m, x_m, y_m, z_m)$  choisi au préalable (Figure 3.3).



**Figure 3.3.** Modélisation d'une scène de capture de mouvement en 3D.

#### 3.5.1.2 Modélisation de la caméra

Les caméras sont modélisées en 3D (Figure 3.4). L'emplacement et la direction de vue d'une caméra dans la scène sont décrits par une matrice extrinsèque qui compte deux éléments: le vecteur de translation  $t(x, y, z)$  et la matrice de rotation  $R(\alpha, \beta, \gamma)$ . Les paramètres pour la configuration d'une caméra dans la scène peuvent être exprimés comme suit :



Où  $(x, y, z)$  représente l'emplacement de la caméra et  $(\alpha, \beta, \gamma)$  représentent les angles du pan, du tilt et du swing respectivement ; d'après [65], nous avons :

$$R = R_x(\alpha) * R_y(\beta) * R_z(\gamma) \quad (1)$$

Avec :

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

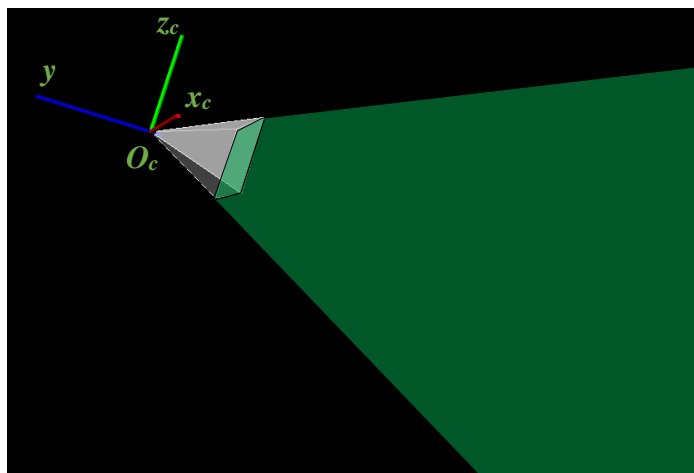
$R_x$  pivote l'axe  $y$  vers l'axe  $z$ .

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

$R_y$  pivote l'axe  $z$  vers l'axe  $x$ .

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

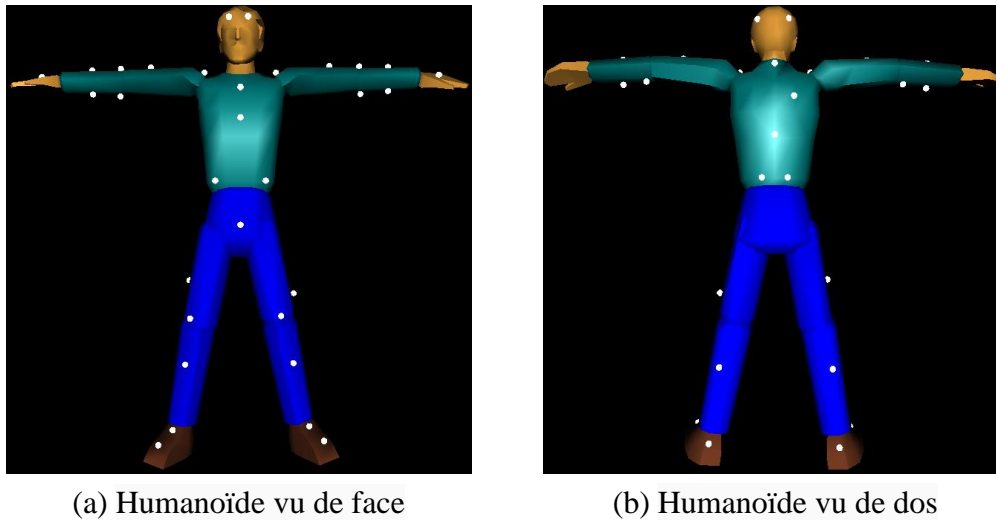
$R_z$  pivote l'axe  $x$  vers l'axe  $y$ .



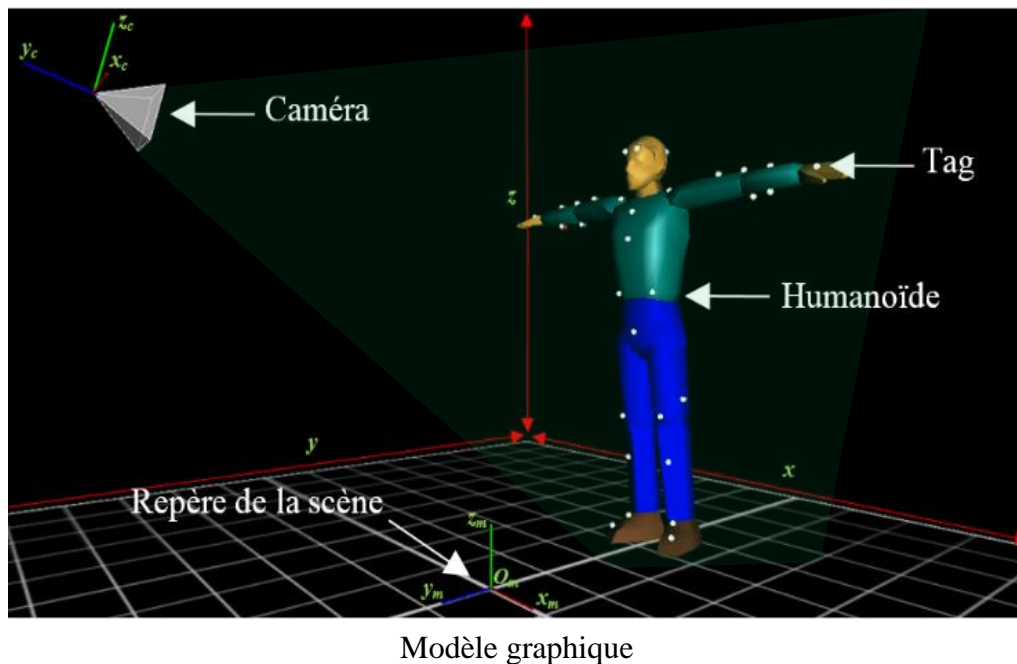
**Figure 3.4.** Modélisation d'une caméra en 3D : La caméra est placée selon les paramètres  $x, y, z, \alpha, \beta$  et  $\gamma$  par rapport à son repère.

### 3.5.1.3 Modélisation de l'être humain

Un personnage est représenté sous la forme d'un modèle graphique H-ANIM (LOA 1), dans lequel chaque nœud du modèle correspond à une partie du corps (cuisses, torse, bras, ...etc.). Des tags sont fixés en des endroits précis de l'humanoïde, conformément au placement des marqueurs sur l'acteur réel (Figure 3.5). L'humanoïde est animé à l'aide d'un mouvement capturé et modifié ou construit (ex : marcher, courir, sauter).



**Figure 3.5.** Représentation d'un exemple de positionnement des tags sur des segments du corps de l'humanoïde conformément à ce qui est envisagé dans le monde réel.



**Figure 3.6.** Modélisation d'une scène de capture de mouvement en 3D, avec un humanoïde et des caméras. La caméra est placée selon les paramètres  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  par rapport à son repère.

### **3.5.2 Module 2 : Optimisation de placement des caméras par l'algorithme génétique guidé**

Dans le domaine de la Motion Capture, le choix du nombre de caméras et leur placement optimal est un problème récurrent. Les travaux basés sur les algorithmes génétiques essaient d'apporter des solutions à ce problème. Malheureusement, les auteurs sont confrontés à la divergence des solutions proposées et le temps de calcul excessif. Dans le cadre de cette étude, nous présentons une nouvelle approche appelée Algorithme Génétique Guidé (AGG). Nous nous appuyons sur la délimitation du volume dans lequel est réalisé le mouvement afin d'éviter de faire la recherche dans toute la scène. Le GGA apporte des améliorations à l'algorithme génétique classique au niveau des opérateurs d'initialisation, d'évaluation et de reproduction pour mieux gérer l'espace de recherche. Nous commençons par introduire une technique de mesure spatio-temporelle dans l'étape d'initialisation afin de débiter avec une population initiale adaptée au mouvement étudié. Puis, dans l'étape d'évaluation nous calculons la visibilité des tags pour donner un score de fitness à chaque réseau de caméras générés. Par la suite, des stratégies d'adaptation pour fournir le meilleur croisement, mutation et fréquence d'échantillonnage sont utilisées dans l'étape de reproduction. Le fonctionnement de ces processus est détaillé ci-dessous.

#### **3.5.2.1 Introduction aux Algorithmes Génétiques (AG)**

La plupart des algorithmes d'optimisation sont conçus pour une classe spécifique de problèmes. Plus précisément, ce sont des problèmes où l'objectif peut être décrit par une expression analytique, dont la dérivée est facilement disponible et la sortie est un nombre réel (ou un vecteur de nombres réels). Ces stratégies d'optimisation imposent aussi des contraintes de régularité et nécessitent une certaine connaissance de la structure de la solution. À cet égard, l'optimisation se préoccupe des coefficients d'ajustement.

En revanche, il existe une grande classe de problèmes basés sur des phénomènes physiques pour lesquels aucune fonction analytique n'existe et qui doit être évalué par simulation comme le cas de la Motion Capture optique. Bien que la structure de la solution est inconnue, une solution candidate peut être facilement évaluée par rapport à une mesure de performance.

#### **3.5.2.2 Description de l'algorithme génétique**

Un algorithme génétique est une technique de recherche inspirée par le processus évolutif de la sélection naturelle. Comme dans la sélection naturelle, l'AG maintient une

population de solutions candidate (appelés également individus) qui sont évaluées de manière répétée en utilisant une fonction objective sur une série de générations. A chaque génération, les individus les plus forts sont choisis, selon des heuristiques, pour reproduire la génération suivante. Étant donné un point de départ suffisamment diversifié, les populations convergent généralement vers une solution optimale dans les 150-300 générations. Cette approche est un sous-ensemble d'une classe d'algorithmes de recherche connus sous le nom d'algorithmes évolutionnaires, une vaste gamme de techniques inspirées par la sélection naturelle et la génétique. L'algorithme génétique a été défendu par John Holland à l'Université du Michigan dans les années 1970 [41]. A cause du calcul exigeant, l'approche a été lente à se faire accepter, avec certains chercheurs qui trouvent que l'AG a atteint son apogée dans les années 1980. Les algorithmes génétiques ont également été critiqués pour leur manque de connaissances théoriques. Puisque les résultats sont générés de manière stochastique, il est dit que leur comportement peut être imprévisible ou difficile à vérifier. Néanmoins, un certain nombre de disciplines ont été étudiées avec les algorithmes génétiques, telles que la conception pharmaceutique [82], les prévisions financières [83] et la conception des ponts [84].

### 3.5.2.3 Avantages

En dépit des insuffisances mentionnées ci-dessus, les algorithmes génétiques peuvent exceller où :

- Le problème est de grande dimension.

Pour nos fins, une caméra dispose de trois paramètres de positions ( $x, y, z$ ) et trois paramètres d'orientation ( $\alpha, \beta, \gamma$ ). Avec une autre variable pour le champ de vue, et deux pour la résolution (horizontale et verticale), chaque caméra contribue 9 paramètres.

- Les méthodes d'analyse ne sont pas disponibles.

Un algorithme génétique est une *méta-heuristique*. Les algorithmes d'optimisation méta-heuristiques sont ceux pour lesquels la fonction objective fournit peu d'informations heuristiques pour faciliter l'optimisation, mais quand une bonne solution est trouvée, elle peut être facilement identifiée [85]. Ainsi, la fonction objective peut être traitée comme une boîte noire qui peut être interrogée avec une configuration de candidat et retourne un score de fitness. Aucune expression analytique n'est nécessaire pour l'objectif, comme cela est requis par de nombreuses autres méthodes d'optimisation.



- Le problème est différent pour chaque application.

En raison de la nature variée des tâches de la Motion Capture, les exigences de paramètres diffèrent d'une application à une autre. Dans le modèle de l'algorithme génétique, seule la fonction objective doit être modifiée pour s'adapter à un nouveau problème.

- L'espace de solution présente de nombreux minima locaux.

L'algorithme génétique est une méthode de Monte Carlo. Chaque individu dans la population initiale de solutions de candidats a un point de départ aléatoire. Pour des problèmes purement non-linéaires, cette approche donne de meilleurs résultats par rapport aux méthodes basées sur les gradients.

- Chaque application possède un ensemble unique d'exigences.

Dans le placement des caméras pour la Motion Capture, un certain nombre de contraintes sont présentes. L'opérateur humain peut être limité par un nombre fixe ou un type de caméras (où les caméras ne peuvent pas être placées dans des endroits de fixation spécifiques, par exemple). Une approche idéale pour l'automatisation de la conception serait en mesure de s'adapter à ces divers besoins sans changer fondamentalement l'approche analytique. L'algorithme génétique est particulièrement fort à cet égard: plutôt que de décrire un ensemble rigide de mesures, l'algorithme génétique décrit un cadre de résolution de problèmes où les portions spécifiques à l'application sont extraites en deux constructions, le mécanisme de codage et la fonction objective définis ci-dessous.

### 3.5.2.4 Codage

Avant de détailler les différents processus génétiques, il faut tout d'abord expliquer le codage des individus. Un codage décrit comment un individu (au sens de l'algorithme génétique) est représenté et manipulé. Typiquement, cela prend la forme d'une structure de données commune tel qu'un vecteur ou un arbre, où chaque élément contient un paramètre. Cependant, ce qui est plus critique que la structure, c'est de choisir un paramétrage approprié. Une représentation optimale est celle où un faible changement à l'entrée donne un faible changement à la sortie. En d'autres termes, les individus "proches" entre eux dans l'espace de représentation doivent se comporter de façon similaire. Le succès de l'optimisation repose en grande partie sur le choix d'une représentation appropriée.

### 3.5.2.5 Fonction de fitness

La fonction objective évalue un individu en utilisant une méthode définie par l'utilisateur et renvoie une qualité, ou une valeur de fitness. Lors de la conception d'une fonction objective, des précautions doivent être prises pour garantir que les valeurs de sortie sont décisives et que les individus peuvent prendre une grande variété de comportements. Des résultats incorrects rendent difficile, voire impossible, la convergence de la population. Les problèmes de ce type devraient être restructurés pour fournir un degré d'optimalité plutôt que d'une étiquette discrète. Cela signifie généralement que la sortie est un nombre réel bien que la posture de la fitness elle-même n'ait pas besoin d'être continue.

La fonction objective, avec un codage correct, sépare proprement les spécificités du problème avec l'approche d'optimisation elle-même.

### 3.5.2.6 Fonctionnement de l'algorithme génétique guidé

Le déroulement du processus d'optimisation par l'algorithme génétique guidé est présenté ci-dessous :

**i. Initialisation de la population :** Dans l'étape d'initialisation, nous utilisons une Technique de Distribution et d'Estimation (TDE) sur le mouvement étudié afin de trouver la zone dans laquelle l'emplacement des caméras sera recherché (zone de recherche) et les points d'intérêt du scénario avec lesquels les orientations des caméras seront définies. Cette étape permet de réduire l'espace de recherche et de produire des propositions d'emplacement des caméras convergentes. Les emplacements initiaux des caméras (population initiale) sont créés à partir de leurs paramètres de translation ( $x, y, z$ ) et de rotation ( $\alpha, \beta, \gamma$ ). Les paramètres de translation sont générés aléatoirement dans une zone de propositions des solutions tandis que les paramètres de rotation sont générés à partir de la TDE (Figure 3.7). Dans notre cas, nous utilisons des réseaux de 4 à 10 caméras.

- Technique de distribution et d'estimation (TDE) : l'exécution de l'algorithme génétique entraîne un nombre important d'itérations si on considère le cas général (plus de 150 itérations). Dans notre travail, nous proposons une solution qui permet de diminuer la durée d'exécution en choisissant dans l'étape d'initialisation une *1ère* solution pertinente [97]. Pour cela, nous proposons de : i) délimiter le volume dans lequel se déroule le mouvement afin d'éviter d'analyser toute la scène et ii) définir un certain nombre de points d'intérêt qui nous aident à calculer les paramètres d'orientations des caméras de la solution d'initialisation.

Dans une capture de mouvement, nous constatons que le mouvement du sujet implique des distributions spatio-temporelles de sa silhouette et de ses tags (Figure 3.10). A partir de cela, nous proposons une technique de distribution et d'estimation (TDE) basée sur les résultats de la distribution des tags durant un mouvement à analyser afin d'estimer les emplacements de caméras et de générer les solutions initiales. Nous définissons un tag  $j$  comme un point tridimensionnel donné dans le repère de la scène par l'équation :

$$tag_j = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

A chaque instant, la position 3D d'un ensemble de tags est donnée par :

$$P(t) = \begin{bmatrix} tag_1(t) \\ tag_2(t) \\ \vdots \\ tag_j(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ y_1(t) \\ z_1(t) \\ \vdots \\ x_j(t) \\ y_j(t) \\ z_j(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Où  $P(t)$  est la position de tous les tags à l'instant  $t$ ,

$x_j, y_j$  et  $z_j$  sont les coordonnées du tag  $j$  selon les axes  $x, y, z$  respectivement,

$j = \{1, \dots, N\}$  ;  $N$  est le nombre des tags de la scène

et  $tag_j(t)$  est le tag  $j$  à un instant  $t$ .

A partir de l'équation (3), on définit un mouvement comme une matrice de position :

$$mouv = \begin{bmatrix} tag_1(t_0) & \cdots & tag_1(t_N) \\ tag_2(t_0) & \cdots & tag_2(t_N) \\ \cdots & \ddots & \cdots \\ tag_j(t_0) & \cdots & tag_j(t_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(t_0) & x_1(t_1) & \cdots & x_1(t_N) \\ y_1(t_0) & y_1(t_1) & \cdots & y_1(t_N) \\ z_1(t_0) & z_1(t_1) & \cdots & z_1(t_N) \\ x_2(t_0) & x_2(t_1) & \cdots & x_2(t_N) \\ y_2(t_0) & y_2(t_1) & \cdots & y_2(t_N) \\ z_2(t_0) & z_2(t_1) & \cdots & z_2(t_N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_j(t_0) & x_j(t_1) & \cdots & x_j(t_N) \\ y_j(t_0) & y_j(t_1) & \cdots & y_j(t_N) \\ z_j(t_0) & z_j(t_1) & \cdots & z_j(t_N) \end{bmatrix} \quad (4)$$

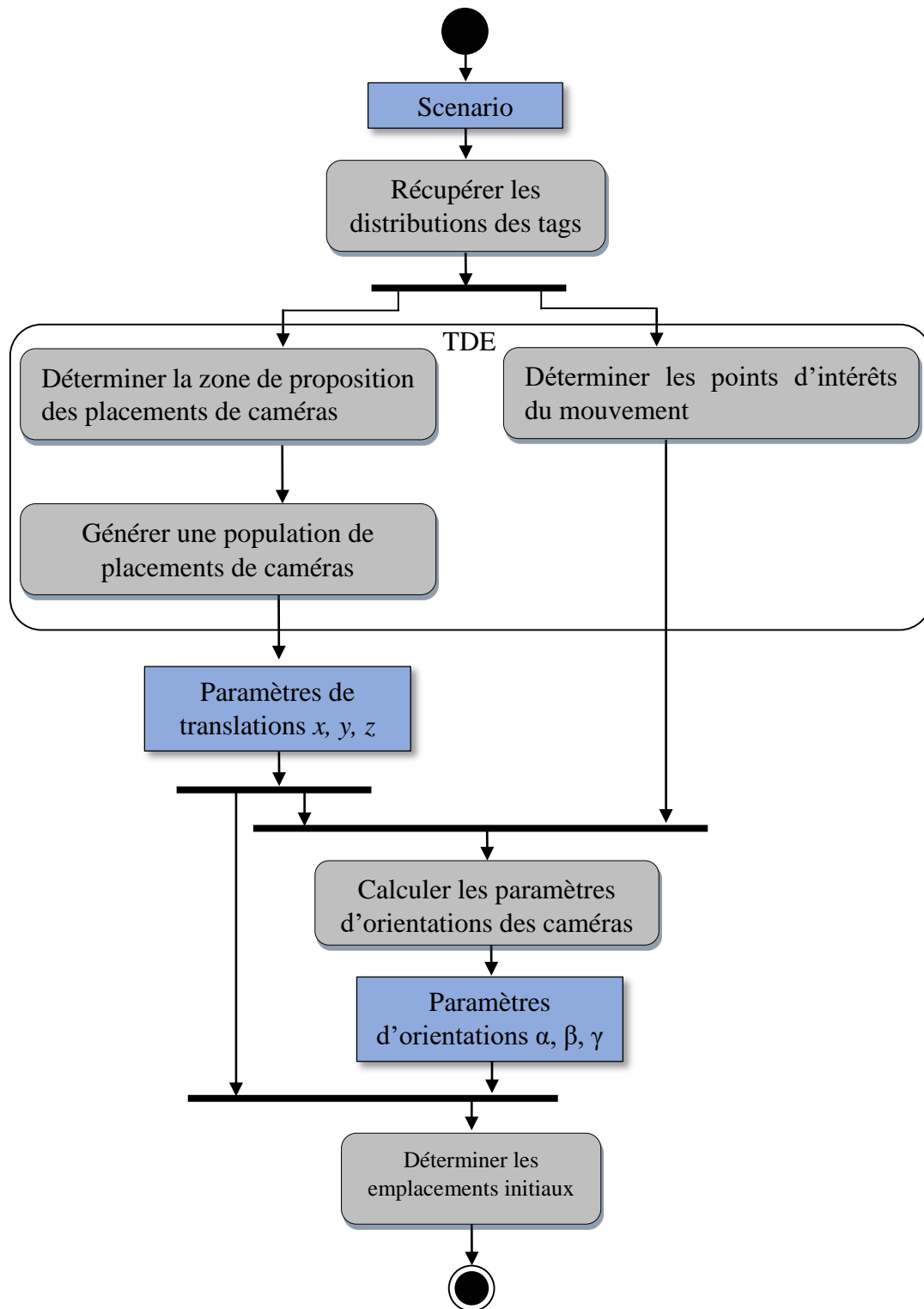
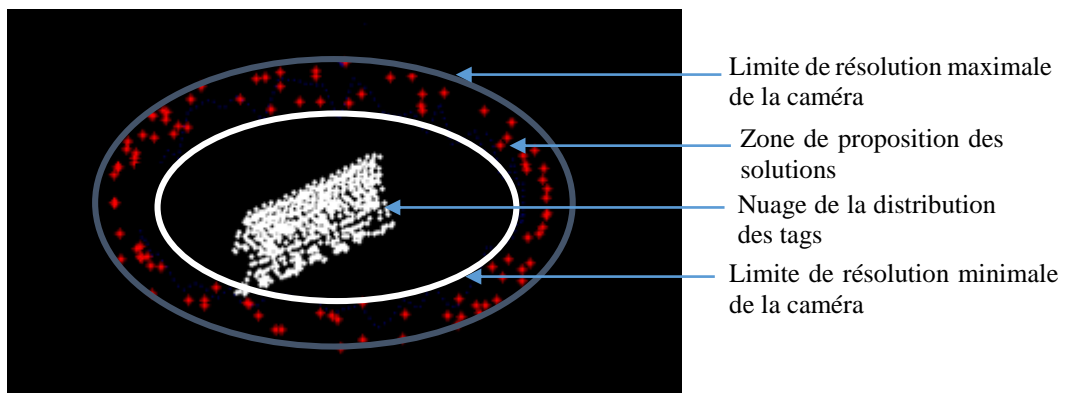


Figure 3.7. Organigramme de la procédure d'initialisation.

A partir des équations précédentes, la TDE permet de proposer des emplacements initiaux des caméras selon les deux étapes suivantes :

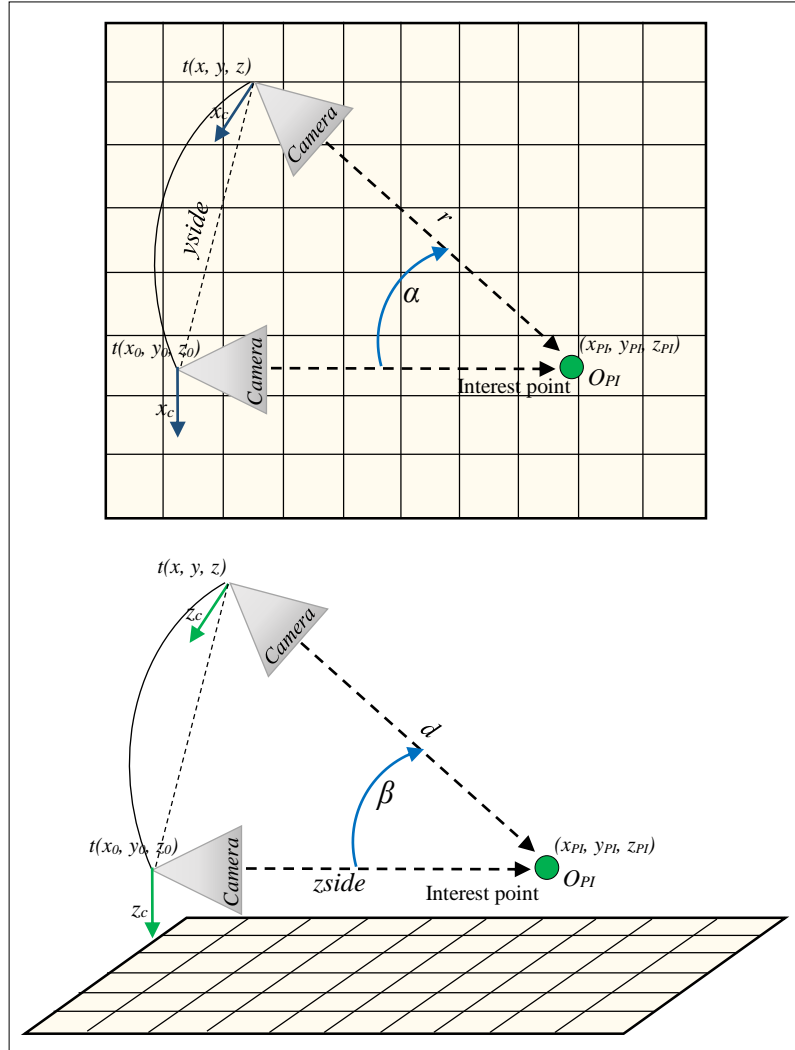
1. Déterminer l'espace de positions initiales des caméras : le but de cette étape est de positionner les caméras dans la zone de proposition des solutions dans laquelle la résolution des caméras est parfaite (Figure 3.8). Pour définir cette zone, tout d'abord nous déterminons l'espace global de déplacement des tags à partir du nuage de leurs distributions à chaque trame  $f_k$ . Ensuite, nous éliminons l'espace à l'extérieur de la limite de résolution maximale de la caméra et nous éliminons l'espace à l'intérieur de la limite de résolution minimale. Cette étape permet de réduire l'espace de recherche et d'obtenir une zone réduite pour trouver les emplacements initiaux les plus prometteuses dans l'exécution de l'algorithme génétique afin de minimiser le temps de calcul [97].



**Figure 3.8.** Zone de recherche des emplacements initiaux des caméras (zone de capture).

2. Déterminer les orientations des caméras (Calculer les orientations à partir des points d'intérêt) : Dans cette étape, nous calculons les paramètres d'orientations ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) selon la position ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) de la caméra (voir Figure 3.9). Après avoir sélectionné la zone de proposition des solutions possibles des caméras, nous choisissons des points d'intérêt dans le volume de travail sur lesquels convergent les objectifs des caméras afin de calculer leurs orientations par rapport au mouvement. Considérons la Figure 3.10b, nous définissons un point d'intérêt  $O_{PI}$  comme étant la visée sur laquelle s'oriente l'objectif d'une caméra quelconque pour permettre de définir ses orientations optimales  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  selon les équations ci-dessous. Le point d'intérêt  $O_{PI}$  est exprimé par (5) :

$$\vec{O}_{PI} = \frac{1}{tg_j} \sum_1^{Nt} [[x_i \ y_i \ z_i]^T] \vec{o}_m \Leftrightarrow \begin{cases} x_{PI} = \frac{1}{Nt} \sum_1^{Nt} x_i \\ y_{PI} = \frac{1}{Nt} \sum_1^{Nt} y_i \\ z_{PI} = \frac{1}{Nt} \sum_1^{Nt} z_i \end{cases} \quad (5)$$



**Figure 3.9.** Calcul des orientations  $\alpha$  et  $\beta$  d'une caméra positionnée  $[X', Y', Z']$  par rapport à son cas initial  $[X, Y, Z]$ .

Les équations ci-dessous représentent les orientations  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  d'une caméra selon le repère de la scène  $O_m$  :

➤  $\alpha, \beta$  et  $\gamma \in [0, 180]$

$$\alpha = \arcsin(y_{side}/r) \quad si \begin{cases} y_{PI} - t(y) \geq 0 & et & z_{PI} - t(z) \geq 0 \\ & ou & \\ y_{PI} - t(y) \leq 0 & et & z_{PI} - t(z) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\beta = \arccos(z_{side}/d) \quad si \begin{cases} x_{PI} - t(x) \geq 0 & et & z_{PI} - t(z) \geq 0 \\ & ou & \\ x_{PI} - t(x) \leq 0 & et & z_{PI} - t(z) \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\gamma = \arctan(xside/d) \quad si \begin{cases} x_{PI} - t(x) \leq 0 & et & y_{PI} - t(y) \leq 0 \\ & ou & \\ x_{PI} - t(x) \geq 0 & et & y_{PI} - t(y) \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

➤  $\alpha, \beta$  et  $\gamma \in [-180, 0]$

$$\alpha = -\arcsin(yside/r) \quad si \begin{cases} y_{PI} - t(y) \leq 0 & et & z_{PI} - t(z) \geq 0 \\ & ou & \\ y_{PI} - t(y) \geq 0 & et & z_{PI} - t(z) \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\beta = -\arccos(zside/d) \quad si \begin{cases} x_{PI} - t(x) \leq 0 & et & z_{PI} - t(z) \geq 0 \\ & ou & \\ x_{PI} - t(x) \geq 0 & et & z_{PI} - t(z) \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\gamma = -\arctan(xside/d) \quad si \begin{cases} x_{PI} - t(x) \geq 0 & et & y_{PI} - t(y) \leq 0 \\ & ou & \\ x_{PI} - t(x) \leq 0 & et & y_{PI} - t(y) \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

Où les distances  $xside$ ,  $yside$  et  $zside$  entre le point d'intérêt  $O_{PI}$  et la position  $t(x, y, z)$  d'une caméra sont exprimées par les équations suivantes :

$$xside = |t(x) - x_{PI}| \quad (12)$$

$$yside = |t(y) - y_{PI}| \quad (13)$$

$$zside = |t(z) - z_{PI}| \quad (14)$$

Avec la moyenne quadratique  $d$  :

$$d = \sqrt{|xside|^2 + |yside|^2} \quad (15)$$

Et le rayon  $r$  :

$$r = \sqrt{d^2 + |zside|^2} \quad (16)$$

A partir de la figure 3.10 nous constatons que grâce à notre proposition, le champ de vue de chaque camera est uniquement bien orienté que sur le volume de travail qui contient les tags.

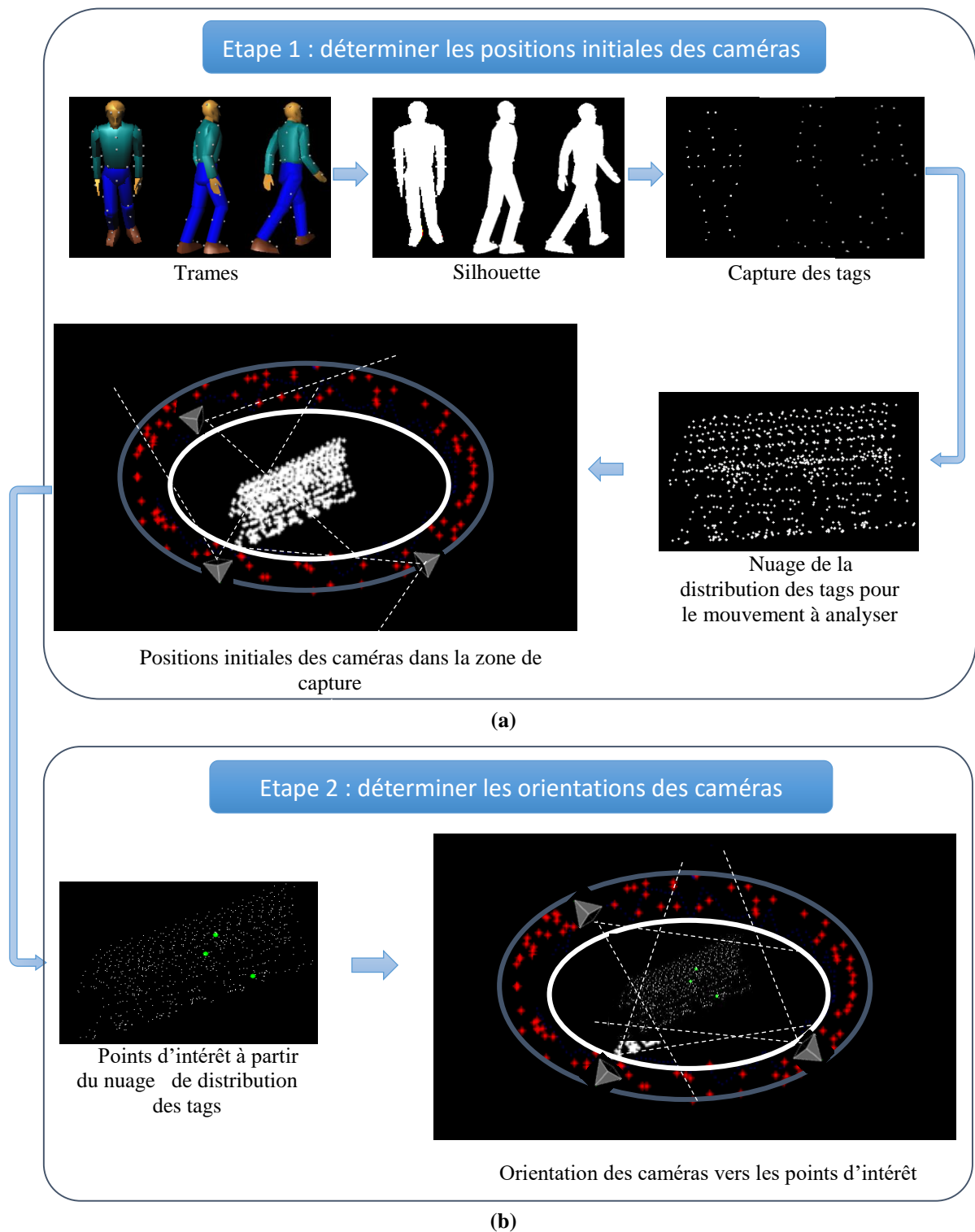


Figure 3.10. Schématisation de la TDE.

- ii. **Evaluation** : Chaque réseau de caméras de la population initiale est évalué afin d'attribuer un score de fitness à chaque individu. Dans notre expérience, nous avons volontairement choisi



de simplifier les mesures pour permettre un traitement rapide.

Le but est de concevoir une fonction d'optimisation  $f$  à partir de laquelle nous pouvons évaluer les performances d'un réseau de caméras pour la capture des tags dans un environnement 3D. Ensuite, notre objectif est d'identifier, parmi toutes les configurations possibles de réseaux de caméras, celle qui maximise cette fonction tout en minimisant le nombre de caméras utilisées.

Le problème de l'identification des marqueurs nécessite que chaque marqueur soit visible par au moins 2 caméras. Ainsi, nous calculons le nombre de caméras qui captent un tag durant un scénario dans l'environnement 3D [97]. Cela nous permet d'évaluer les performances de n'importe quelle configuration de réseaux de caméras. Les occlusions causées par l'environnement (obstacle, objet dynamique) ou par le sujet (auto-occlusion) peuvent être modélisées par le modèle graphique. Étant donné le nombre de caméras et leur emplacement dans l'environnement, nous déterminons trois étapes pour évaluer un réseau de caméras [98]:

- a) La labellisation des tags.
- b) L'acquisition des tags par les caméras.
- c) Le calcul de la qualité de l'emplacement des caméras.

### *a) Labellisation des tags*

Dans le système de Motion Capture par vision, la labellisation des marqueurs (identification des marqueurs) joue un rôle important dans le suivi de leur déplacement dans les différentes trames durant la séquence de mouvement à analyser. Différentes méthodes d'identification de marqueurs sont actuellement disponibles (tableau 3.2). La principale différence entre ces méthodes réside dans le fait que certaines exigent une intervention humaine tandis que d'autres ne le font pas [17, 18, 41, 47, 49, 50]. Les procédés qui nécessitent une intervention humaine sont utilisés pour identifier des marqueurs passifs et les méthodes automatiques sont utilisées pour identifier des marqueurs actifs (tableau 2.1).

Notre étude concerne les systèmes passifs où le principal défi est de distinguer les tags les uns par rapport aux autres afin de permettre l'estimation de leur visibilité par les caméras placées dans la scène 3D durant le mouvement à analyser. Nous utilisons et adaptons la solution proposée par [18] ; pour cela, dans le modèle graphique nous attribuons à chaque tag, une couleur codée sur 3 bits afin de pouvoir les distinguer entre eux. Si nous avons considéré la luminance seulement, nous aurions obtenu des codes compris entre  $[0, 2^8 - 1]$ ,

uniquement. L'avantage de cette technique est de permettre de générer  $C_3^{255} - 1$  codes de couleurs distinctes ce qui nous permet la labellisation d'un nombre important de tags. L'algorithme suivant illustre le fonctionnement de notre méthode de labellisation :

---

### Algorithme de labellisation

---

**Input :** *tag*, nombre des tags *Nt*, 3D humanoïde.

**BEGIN**

- Put the *Nt* tags on 3D humanoid;

**Step 1 :**

- Assigning the same color code RGB (white code) for all tags :  
RGB\_tags(R, G, B) = (255, 255, 255);

**Step 2 :**

- Assigning the same color code RGB (black code) for all other entities different from tags :

RGB\_ent (R, G, B) = (0, 0, 0);

// labeling of tags

- Determine an identifier number “*j*” for each tag with an arbitrary manner;
- Assigning different color code RGB except the black for each *tag<sub>j</sub>* with an arbitrary manner:

RGB\_tag<sub>j</sub> (R, G, B) = (rand () %255, rand () %255, rand () %255);

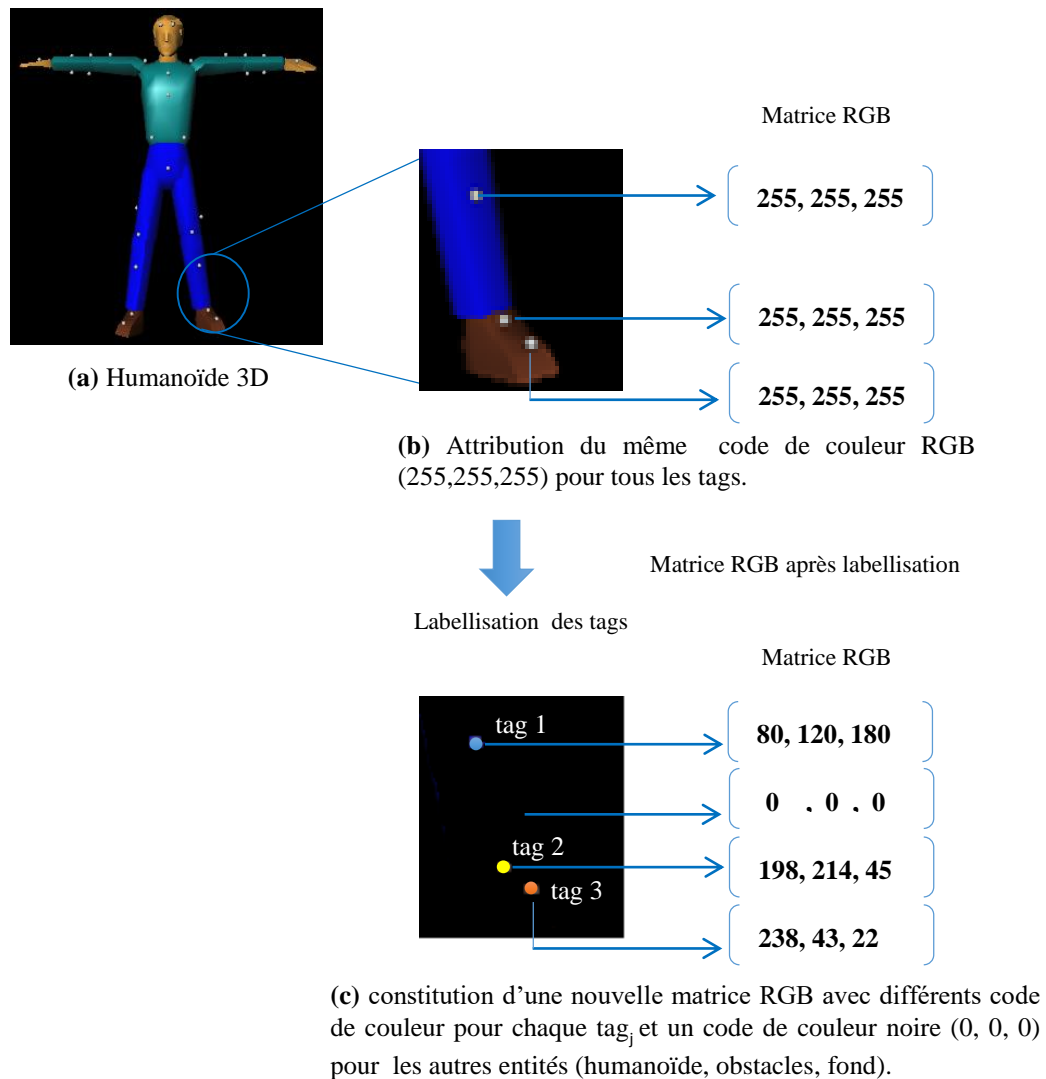
**If** RGB\_tag<sub>j</sub> (R, G, B) = (0, 0, 0) **then** //black color code

▪ generate new code: RGB\_tag<sub>j</sub> (R, G, B) = (rand ()%255, rand ()%255, rand ()%255);

**End.**

---

La Figure 3.11 illustre un exemple de déroulement de la labellisation sur une partie de l'humanoïde de la Figure 3.11 (a). Dans la Figure 3.11 (b), trois tags sont disposés sur le pied gauche de l'humanoïde. Nous affectons à ces tags, trois codes de couleur afin de les distinguer entre eux et un code de couleur noire (0, 0, 0) pour le reste, Figure 3.11 (c).



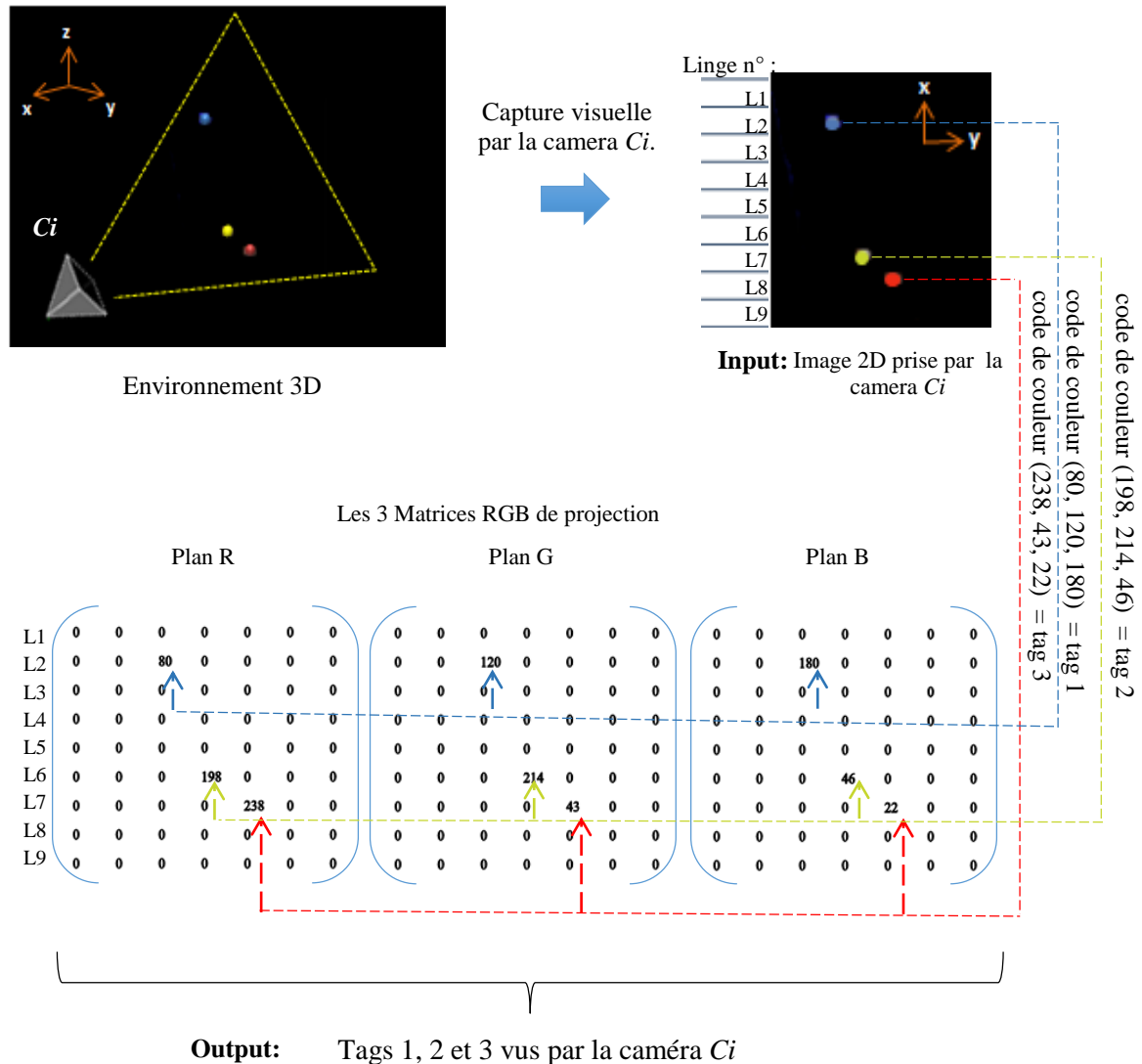
**Figure 3.11.** Exemple illustrant l'algorithme de labellisation.

*b) Acquisition des tags par les caméras*

Après l'étape de la labellisation qui permet de définir chaque tag par son propre code de couleur, nous passons à l'étape d'acquisition des tags par les caméras. Cette étape permet de déterminer les tags vus par chacune des caméras présentes dans la scène pour chaque trame. Pour cela, l'image 2D prise par la caméra  $C_i$  est parcourue afin d'extraire les codes couleurs des pixels qui diffèrent de la couleur noire à partir de la représentation matricielle RGB de cette image. Par la suite, les identifiants des tags associés à chaque code de couleurs dans la matrice RGB sont récupérés (Figure 3.12). La relation entre l'environnement 3D et l'image de la caméra  $C_i$  peut être décrite à l'aide de la matrice de projection  $P$ . Nous avons pour chaque plan couleur :

$$P=K.R.t \quad (17)$$

La matrice de projection décrit la manière dont les séquences d'image d'un scénario sont capturées par une caméra. Considérant le même exemple que celui de la Figure 3.11 (b), nous obtenons les matrices de projection de chaque plan RGB pour une caméra  $C_i$  (Figure 3.12). Nous retrouvons dans ces matrices de projection, le code affecté dans l'étape de labellisation ce qui nous permet de reconnaître les tags vus par la caméra  $C_i$  [98].



**Figure 3.12.** Exemple d'acquisition d'une caméra sur la même partie de l'humanoïde de la Figure 3.11 (b).

c) Calcul de la qualité d'un réseau de caméras

Nous venons de labelliser les tags situés dans la scène 3D pour reconnaître les tags vus par chaque caméra. Par la suite, pour chaque tag, le nombre des caméras qui le perçoivent est calculé afin de pouvoir estimer la qualité  $Q$  de l'emplacement des caméras en utilisant

l'erreur  $E_r$  [98].

Dans une capture de mouvement, l'erreur de reconstruction  $E_r$  d'un tag $_j$  existe lorsqu'il n'est pas capté par au moins deux caméras  $C_i$ .

Selon le nombre de caméras  $nc$  présentes dans la scène, deux situations sont possibles :

- Le cas critique, lorsqu'aucune ou une seule caméra capte le tag ; donc,  $E_r = 1$ .
- Le cas favorable, lorsque deux caméras ou plus captent le tag ; donc,  $E_r = 0$ .

Cela signifie que :

$$\forall C_i; \forall tag_j \Leftrightarrow \begin{cases} E_r = 1 \Leftrightarrow \begin{cases} \forall f_k; \sum_{i,j=1}^{Nc,Nt} P_i tag_j = 0 \\ or \\ \forall f_k; \sum_{i,j=1}^{Nc,Nt} P_i tag_j = 1; \end{cases} & k = 1, \dots, Nf \\ E_r = 0 \Leftrightarrow \forall f_k; \sum_{i,j=1}^{Nc,Nt} P_i tag_j \geq 2 & (nc \geq nc_{\min}) \end{cases} \quad (18)$$

Avec le nombre de trames :

$$Nf = t_{mouv} / f_e, nc_{\min} = 2 \quad (19)$$

Et la matrice de projection :

$$P_i = K(R|t) \quad (20)$$

Par conséquent, nous définissons un vecteur binaire contenant les tags reconstruits ( $rctag$ ) et une matrice  $A$  comportant les valeurs  $a_{ij}$  des vecteurs binaires. Nous avons alors :

$$rctag_j = \begin{cases} 1 & \text{if } E_r = 0 \\ 0 & \text{if } E_r = 1 \end{cases} \quad (21)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le } j^{\text{ème}} \text{ tag est re construit par la } i^{\text{ème}} \text{ caméra} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (22)$$

Les contraintes que doit satisfaire un emplacement optimal de caméras pour la Motion

Capture sont les suivantes [86] :

- Visibilité : Un *tag* est considéré comme visible si le produit scalaire de sa normale  $n$  et la direction d'observation de la caméra  $\varepsilon$  est négative (voir Figure 3.13) à savoir :

$$V = \|n\| \times \|\varepsilon\| \cos(180 - \theta) < 0 \quad (23)$$

Cela signifie que le tag est visible par la caméra si l'angle entre la normale et la direction d'observation est inférieur à  $90^\circ$ .

- Angle de vue : Lorsque l'angle  $\theta$  est proche de  $90^\circ$ , l'image résultante n'est pas fiable et donc une limite doit être fixée.  $\theta$  est défini comme [87] :

$$\theta = \pi - \cos^{-1} \frac{n \cdot \varepsilon}{\|n\| \times \|\varepsilon\|} \quad (24)$$

- Champs de vue : Cette contrainte concerne la détermination du point de vue à partir duquel les éléments d'intérêt peuvent être observés. Par conséquent, l'angle de champ  $\delta$  couvert par une caméra peut être calculé selon la formule [87] :

$$\delta \text{ (en radians)} = 2 \arctan\left(\frac{d}{2f}\right) \quad (25)$$

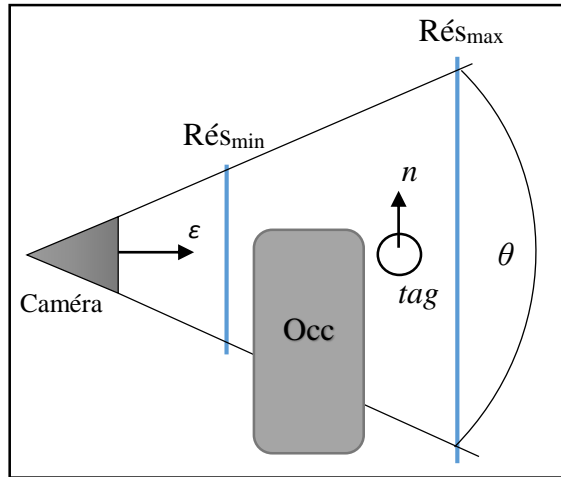
- Résolution : Cette contrainte correspond à la distance minimale et maximale selon lesquelles la caméra peut acquérir les tags de manière précise [88] (Figure 3.13). Elle est représentée par la formule suivante :

$$Rés_{\min} \leq \|([x_i, y_i, z_i] - tag_j) \cdot v_i\| \leq Rés_{\max} \quad (26)$$

Avec :  $v_i$  est le vecteur d'unité (tout le long de l'axe optique sur la trajectoire de vue de la caméra).

- Occlusion : Cette contrainte est la plus importante à considérer lors de la conception d'un algorithme de placement des caméras. Un *tag* est complètement visible si rien ne bloque sa projection par la caméra. Toutes entités peuvent être considérées comme un obstacle (Figure 3.13). Ainsi, la contrainte est exprimée selon l'équation suivante :

$$Occ = \begin{cases} \text{visible: si} \left( SL_{C_{tag}} \cap \left( \bigcup_{j=1}^{N_t} tag_j \right) \right) = \phi \\ \text{occulté: ailleurs} \end{cases} \quad (27)$$



**Figure 3.13.** Contraintes que doit satisfaire un emplacement optimal de caméras pour la Motion Capture.

Pour cela, nous cherchons à maximiser la fonction d'optimisation suivante :

$$f = \sum_{i=1}^5 w_i(x) \text{ où } f = w_1(V) + w_2(\theta) + w_3(\delta) + w_4(Rés) + w_5(Occ) \quad (28)$$

Où  $w_i$  sont les poids d'importance prédéfinis par le concepteur avec  $i = \{1 \dots 5\}$ , à partir des contraintes données précédemment  $x = \{V, \theta, \delta, Rés, Occ\}$ .

Cela donne :

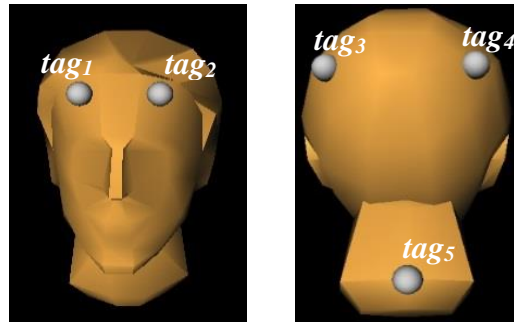
$$MAX_{reconst\_3D} = Max f \text{ étant donnée } Q = \frac{E_r}{Nf * Nt} \quad (29)$$

Pour un nombre minimum de caméras :

$$MIN_{cout} = Min \sum_{i=1}^{Nc} C_i \text{ étant donnée } \sum_{i,j,k=1}^{Nc, Nt, Nf} (a_{ij})_k \geq rctag_{min} \quad (30)$$

Partant de ces équations, l'objectif est d'évaluer la qualité d'un réseau de caméras pour optimiser la visibilité des tags présents dans la scène 3D.

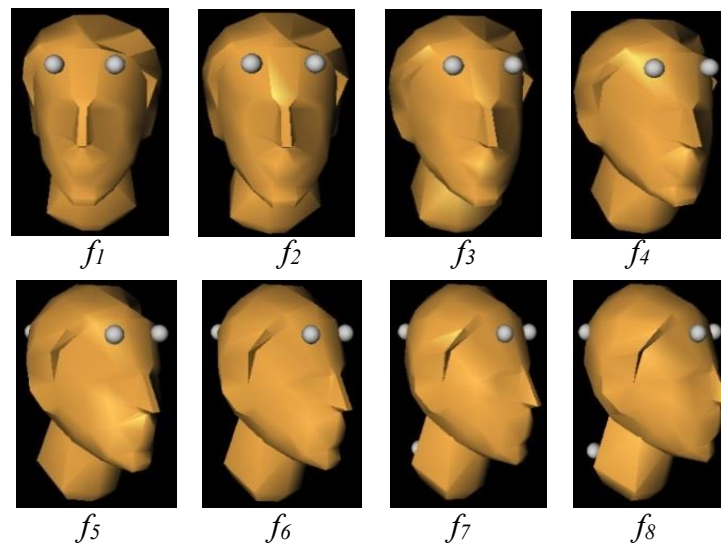
L'exemple suivant (Figure 3.14) illustre un nombre de caméras utilisées  $nc = 5$  et un nombre de tags  $Nt = 5$ . Le test est réalisé sur un mouvement d'orientation de la tête de l'humanoïde de la droite vers la gauche sur 8 trames,  $Nf = 8$  (Figure 3.15).



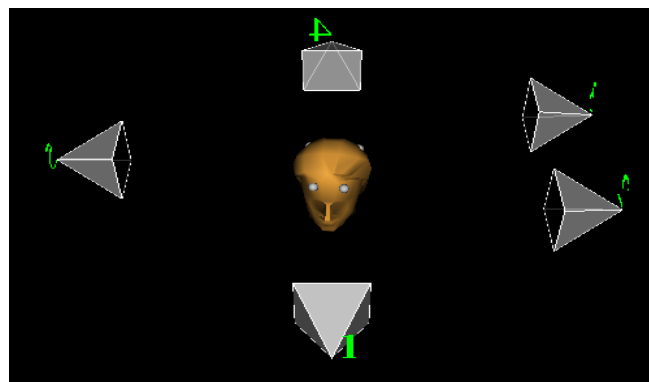
**Figure 3.14.** Emplacement des 5 tags de la tête de l'humanoïde.

Comme le montre la figure 3.14, 5 tags sont placés sur la tête de l'humanoïde. Considérons maintenant, 5 caméras ( $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$ ) placées aléatoirement autour de la tête au cours du mouvement pour capturer et suivre les 5 tags comme le montre la Figure 3.16.

Les tableaux 3.2 et 3.3 illustrent le calcul de la qualité de l'emplacement des caméras pour la configuration proposée.



**Figure 3.15.** Mouvement de la tête de la droite vers la gauche sur 8 trames.



**Figure 3.16.** Emplacement d'un réseau de 5 caméras pour capturer les 5 tags de la tête.



<i>Caméras #</i>	<b>Visibilité des tags sur les différentes trames par chacune des caméras</b>									
<i>Caméra 1</i>	$f_k \backslash tag_j$	$f_1$	$f_2$		$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$
	<i>tag<sub>1</sub></i>	1	1		1	1	1	1	1	1
	<i>tag<sub>2</sub></i>	1	1		1	1	1	1	1	1
	<i>tag<sub>3</sub></i>	0	0		0	0	0	0	0	0
	<i>tag<sub>4</sub></i>	0	0		0	0	1	1	1	1
	<i>tag<sub>5</sub></i>	0	0		0	0	0	0	1	1
<i>Caméra 2</i>	$f_k \backslash tag_j$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	
	<i>tag<sub>1</sub></i>	0	0	1	1	1	1	1	1	
	<i>tag<sub>2</sub></i>	1	1	1	1	1	1	1	1	
	<i>tag<sub>3</sub></i>	1	1	1	1	1	1	1	0	
	<i>tag<sub>4</sub></i>	0	0	0	0	0	0	0	0	
	<i>tag<sub>5</sub></i>	1	1	1	1	0	0	0	0	
<i>Caméra 3</i>	$f_k \backslash tag_j$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	
	<i>tag<sub>1</sub></i>	0	0	0	1	1	1	1	1	
	<i>tag<sub>2</sub></i>	1	1	1	1	1	1	1	1	
	<i>tag<sub>3</sub></i>	1	1	1	1	1	1	0	1	
	<i>tag<sub>4</sub></i>	0	0	0	0	0	0	1	0	
	<i>tag<sub>5</sub></i>	1	0	1	1	0	0	1	0	
<i>Caméra 4</i>	$f_k \backslash tag_j$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	
	<i>tag<sub>1</sub></i>	0	0	0	0	0	0	0	0	
	<i>tag<sub>2</sub></i>	0	0	0	0	0	1	1	1	
	<i>tag<sub>3</sub></i>	1	1	1	1	1	1	1	1	
	<i>tag<sub>4</sub></i>	1	1	1	1	1	1	1	0	
	<i>tag<sub>5</sub></i>	1	1	1	1	1	1	1	1	
<i>Caméra 5</i>	$f_k \backslash tag_j$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	
	<i>tag<sub>1</sub></i>	1	1	1	1	1	0	0	0	
	<i>tag<sub>2</sub></i>	0	0	0	0	0	0	0	0	
	<i>tag<sub>3</sub></i>	0	0	0	0	1	1	1	1	
	<i>tag<sub>4</sub></i>	1	1	1	1	1	1	1	1	
	<i>tag<sub>5</sub></i>	1	1	1	1	1	1	1	1	

**Tableau 3. 2.** Perception des 5 tags par les 5 caméras sur 8 trames.

Le tableau 3.2 représente les différentes caméras correspondant à chaque tag pour chaque trame. Le '1' signifie que le tag est visible par la caméra et le '0' signifie qu'il ne l'est pas. Par exemple, pour la caméra 3, le tag<sub>4</sub> est visible uniquement pour la trame f<sub>7</sub>.

$tag_j \backslash f_k$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$
$tag_1$	2	2	3	4	4	3	3	3
$tag_2$	3	3	3	3	3	4	4	4
$tag_3$	3	3	3	3	4	4	3	3
$tag_4$	2	2	2	2	3	3	4	2
$tag_5$	4	3	4	4	2	2	4	3

**Tableau 3. 3.** Nombre de caméras captant chaque tag pour les différentes trames.

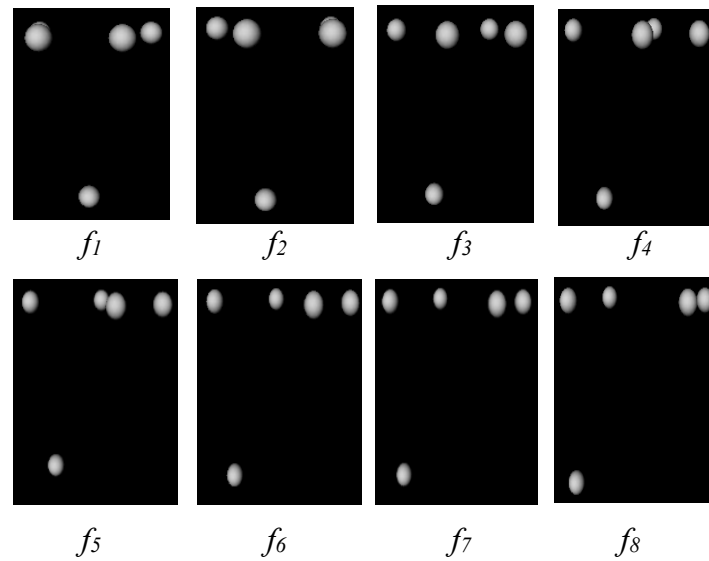
Le tableau 3.3 résume le nombre de caméras captant chaque tag pour une trame donnée. Par exemple, pour la trame f<sub>1</sub>, le tag<sub>4</sub> est capté par 2 caméras. Pour plus de précision, nous pouvons identifier les caméras qui captent les différents tags ; à titre d'exemple, pour la trame f<sub>1</sub>, le tag<sub>4</sub> est capté par les 2 caméras C4 et C5 (tableau 3.4).

$f_k \backslash tag_j$	$f_1$		$f_2$		$f_3$			$f_4$				$f_5$			$f_6$			$f_7$			$f_8$						
$tag_1$	C1	C5	C1	C5	C1	C2	C5	C1	C2	C3	C5	C1	C2	C3	C5	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3			
$tag_2$	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
$tag_3$	C2	C3	C4	C2	C3	C4	C2	C3	C4	C2	C3	C4	C2	C3	C4	C5	C2	C3	C4	C5	C2	C4	C5	C3	C4	C5	
$tag_4$	C4	C5	C4	C5	C4	C5	C4	C5	C4	C5	C1	C4	C5	C1	C4	C5	C1	C3	C4	C5	C1	C3	C4	C5	C1	C5	
$tag_5$	C2	C3	C4	C5	C2	C4	C5	C2	C3	C4	C5	C2	C3	C4	C5	C4	C5	C4	C5	C1	C3	C4	C5	C1	C4	C5	

**Tableau 3. 4.** Nature des caméras captant chaque tag pour les différentes trames.

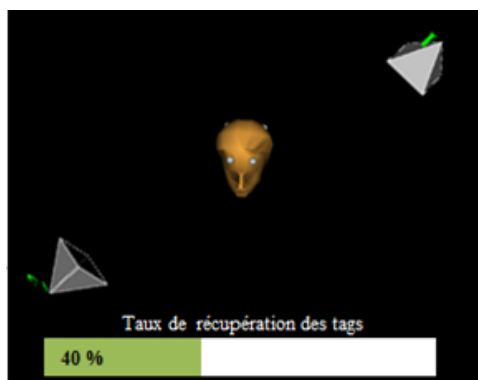
A l'issue du mouvement, nous obtenons les données qui nous permettent de calculer la visibilité des tags par les caméras de la solution proposée.

Sur la figure 3.17, nous constatons que chaque tag est bien capté par au moins 2 caméras ce qui nous permet de le retrouver et le suivre pour chaque trame.



**Figure 3.17.** Récupération des coordonnées des tags selon le tableau 3.3.

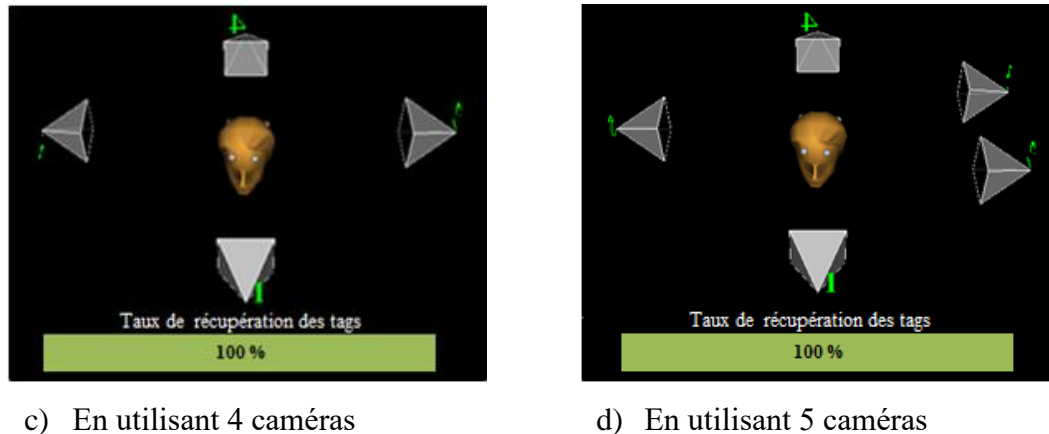
Dans les Figures 3.18 (a, b, c et d), quatre exemples d'emplacements de réseaux de caméras sont présentés avec leur taux de récupération des 5 tags de la tête de l'humanoïde de l'exemple précédent. Nous remarquons que pour les Figures 3.18a et 3.18b (2 et 3 caméras respectivement), le taux de récupération des tags est de 40% et 85% respectivement ; tandis que pour les Figures 3.18c et 3.18d, nous utilisons un réseau à 4 et 5 caméras, le taux de récupération a atteint le maximum (100%). Bien que ces deux derniers réseaux aient le même taux de récupération des tags, à priori celui utilisant 4 caméras semble être le meilleur puisqu'il minimise le nombre de caméras utilisées. Par conséquent, le coût d'emplacement diminue est de ce fait, notre métrique choisit ce réseau par rapport à celui utilisant 5 caméras selon l'équation (30) définie précédemment.



a) En utilisant 2 caméras



b) En utilisant 3 caméras



**Figure 3.18.** Taux de récupération des tags par un réseau de caméras pour capturer les 5 tags de la tête.

Après le processus d'évaluation, nous passons au processus de sélection présenté ci-dessous.

**iii. Sélection :** Une fois que la population est triée en fonction de la fitness des réseaux de caméras, ceux avec les scores de fitness les plus élevés sont sélectionnés pour la phase de reproduction. Il existe de nombreuses méthodes de sélection [89]. Nous avons utilisé la sélection par élitisme, où les réseaux de caméras les plus prometteurs (fitness  $\geq 50\%$ ) participent à l'amélioration de la population.

**iv. Reproduction :** Dans cette étape, les réseaux de caméras sélectionnés de l'étape précédente sont utilisés pour créer une nouvelle génération de réseaux à partir des opérateurs de croisement et de mutation.

Le choix de la probabilité de croisement  $P_c$  et de la probabilité de mutation  $P_m$  a un impact direct sur la convergence de l'algorithme [90]. Par ailleurs, il est difficile de trouver les meilleures valeurs qui s'adaptent à tous les problèmes. Nous utilisons des stratégies adaptatives de croisement et de mutation afin de faire face à cette difficulté. Les opérateurs d'adaptation communément utilisés sont détaillés dans [91, 92, 93, 96]. Nous utilisons celle proposée par [92, 93] afin de définir des opérateurs de croisement et de mutation permettant de réduire la taille des populations et de converger rapidement vers la solution optimale. Ces opérateurs sont particulièrement efficaces.

La probabilité de croisement peut être exprimée comme :

$$P_c = \begin{cases} k_1 (f_{\max} - f) / (f_{\max} - \bar{f}), & f \geq \bar{f} \\ k_2, & f < \bar{f} \end{cases} \quad (31)$$

$$P_c = \begin{cases} k_1 e^{(-k_2(f-\bar{f}))}, & f \geq \bar{f} \\ P_{c1}, & f < \bar{f} \end{cases}$$

La probabilité de mutation peut être exprimée comme :

$$P_m = \begin{cases} k_3 (f_{\max} - f) / (f_{\max} - \bar{f}), & f \geq \bar{f} \\ k_4, & f < \bar{f} \end{cases} \quad (32)$$

$$P_m = \begin{cases} k_3 e^{(-k_4(f-\bar{f}))}, & f \geq \bar{f} \\ P_{m1}, & f < \bar{f} \end{cases}$$

Où :

$k_1, k_2, k_3, k_4$  : Nombres entiers  $\leq 1.0$

$f_{\max}$  : Valeur maximale de fitness dans la population

$\bar{f}$  : Valeur moyenne de fitness de chaque génération

$f$  : Valeur de fitness des individus mutants

Il a été bien établi dans la littérature concernant les algorithmes génétiques [94, 95] que ( $P_c \geq 0.5$ ) et ( $P_m \geq 0.01$ ) produisent une bonne convergence de l'algorithme. De ce fait, nous considérons :

$$\begin{aligned} k_1 &= k_2 = 0.5 \\ \text{et} \\ k_3 &= k_4 = 0.01 \end{aligned}$$

### 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description et une modélisation de notre système. Ce dernier consiste à développer une approche de placement de caméras pour la Motion Capture. Nous avons introduit un environnement de simulation qui nous permet d'examiner les paramètres du système.

En ce qui concerne l'aide de l'opérateur humain pour une bonne disposition des caméras dans les scènes de Motion Capture, nous avons développé une nouvelle méthode basée sur les algorithmes génétiques afin de configurer automatiquement les réseaux de caméras. Le nombre de paramètres et leurs interactions rendent une configuration manuelle complexe, sauf pour les

cas les plus simples. Pour les environnements complexes (avec des occlusions ou pour des applications avec des requêtes très exigeantes), un outil automatisé évolutif est une nécessité. Pour atteindre cet objectif, nous avons introduit une méthode appelée algorithme génétique guidé (AGG) afin d'optimiser la tâche de positionnement des caméras et la sélection de leurs paramètres. Dans un environnement simulé, cette approche a été présentée pour fournir une solution avec une erreur inférieure à celle d'un réseau de caméras conçu manuellement par l'opérateur humain ou par un algorithme génétique classique.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons les résultats de simulations obtenus à partir de l'exécution, de l'analyse et de la validation de notre système d'aide au placement des caméras.

## Mise en œuvre, résultats et discussions

---

### Sommaire

---

4.1	Introduction .....	68
4.2	Outils de programmation .....	69
4.2.1	Langage de programmation .....	69
4.2.2	Langage « Virtual Reality Modeling » .....	69
4.3	Simulation .....	70
4.3.1	Scénarios de simulation .....	70
4.3.2	Mesures de performance .....	72
4.3.3	Paramètres de simulation .....	73
4.4	Résultats et discussions .....	74
4.4.1	Qualité d'optimisation .....	74
4.4.2	Durée d'optimisation .....	76
4.4.3	Taux de reconstruction .....	77
4.5	Conclusion .....	82

---

### 4.1 Introduction

Dans le précédent chapitre, nous avons décrit en détails notre système d'aide au placement des caméras. Celui-ci s'articule sur deux étapes essentielles, à savoir : la modélisation de la session à capturer en vrai et l'optimisation du placement des caméras pour cette session de capture.

Ce chapitre présente les résultats de simulations obtenus à partir de l'exécution du système d'aide au placement des caméras que nous avons mis en œuvre pour résoudre le problème de la Motion Capture optique, ainsi que son analyse et validation. De même, nous présentons les outils et les plateformes de développement utilisés à l'implémentation des différents composants du système.

Pour évaluer la performance de l'AGG dans le système d'aide au placement des caméras, nous avons également mis en place et appliqué l'AG sur le problème. Puisque les AGs sont des algorithmes stochastiques, les solutions heuristiques pour notre problème varient à chaque

exécution des deux algorithmes. Cela est dû aux multitudes d'itérations pour chaque exécution. Afin de pouvoir déduire des conclusions fiables sur la précision et la robustesse des algorithmes, plusieurs essais avec différentes itérations sont réalisés pour chaque simulation.

Un aperçu sur les scénarios de tests pour la simulation est présenté. L'impact des différents paramètres du AG et AGG est examiné. Par conséquent, les résultats globaux de chaque algorithme dans chaque scénario sont présentés. Les résultats obtenus dans différents scénarios seront alors discutés.

### **4.2 Outils de programmation**

Afin d'implémenter notre approche, nous avons utilisé plusieurs outils et plateformes. Ces derniers sont décrits dans cette section.

#### **4.2.1 Langage de programmation**

Pour implémenter notre système, nous avons choisi le langage de programmation MATLAB en vue de ses qualités de simplicité, de robustesse, de portabilité et de dynamisme ; en plus il est maniable et facile à utiliser.

MATLAB nous permet de modifier notre simulation pour inclure des cibles et des obstacles avec des trajectoires et mouvements programmables. Il nous permet aussi d'inclure une interface pour les différentes implémentations de l'algorithme de suivi des tags et de recueillir des connaissances sur les différences de performance entre les propositions dans diverses conditions opérationnelles (vitesse de l'objet, résolution de la caméra et dimensions du volume de travail).

#### **4.2.2 Langage « Virtual Reality Modeling »**

Pour modéliser les scènes de capture de mouvement, nous avons choisi le langage « Virtual Reality Modeling » (voir Figure 4.1).

Ce langage (connu sous le nom VRML) est un langage informatique de description d'univers virtuels en trois dimensions. Ce langage interprété est une norme internationale ISO. VRML est développé par un ensemble de chercheurs à l'initiative de la société Silicon Graphics pour permettre l'intégration d'environnements virtuels sur le Web. A la place de page HTML, les scènes VRML décrivent des mondes en trois dimensions dans lesquels l'utilisateur peut se déplacer, interagir et cliquer sur des hyperliens.



La version courante de VRML est VRML 2.0 devenue un standard ISO/IEC sous le nom de VRML97 présentant :

- 1- Un langage simple pour décrire les mondes 3D virtuel interactif et multimédia.
- 2- Un moyen de réaliser des applications graphiques interactives.

Un monde VRML peut être créé à partir de :

- 1- Un éditeur de monde VRML (WebSpaceAuthor).
- 2- Un programme de modélisation (3DS Max).
- 3- Un générateur de formes et de mouvements (Script perl).

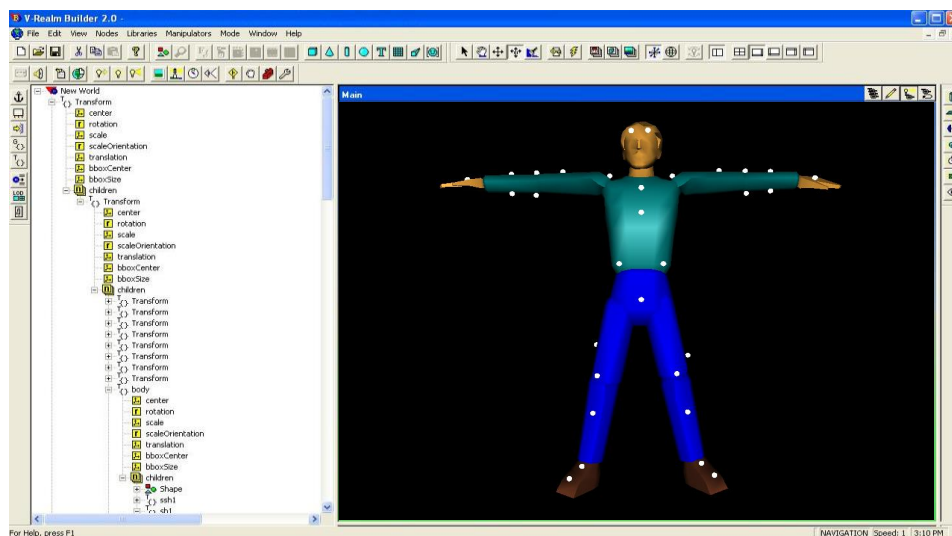


Figure 4.1. Interface du VRML.

### 4.3 Simulation

Notre simulation porte sur trois scénarios de mouvements (marcher, courir et sauter) avec différents niveaux de complexité (Figure 4.2). Le niveau de complexité est progressivement augmenté lors de la conception de ces scénarios, par conséquent, le premier scénario est le moins complexe et le dernier scénario est le plus complexe.

#### 4.3.1 Scénarios de simulation

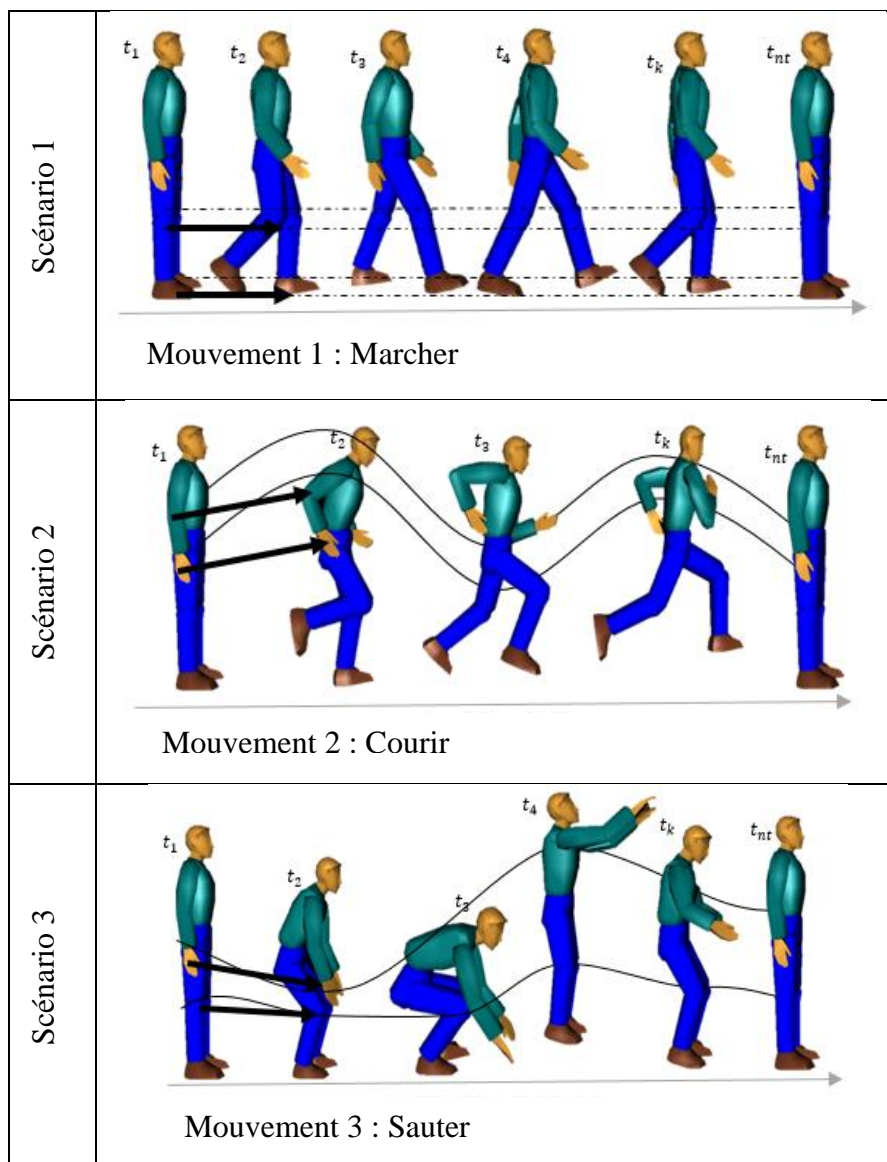
Les scénarios de tests sont présentés ci-dessous :

1. Marcher : Le sujet effectue un ensemble de rotations segmentaires du membre inférieur du corps réalisant un mouvement de translation du corps entier.

2. Courir : Le sujet effectue un ensemble de rotations ayant des similitudes avec la marche pour se déplacer, mais avec une vitesse plus élevée et différents mouvements.
3. Sauter : Le sujet effectue un saut en se tenant debout à l'état initial ; ensuite il se penche pour sauter. Ainsi, dans le processus de la motion de saut, la contrainte d'occlusion est plus présente que pour les deux autres mouvements.

Les trois scénarios sont étudiés pour deux environnements :

- **Environnement 1** : sans obstacles.
- **Environnement 2** : avec obstacles (un mur de 2 m x 2 m, situé à une distance de 1m à gauche de la cible).



**Figure 4.2.** Trois scénarios de test pour évaluer les performances d'AGG vs AG.

Pour réaliser ces scénarios à partir du modèle graphique (présenté dans la section 3.4.1) nous utilisons MATLAB 7.1 et ‘Virtual Reality Modeling Language’ (VRML), décrits dans la section précédente. Toutes les simulations sont menées sur un ordinateur du type (INTEL i5 3.3 GHz, 8 Go de RAM).

### 4.3.2 Mesures de performance

Afin d’évaluer notre approche, nous définissons les mesures de performance suivantes :

1. Qualité d’optimisation : Cette mesure est liée à la valeur de fitness des emplacements générés dans l’étape d’initialisation. La valeur de fitness définit la convergence vers l’emplacement optimal des caméras où plus on s’approche de la valeur ‘1’ plus l’emplacement du réseau de caméras est performant.
2. Durée d’optimisation : C’est la durée maximale autorisée pour fournir le meilleur réseau de caméras pour un scénario quelconque. Si l’algorithme ne fournit pas sa réponse dans cette limite pour un test donné, ce test est considéré comme étant un échec, même si avec plus de temps, l’algorithme aurait pu fournir une réponse juste.
3. Coût d’optimisation : Cette mesure est essentielle pour les applications de Motion Capture. Le but est de minimiser le nombre de caméras utilisées pour la capture de mouvement de sorte que le placement des caméras soit le moins coûteux possible en termes de temps d’exécution et de prix (l’utilisation de plusieurs caméras peut coûter des milliers d’euros).

Comme décrit dans la section. 3.4.2.5, les évaluations de la fonction objective (y compris les calculs de visibilité des marqueurs) à une importante influence sur le temps de traitement total. Ainsi, un nombre fixe d’itérations pour chaque scénario nous a permis de comparer objectivement nos deux algorithmes.

### 4.3.3 Paramètres de simulation

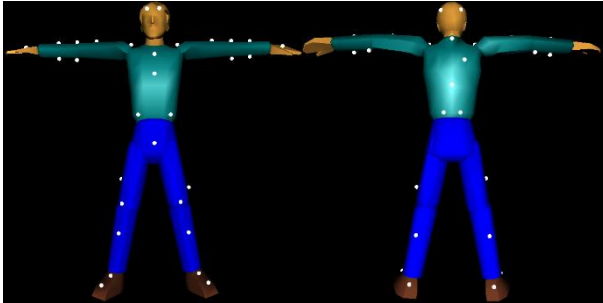
Les paramètres des caméras utilisées et leurs valeurs nominales sont présentés dans le tableau 4.1. Nous comparons notre approche AGG avec l’AG [78] pour chacun des scénarios précédents. Les paramètres utilisés pour les deux algorithmes sont présentés dans le tableau 4.2. Le modèle de l’humanoïde utilisé dans le VRML et les paramètres de tests sont présentés dans le tableau 4.3.

Paramètres	Unités	Valeurs typiques
Champ de vue	Degrés	50°
Résolution d'image	Pixels	2 mégapixels
Nombre de caméras	#	4-10
Position (spatiale)	[x, y, z] en mètres	Variables
Orientation (angulaire)	[ $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ ] en degrés	Variables

**Tableau 4.1.** Paramètres des caméras utilisées et leurs valeurs nominales.

Paramètres	AGG	AG
Taille de la population $P$	80-300	80-300
Probabilité de croisement $P_c$	$0.5 \leq P_c \leq 1$	0.6
Probabilité de mutation $P_m$	$0.01 \leq P_m \leq 0.5$	0.2
Poids d'importance $w_i$	$w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 = 0.2$	$w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 = 0.2$
Intervalle de recherche pour $[x, y, z]$	50 centimètres	50 centimètres
Intervalle de recherche pour $[\alpha, \beta, \gamma]$	Valeurs calculées par TDE	5 degrés
Fréquence d'échantillonnage $f_e$	60-240 HZ	0-240 HZ

**Tableau 4.2.** Paramètres des deux algorithmes (AGG et AG).

Paramètres	Valeurs typiques		
Humanoïde			
Nombre de tags	Total : 54		
Mouvements de tests	Marcher	Courir	Sauter
Durée	15 secs	20 secs	7 secs

**Tableau 4.3.** Modèle de l'humanoïde utilisé dans le VRML et paramètres de tests.

## 4.4 Résultats et discussions

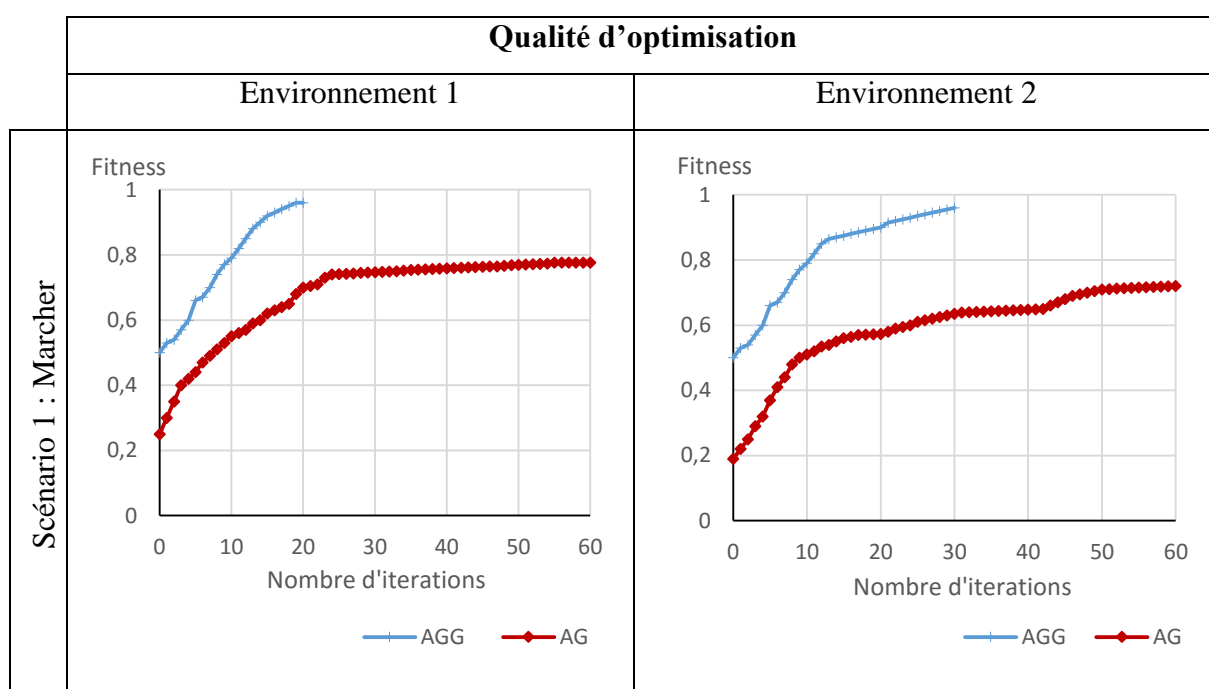
Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus par les deux algorithmes (l'AGG et l'AG) sur chacun des trois scénarios précédents. Ensuite, nous discutons et analysons ces résultats acquis en comparant les différents aspects de notre algorithme AGG et l'algorithme AG selon les mesures de performance (Section 4.3.2). À la fin, à partir de ces discussions, nous abordons les réponses à nos questions de recherche (Section 1.4).

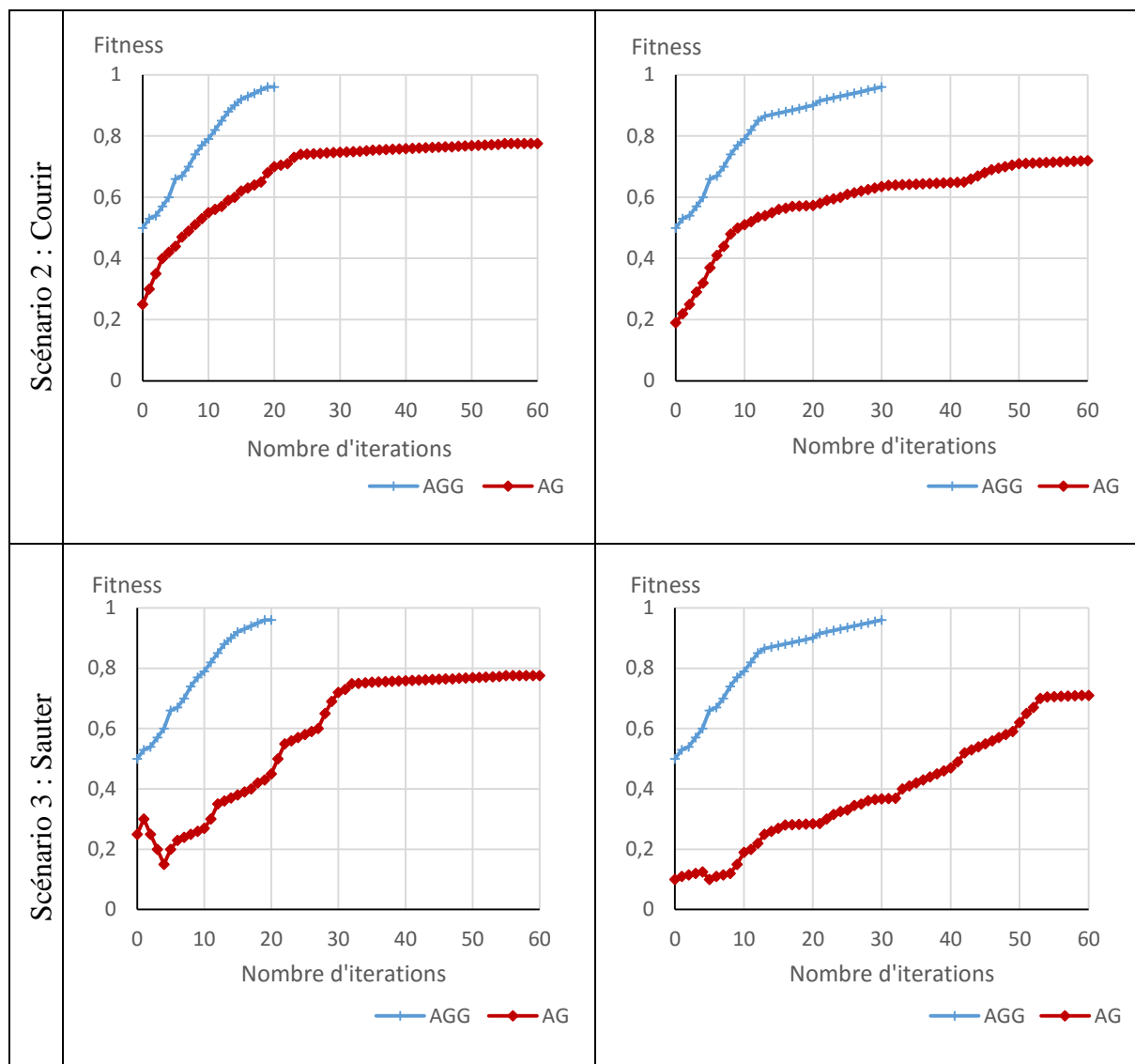
### 4.4.1 Qualité d'optimisation

La figure 4.3 montre la progression de la valeur moyenne de fitness durant 60 itérations de chaque algorithme pour les deux cas étudiés.

Environnement 1 : Pour les scénarios 1 et 2, les deux algorithmes ont débuté pour des valeurs moyennes de fitness voisines. Cependant, pour le troisième mouvement du scénario 3, l'AG a débuté avec une faible valeur de fitness et l'AGG avec une importante valeur de fitness (itérations initiales). Pour les trois mouvements, nous constatons que les performances de point de vue fitness sont proches pour les mouvements (marcher et courir) tandis qu'elles sont nettement meilleures pour l'AGG pour le mouvement (sauter).

Environnement 2 : Pour les trois scénarios, l'AG a débuté avec une faible valeur de fitness et l'AGG avec une importante valeur de fitness (itérations initiales). Pour les trois mouvements en présence d'obstacles, nous constatons que les performances de point de vue fitness sont nettement meilleures pour l'AGG.





**Figure 4.3.** Qualité d’optimisation de AGG vs AG selon la valeur de fitness des réseaux de caméras générés.

#### 4.4.2 Durée d’optimisation

Comme le montre la figure 4.4, l’AGG a un net avantage par rapport à l’AG en termes de durée d’optimisation quel que soit le mouvement étudié (marcher, courir ou sauter) et quel que soit l’environnement considéré (sans ou avec obstacles). L’AGG sélectionne avec succès les emplacements des caméras les plus adaptés au mouvement pour la récupération des coordonnées des tags pour une durée plus raisonnable, tandis que la durée d’optimisation par l’AG varie selon le scénario étudié. Lorsqu’un scénario devient de plus en plus encombrant, la durée d’optimisation augmente.

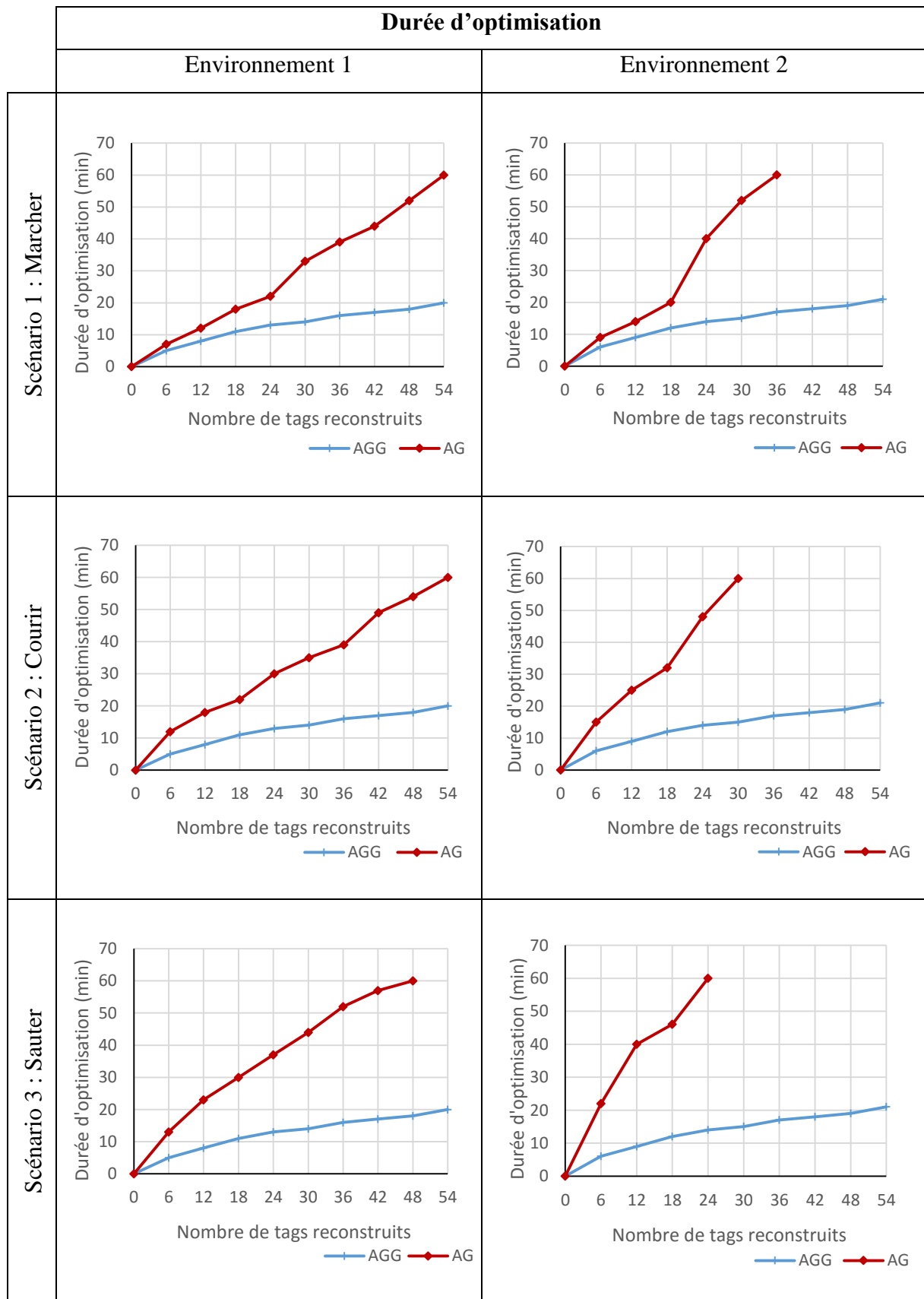


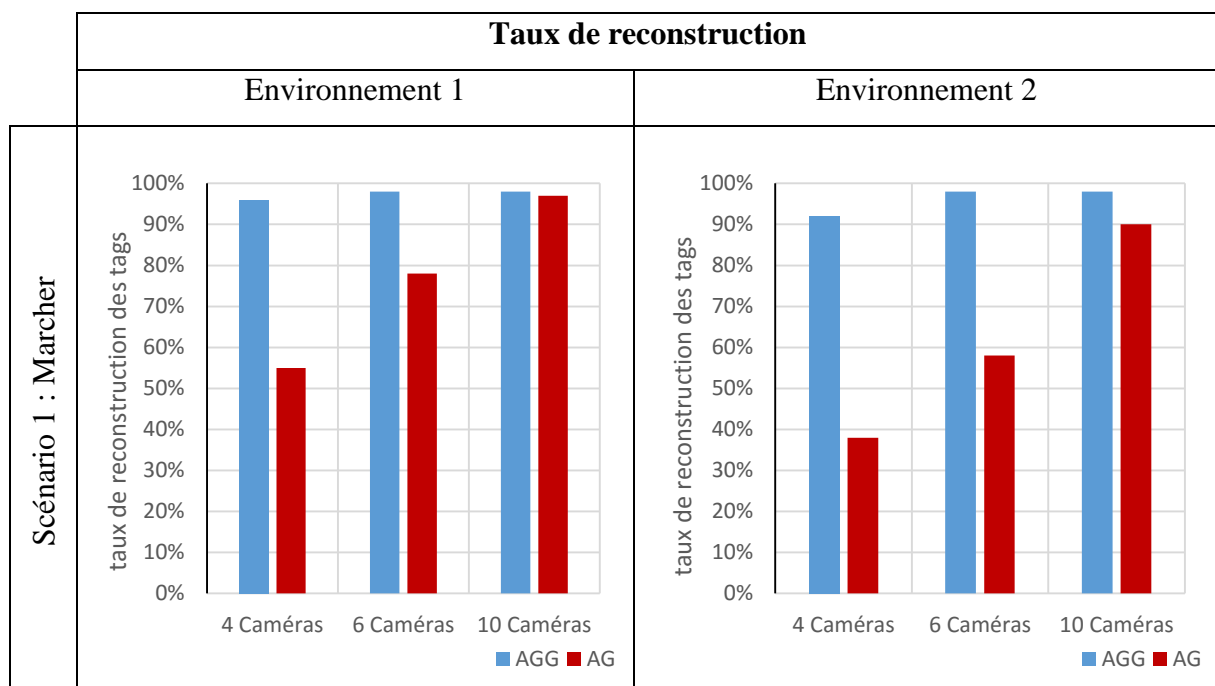
Figure 4.4. Durée d'optimisation du placement des caméras selon le nombre de tags reconstruits par rapport au nombre d'itérations effectuées par l'AGG et l'AG.

### 4.4.3 Taux de reconstruction

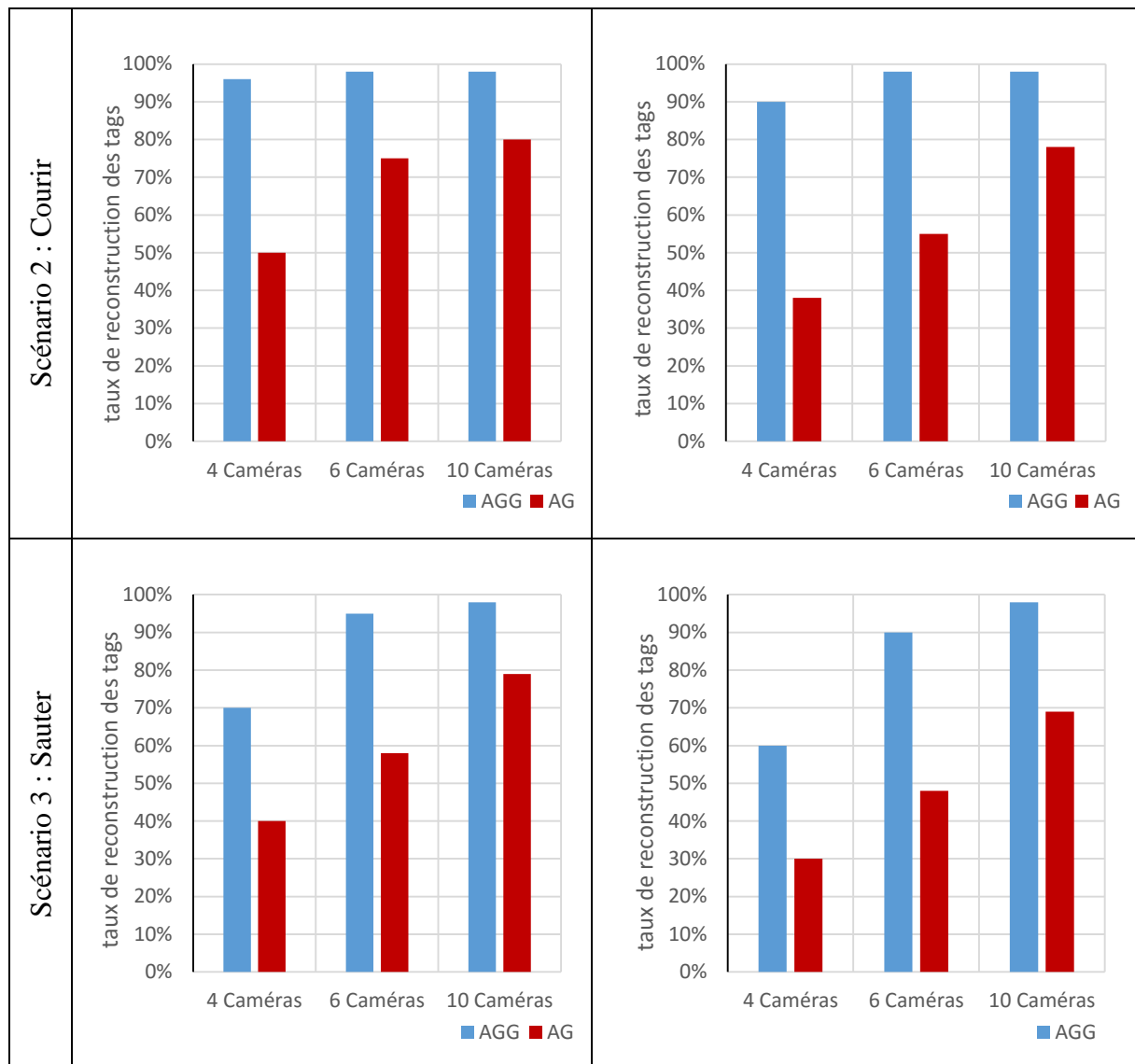
En ce qui concerne le coût d'optimisation, la figure 4.5 montre que pour l'environnement1, l'AGG atteint une récupération maximale de tags de 98 % en utilisant 4 caméras avec une durée d'exécution de 15 min pour les trois scénarios étudiés, tandis que l'AG utilise 10 caméras pour une reconstruction moyenne de 90% des tags pour les scénarios (1 et 2) avec une durée d'exécution de 32 min et une reconstruction moyenne de 85% des tags pour le scénario 3 avec une durée d'exécution de 60 min.

Pour l'environnement 2, l'AGG atteint une reconstruction moyenne des tags de 98% en utilisant 6 caméras avec une durée d'exécution de 20 min pour les trois scénarios considérés, tandis que l'AG utilise 10 caméras pour une reconstruction moyenne de 79% des tags pour les scénarios (1 et 2) avec une durée d'exécution de 40 min et une reconstruction moyenne de 60% des tags pour le scénario 3 avec une durée d'exécution de 60 min.

D'après les résultats de simulation, notre méthode atteint une reconstruction moyenne des tags de 98% avec un coût minimal (un nombre inférieur de caméras (4 au lieu de 10) et une durée d'exécution inférieure (15 min au lieu de 32 et 60 min).

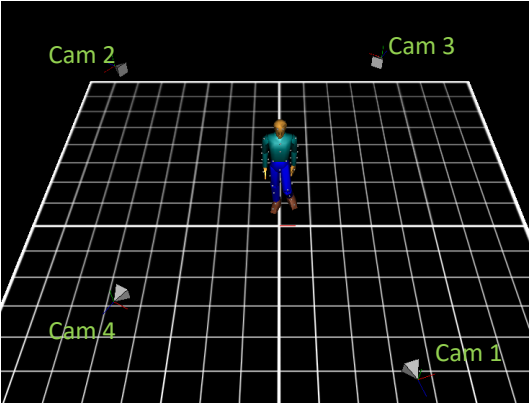
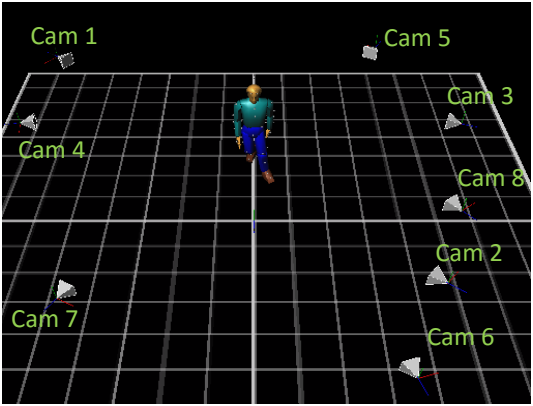
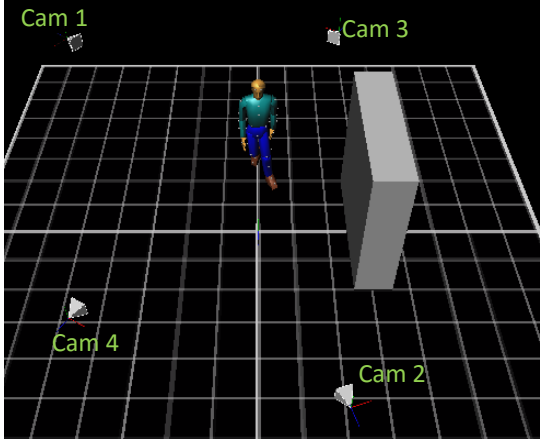
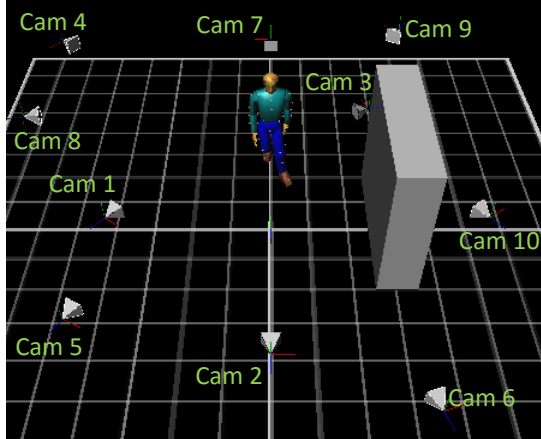




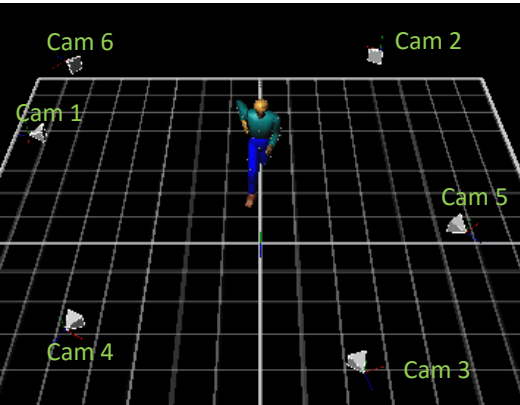
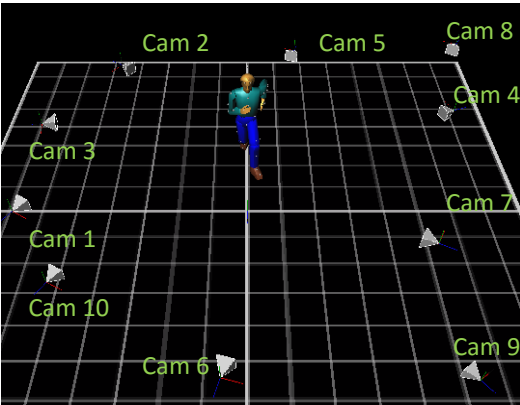
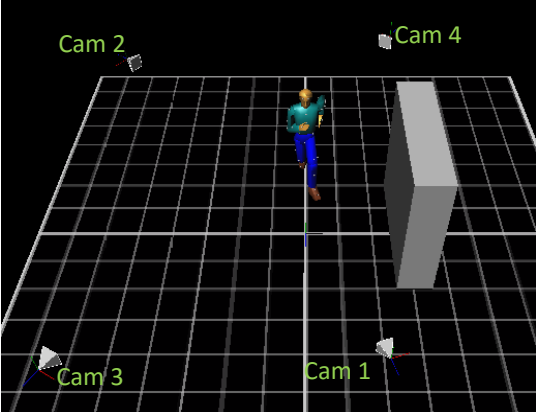
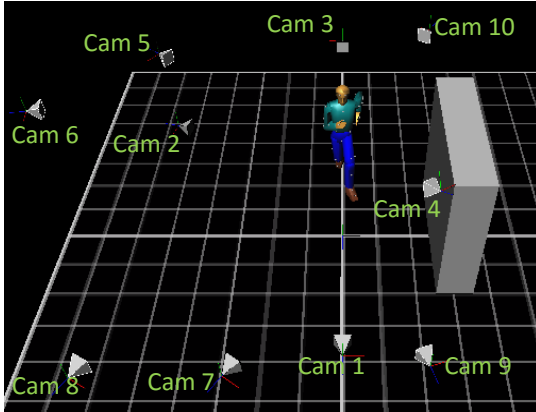


**Figure 4.5.** Coût d’optimisation des deux algorithmes AGG vs AG donné par le taux de reconstruction des tags avec 4, 6 et 10 caméras.

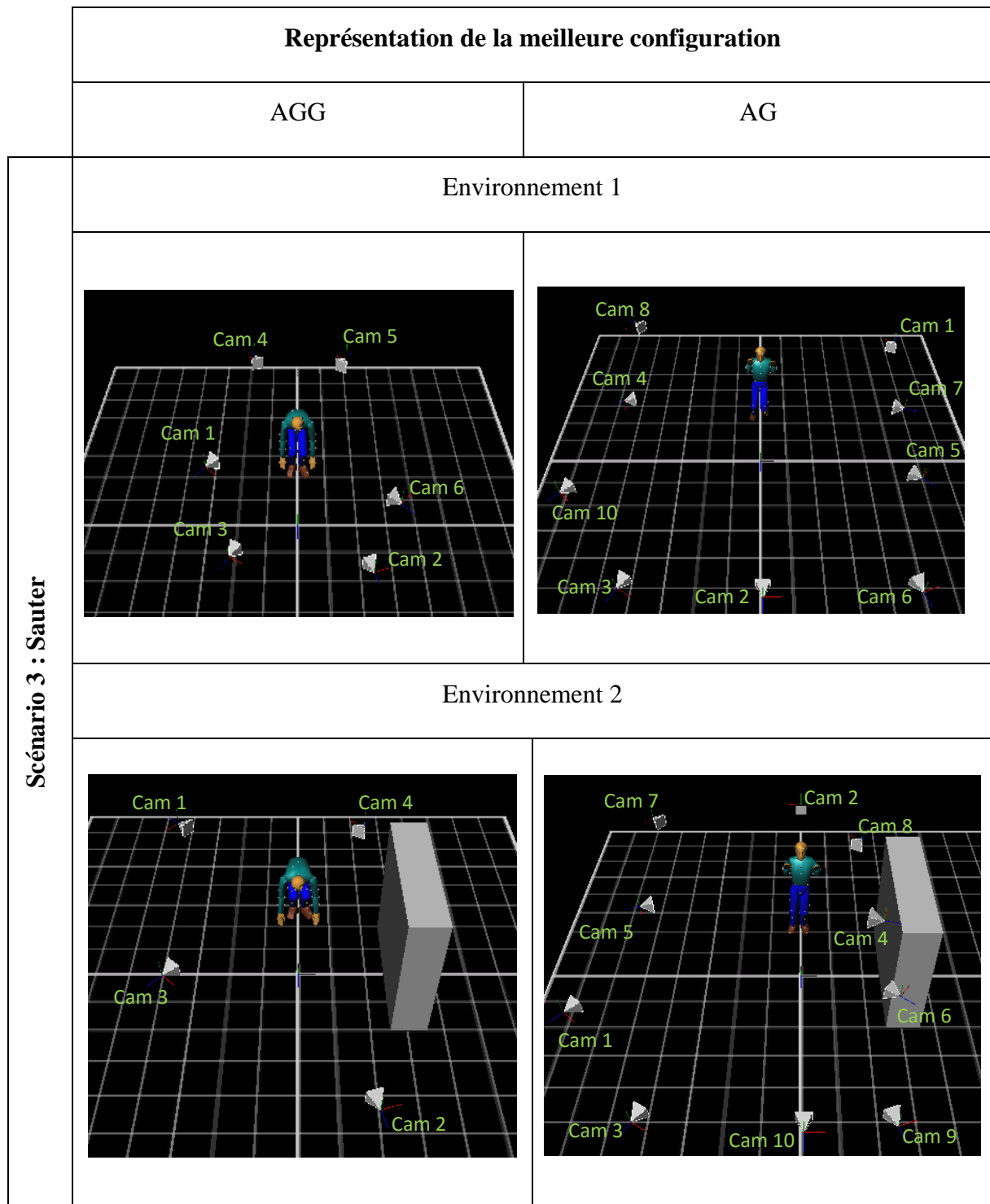
Une représentation relative à la meilleure configuration d’un réseau de caméras après l’exécution de l’AGG et l’AG pour les 3 scénarios et les 2 environnements est présenté en figure 4.6.

		Représentation de la meilleure configuration	
		AGG	AG
Scénario 1 : Marcher	Environnement 1		
			
	Environnement 2		
			

(a)

		<b>Représentation de la meilleure configuration</b>		
		AGG	AG	
<b>Scénario 2 : Courir</b>	Environnement 1			
				
	Environnement 2			
				

(b)



(c)

**Figure 4.6.** Représentation de la meilleure configuration d'un réseau de caméras par l'AGG et l'AG pour les 3 scénarios et les 2 environnements. (a, b, c).

## 4.5 Conclusion

Suite à notre conception présentée dans le chapitre 3 et la réalisation de notre architecture, nous avons pu mettre en œuvre l'ensemble des idées qui caractérisent l'architecture proposée.

Par la suite, nous avons exposé les résultats obtenus suite à nos recherches menées à ce jour. Les résultats obtenus ont montré que le rendement a augmenté de manière significative par rapport au procédé manuel. En plus, les améliorations sont en accord avec la réduction des problèmes associés à la technologie de capture de mouvement présentés dans le premier chapitre de cette thèse.

## Conclusion générale et perspectives

---

### Sommaire

---

5.1. Conclusion générale .....	83
5.2. Perspectives .....	86
5.2.1 Amélioration du modèle de base pour l'optimisation .....	86
5.2.2 Amélioration du prétraitement .....	86

---

### 5.1. Conclusion générale

Nous avons présenté dans cette thèse notre contribution à la problématique du placement des caméras pour la Motion Capture optique. Cette partie dresse un bilan de chacune de nos contributions, présente leurs limitations et propose d'éventuelles améliorations.

Le problème d'optimisation de placement de caméras est complexe. En effet, lorsqu'un opérateur humain souhaite définir manuellement le placement d'une caméra pour une Motion Capture, celui-ci doit réaliser un processus d'inversion mentale qui lui permet d'inférer la position et l'orientation de la caméra en fonction de la vue qu'il souhaite obtenir de la scène. Afin de le soulager dans cette tâche, nous avons proposé un système d'aide au placement de caméras qui se base sur la modélisation de la scène à capturer et qui utilise une méthode d'optimisation permettant l'étude du placement des caméras pour une session de capture de mouvement et surtout d'assister l'opérateur humain dans ses choix de placement des caméras.

Au vu de cela, nous avons classé cette recherche selon deux axes :

- 1. Premier axe :** Concernant l'environnement de modélisation, nous avons présenté une analyse des paramètres de réseaux de caméras et démontré leur effet sur les performances d'un système de Motion Capture optique. Ensuite, et après avoir revu la terminologie appropriée, nous avons introduit un environnement de simulation qui nous permet d'examiner chaque paramètre. L'analyse qui en résulte a généré un certain nombre d'informations importantes concernant les compromis auxquels est confronté l'opérateur du système de capture de mouvement optique et des recommandations ont

été données pour chacune. L'environnement de simulation se révèle être un outil utile pour explorer les configurations incertaines et évaluer rapidement des solutions candidates.

**2. Deuxième axe :** En ce qui concerne l'aide de l'opérateur humain pour une bonne disposition des caméras dans les scènes de Motion Capture, nous avons développé une nouvelle méthode basée sur les algorithmes génétiques afin de configurer automatiquement les réseaux de caméras. Le nombre de paramètres et leurs interactions rendent une configuration manuelle complexe, sauf pour les cas les plus simples. Les méthodes classiques comme PGA, OLNE et AGC ne sont adaptées que pour les scènes 2D ou 3D simples et ne peuvent gérer que quelques caméras et sont donc principalement d'intérêt académique. Pour les environnements complexes avec des occlusions ou pour des applications avec des requêtes très exigeantes, un outil automatisé évolutif est une nécessité. Pour atteindre cet objectif, nous avons introduit une méthode appelée algorithme génétique guidé (AGG) afin d'optimiser la tâche de positionnement des caméras et la sélection de paramètres. En considérant une large population de configurations de candidats et en classant leurs performances, nous sélectionnons les meilleurs membres de la scène et de manière itérative les affiner jusqu'à convergence. Dans un environnement simulé, cette approche a été présentée pour fournir une solution avec une erreur inférieure à celle d'un réseau de caméras conçu manuellement par l'opérateur humain ou par un algorithme génétique classique. Après vérification, ces conclusions sont confirmées.

Par la suite, nous avons décrit la portée des résultats des différentes simulations menées tout au long de cette recherche et leur relation avec les questions de recherche.

Pour étudier si le système d'aide au placement de caméras pour la Motion Capture participe à la prise en charge de la complexité des scènes de capture de mouvement, les résultats obtenus ont montré que :

- 90% des mouvements complexes peuvent être étudiés, lors de l'utilisation du SAPC-MOCAP.

Cela signifie que les résultats de ces simulations dévoilent que la complexité des scènes de capture de mouvement peut être considérablement prise en compte par le système d'aide au placement de caméras. Nous pouvons donc dire que cette recherche a contribué à l'élaboration de nouvelles connaissances par un protocole de simulation, ce qui permet de considérer la

complexité des scènes de capture de mouvement optique de manière sûre. Ceci est une contribution importante vu que les scènes de capture de mouvement optique sont naturellement complexes ce qui rend impossible la réalisation d'un traitement rapide, sauf si les données sont simplifiées de manière impérative.

Pour étudier si le système d'aide au placement des caméras pour la Motion Capture optique réduit les problèmes associés aux données manquantes causées par les occlusions, les résultats obtenus ont montré que :

- 99% des marqueurs utilisés lors d'une Motion Capture peuvent être trouvés lorsque les occlusions sont importantes et nombreuses.

Pour étudier si le système d'aide au placement des caméras pour la Motion Capture optique résout les problèmes d'identification de marqueurs actuels, les résultats obtenus ont montré que :

- 95% des marqueurs utilisés lors d'une Motion Capture sont correctement identifiés durant une capture de mouvement.

Cela montre que le système d'aide au placement des caméras peut résoudre les problèmes d'identification des marqueurs actuels.

Pour étudier si le système d'aide au placement des caméras pour la Motion Capture optique soutient une reconstruction 3D précise des données de capture de mouvement, les résultats obtenus ont montré que :

- 99 % de marqueurs sont reconstruits avec précision lorsque le système d'aide au placement de caméras est utilisé.

Les limites de cette recherche ainsi que des explications pour défaire leurs existences sont brièvement repris dans ce qui suit. Deux principales limitations sont évoquées :

- Les limitations dues à la conception du système.
- Les limitations dues à l'analyse du système.

Les questions se rapportant à ces limitations, sont décrites ci-dessous :

Les limitations les plus pertinentes dans la conception du système sont les suivantes :

- Aucune technique pour estimer le « switching » entre les marqueurs n'a été conçue. Toutefois, en raison des contraintes de temps de calcul, il est au-delà de la portée de cette thèse de concevoir de telles méthodes.



- Le procédé actuel d'identification du marqueur doit être optimisé pour soutenir l'identification d'une multitude de marqueurs de différents couleurs afin de suivre un corps humain complet en mouvement complexe. Le processus d'identification de marqueurs n'a pas été optimisé, vu que le classement des marqueurs par couleurs est une itération du processus déjà démontré et a donc été omis afin de réduire le temps de calcul.
- La conception de notre système ne prend pas en charge le traitement en temps réel, la conception doit donc être optimisée. Un tel processus d'optimisation est au-delà de la portée de ce projet de recherche en raison de contraintes de variation des données, mais le processus est techniquement faisable.

Les limitations associées à l'analyse du système comprennent :

- La robustesse de notre système d'aide n'a pas été testée dans des conditions complexes (plusieurs sujets en mouvement, plusieurs obstacles fixes et animés, variations importantes de la luminosité).

### **5.2. Perspectives**

L'étude de la Motion Capture est un vaste domaine interdisciplinaire qui englobe l'optique, la vision par ordinateur, l'optimisation, la mise en réseaux des caméras, etc.... En tant que domaine de recherche actif, beaucoup de travail reste à faire. Nous proposons deux extensions significatives, correspondant à cette thèse.

#### **5.2.1. Amélioration du modèle de base pour l'optimisation**

Dans le chapitre 3, nous avons présenté une approche automatisée pour configurer un réseau de caméras. Puisque les scénarios étudiés dans le chapitre 4 fournissent une preuve de concept, les mouvements utilisés étaient restreints avec de simples occlusions ce qui est suffisant pour de nombreux systèmes de base. Cependant, pour les systèmes plus complexes cette approche s'avère insuffisante. L'incorporation de modèles de mouvements avec la possibilité de modifier ces derniers fournira à l'opérateur humain une prédiction plus précise des performances dans les déploiements dans le monde réel.

#### **5.2.2. Amélioration du prétraitement**

Il est peut être utile d'examiner comment effectuer un prétraitement plus rapidement, ce qui augmentera forcément la durée globale du traitement. Pour le réaliser, on pourrait prévoir

où les marqueurs sont susceptibles d'être, en fonction de leur trajectoire et de leur vitesse et utiliser des fenêtres locales qui permettent de prétraiter uniquement les régions intéressantes des images 2D. Un mécanisme approprié de la recherche locale peut être réalisé grâce à l'utilisation de techniques probabilistes tels que : les filtres de Kalman (basés sur le théorème de Bayes), le théorème de Parzen (basé sur les méthodes de noyau) et les machines à états finis.

# Bibliographie

---

- [1] Silaghi, M., Plankners, R., Boulic, R., Fua, P. & Thalmann, D. 1998, 'Local and Global Skeleton Fitting Techniques for Optical Motion Capture', Proceedings of Workshop on Modelling and Motion Capture Techniques for Virtual Environments, Geneva, pp. 26-40.
- [2] Sato, M., Savchenko, V. & Ohbuchi, R. 2004, '3D freeform design: interactive shape deformations by the use of CyberGlove', IEEE International Conference on Cyberworlds, pp. 147-154.
- [3] MetaMotion. 2007, 'Gypsy-motion-capture', viewed 20 March, 2015, <<http://metamotion.com/gypsy/gypsy-motion-capture-system.htm>>.
- [4] Bachmann, E., McGhee, R., Yun, X. & Zyda, M. 2001, 'Inertial and Magnetic Posture Tracking for Inserting Humans Into Networked Virtual Environments', Proceedings of ACM Symposium on Virtual Reality Software & Technology, Alberta, pp. 9-16.
- [5] Yun, X. & Bachmann, E. 2004, 'Design and Implementation of the MARG Human Body Motion Tracking System', Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, pp. 625-630.
- [6] Meredit, M. & Maddock, S. 2001, 'Motion Capture File Formats Explained', paper presented to Department of Computer Science, University of Sheffield.
- [7] Menezes, P., Lerasle, F., Dias, J. & Chatila, R. 2005, 'A single camera motion capture system dedicated to gestures imitation', Proceedings of 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 430- 435.
- [8] Cohen, I., Medoni, G. & Gu, H. 2001, 'Inference of 3D Human Body Posture from Multiple Cameras for Vision-Based User Interface', Proceedings of 5th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, pp. 1-6.
- [9] Moeslund, T. & Granum, E. 2001, 'A Survey of Computer Vision-Based Human Motion Capture', Computer Vision and Image Understanding, vol. 81, no. 3, pp. 231 -268.
- [10] Oshita, M. 2006, 'Motion-Capture-Based Avatar Control Framework in Third-Person View Virtual Environments', Proceedings of ACM SIGCHI international conference on Advantages in computer entertainment technology, Hollywood.
- [11] Gleicher, M. & Ferrier, N. 2002, 'Evaluating Video-Based Motion Capture', Proceedings of Computer Animation, Geneva, pp. 75-80.
- [12] Gavrilu, D. 1997, 'The Visual Analysis of Human Movement: A survey', Transactions on Computer Vision and Image Understanding, vol. 73, no 1, pp. 82-98.
- [13] Bergler, C., Castiglia, C., DeVincenzo, J., DuBois, L., Feeley, K., Igoe, T., Meyer, J., Naimark, M., Postelnicu, A., Rabinovich, M., Rosental, S., Salen, K., Sudol, J. & Wright, B. 2005, 'Squidball: An Experiment in Large-Scale Motion Capture and Game Design', Intelligent Technologies for Interactive Entertainment, Maybary, M. (ed.) Springer, Berlin, pp 23-33.

- [14] Nakamura, Y., Yamane, K. & Tanie, H. 2008, 'Motion Capture System and Method for Three Dimensional Reconfiguring of Characteristic Point in Motion Capture System', European Patent Office, international patent number: PCT/JP2006/307677.
- [15] Bachmann, E. 2000, Inertial and magnetic tracking of limb segment orientation for inserting humans into synthetic environments, PhD thesis, Naval postgraduate school, California.
- [16] Bogart, J. 2000, 'Motion Analysis Technologies', Proceedings of Pediatric Gait, 2000. A new Millennium in Clinical Care and Motion Analysis Technology, Chicago, pp. 166-172.
- [17] Kirk, G., O'Brien, F. & Forsyth, A. 2005, 'Skeletal Parameter Estimation from Optical Motion Capture Data', Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Deigo, pp. 782-788.
- [18] Zheng, K., Zhu, Q., Zhuang, Y. & Pan, Y. 2001, 'Motion Processing in Tight-Clothing Based Motion Capture', Robot Vision, Auckland.
- [19] Chooprayoon, V. & Fung, C. 2007, 'Thai small and medium enterprises engagement in the emerging digital content and game industry', Proceedings of 2nd international conference on Digital interactive media in entertainment and arts, Perth, pp. 147-152.
- [20] Williams, C. 2004, 'Biomech tech: Creating a virtually perfect athlete', Focus, September, pp. 52-58.
- [21] Wren, C., Azarbajejani, A., Darrel, T. & Pentland, A. 1997, 'Pfinder: Real-time Tracking of the Human Body', IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 19, no. 7, pp. 780-785.
- [22] Delp, S. & Loan, P. 2000, 'A Computational Framework for Simulating and Analysing Human and Animal Movement', IEEE Transactions on Computing in Science and Engineering, vol. 2, no.5, pp. 46-55.
- [23] Glazier, P.S., Davids, K. & Bartlett, R.M. 2003. 'Dynamical systems theory: A relevant framework for performance-oriented sports biomechanics research'. Sportsmedicine, vol. 7, viewed 21 April, 2015, <<http://www.sportsci.org/jour/03/psg.htm>>.
- [24] Tekla, P. 1990, 'Biomechanically engineered athletes', IEEE Spectrum, vol. 27, no. 4, pp. 43-44.
- [25] Conley, R., Tulchin, K., Harris, G., Smith, P., Humm, J. & Hassani, S. 2000, 'Pediatric Sports Medicine: An evolution of Applications of Motion Analysis', Proceedings of Pediatric Gait, 2000. A new Millennium in Clinical Care and Motion Analysis Technology, Chicago, pp. 116-123.
- [26] Jobbagy, A., Komjathi, L., Furnee, E. & Harcos, P. 2000, 'Movement Analysis of Parkinsonians', Proceedings of 22nd Annual EMBS International Conference, Chicago, pp. 821-824.
- [27] Simon, S. & Johnson, K. 2000, 'Improving the Efficacy of Motion Analysis as a Clinical Tool through Artificial Intelligence Techniques', Pediatric Gait, 2000. A new Millennium in Clinical Care and Motion Analysis Technology, Chicago, pp. 23-29.

- [28] Hernandez-Rebollar, J., Kyriakopoulos, N. & Lindeman, W. 2004, 'A New Instrumented Approach For Translating American Sign Language Into Sound And Text', Proceedings of IEEE International Conference on Face and Gesture Recognition, Portugal, pp. 547- 552.
- [29] Redert, P. 2000, Multi-viewpoint systems for visual 3-D communication, PhD thesis, Delft Technical University, Delft.
- [30] Aggrwal, K. & Cai, Q. 1999, 'Human Motion Analysis: A Review', Proceedings of Nonrigid and Articulated Motion Workshop, San Juan, pp. 90-102.
- [31] Molina, L., Bandera, J., Marfil, R. & Sandoval, F. 2005, 'Real-time Human Motion Analysis for Human-Robot Interaction', Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1402 - 1407.
- [32] Optitrack, 'Optical Motion Capture System', viewed 16 May, 2015, <<http://www.optitrack.com/>>.
- [33] Zhang, L., Curless, B. & Seitz, S. 2002, 'Rapid Shape Acquisition Using Color Structured Light and Multi-pass Dynamic Programming', Proceedings of 1st International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, Padova, pp. 24-36.
- [34] Bachmann, E., McGhee, R., Yun, X. & Zyda, M. 2001, 'Inertial and Magnetic Posture Tracking for Inserting Humans Into Networked Virtual Enviroments', Proceedings of ACM Symposium on Virtual Reality Software & Technology, Alberta, pp. 9-16.
- [35] Sutherland, I. 1968, 'A Head-mounted Three-dimensional Display', Proceedings of Fall Joint Computer Conference, San Francisco, pp. 757-764.
- [36] Harada, T., Mori, T. & Sato, T. 2004, 'Human posture probability density estimation based on actual motion measurement and eigenpostures', Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 1595-1600.
- [37] Yun, X. & Bachmann, E. 2004, 'Design and Implementation of the MARG Human Body Motion Tracking System', Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, pp. 625-630.
- [38] Murphy, R. 2000, Introduction to AI Robotics, MIT Press, London.
- [39] Gross, M. 1997, 'Using Digital video For Motion Analysis', Proceedings of 27th Annual Conference Frontiers in Education, Pittsburgh, pp. 806.
- [40] Shafiq, M., Tumer, T. & Guler, C. 2001, 'Marker detection and trajectory generation algorithms for a multicamera based gait analysis system', Mechatronics, vol. 11, no. 4, pp. 409-437.
- [41] Thomas, J. & Jobbagy, Á. 2001, 'Processing of Grey-Scale Images in passive Marker-Based Motion Analysers', paper presented to Technical University of Budapest, Budapest.
- [42] Zhuang, Y., Zhu, Q. & Pan, Y. 2000, 'Hierarchical Model Based Human Motion Tracking', Proceedings of International Conference on Image Processing, Vancouver, pp. 86-89.

- [43] Kida, K., M. Ihara, M., Shiwa, S. & Ishibashi, S. 2000, 'Motion Tracking Method for the CAVETM System', Proceedings of 5th International Conference on Signal Processing, pp. 859 - 862.
- [44] Jobbagy, A., & Hamar, G. 2004, September. 'PAM: passive marker-based analyzer to test patients with neural diseases', Engineering in Medicine and Biology Society, 2004. IEMBS'04. 26th Annual International Conference of the IEEE (Vol. 2, pp. 4751-4754). IEEE.
- [45] Bogart, J. 2000, 'Motion Analysis Technologies', Proceedings of Pediatric Gait, 2000. A new Millennium in Clinical Care and Motion Analysis Technology, Chicago, pp. 166-172.
- [46] Fioretti, S., Leo, T., Pisani, E. & Corradini, L. 1990, 'A Computer Aided Movement Analysis System', IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 37, pp. 812-891.
- [47] Staples, J. A., & Davis, T. A. 2006, 'Motion capture for the masses'. INFOCOMP Journal of Computer Science, vol. 5, no. 2, pp. 18-24.
- [48] Clarke, A. & Wang, X. 1998, 'Extracting High precision information from CCD images', Proceedings of Optical methods and data processing for heat and fluid flow, London, pp. 311-320.
- [49] Kawano, T., Ban, Y. & Uehara, K. 2003, 'A Coded Visual Marker for Video Tracking System Based on Structured Image Analysis', Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Washington, pp. 262-263.
- [50] Tanie, H., Yamane, K. & Nakamura, Y. 2005, 'High Marker Density Motion Capture by Retroreflective Mesh Suit', Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, pp. 2884-2889.
- [51] Kang, J., Cohen, I. & Medoni, G. 2003, 'Continuous Tracking Within and Across Camera Streams', Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Wisconsin, pp. 267-272.
- [52] Kotsiantis, S., Kanellopoulos, D. & Pintelas, P. 2006, 'Data Preprocessing for Supervised Learning', International Journal of Computer Science, vol. 1, pp. 278-283.
- [53] Kurihara, K., Hoshino, S., Yamane, K. & Nakamura, Y. 2002, 'Optical Motion Capture System with Pan-Tilt Camera Tracking and Realtime Data Processing', Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation, Washington, pp. 1241- 1248.
- [54] Gutemberg, B. & Guerra-Filho, I. 2005, 'Optical Motion Capture: Theory and Implementation', Journal of Theoretical and Applied Informatics, vol.12, no. 2, pp. 61-89.
- [55] Chen, X., & Davis, J. 2008, 'An occlusion metric for selecting robust camera configurations', Machine Vision and Applications, vol. 19, no. 4, pp. 217-222.
- [56] Chen, X., & Davis, J. 2000), 'Camera placement considering occlusion for robust motion capture', Computer Graphics Laboratory, Stanford University, Tech. Rep, 2(2.2), 2.

- [57] Sung, W., Kang, E. & Choi, J. 1999, 'Adaptive Motion Estimation Technique for Motion Compensated Interframe Interpolation', *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 45, no. 3, pp. 753-761.
- [58] Gavrilu, D. 1996, *Vision based 3-D Tracking of Humans in Action*, PhD thesis, University of Maryland, Maryland.
- [59] Birnholtz, J., Ranjan, A. & Balakrishnan, R. 2007, 'Using motion tracking data to augment video recordings in experimental social science research', paper presented at the 3<sup>rd</sup> International Conference on e-Social Science, Ann Arbour, 8 October.
- [60] Tang, L., Wu, C., Tsui, H. & Liu, S. 2003, 'Algorithm for 3D reconstruction with both visible and missing data', *IEEE Electronic Letters*, vol. 39, no. 23, pp. 1640-1642.
- [61] Abche, A., Tzanakos, G. & Tzanakou, E. 1992, 'A New Method for Multimodal 3-D Image Registration with External Markers', *Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 14, Oct.-Nov., pp. 1881-1882.
- [62] Chvatal, Vasek, 1975, 'A combinatorial theorem in plane geometry', *Journal of Combinatorial Theory, Series B*, vol. 18, no. 1, pp. 39-41.
- [63] Lee, Der-Tsai and Lin, Arthur K, 1986, 'Computational complexity of art gallery problems', *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 32, no. 2, pp. 276-282.
- [64] O'rourke, Joseph, 1987, 'Art gallery theorems and algorithms', *The International Series of Monographs on Computer Science*, Oxford University Press Oxford, IEEE.
- [65] Wu, Yier, 2014, 'Optimal pose selection for the identification of geometric and elastostatic parameters of machining robots', *Ecole des Mines de Nantes*.
- [66] Mittal, Anurag and Davis, Larry S, 2008, 'A general method for sensor planning in multi-sensor systems: Extension to random occlusion', *International Journal of Computer Vision*, vol. 76, no. 1, pp. 31-52.
- [67] Piciarelli, Claudio and Micheloni, Christian and Foresti, Gian Luca, 2010, 'Occlusion-aware multiple camera reconfiguration', *Proceedings of the Fourth ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras*, ACM, pp. 88-94.
- [68] Horster, Eva and Lienhart, Rainer, 2009, 'the optimal placement of multiple visual sensors', *Proceedings of the 4th ACM international workshop on Video surveillance and sensor networks*, ACM, pp. 111-120.
- [69] Ercan, Ali O and Yang, Danny B and El Gamal, Abbas and Guibas, Leonidas J, 2006, 'Optimal placement and selection of camera network nodes for target localization', *Distributed computing in sensor systems*, Springer, pp. 389-404.
- [70] Yao, Yi and Chen, Chung-Hao and Abidi, Besma and Page, David and Koschan, Andreas and Abidi, Mongi, 2010, 'Can you see me now? Sensor positioning for automated and persistent surveillance', *Systems, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 40, no. 1, pp. 101-115.

- [71] Zhao, Jian and Cheung, SC and Nguyen, Thinh, 2009, 'optimal visual sensor Network configuration, Multi-camera networks: principles and applications', pp. 139–162.
- [72] Gonzalez-Barbosa, Jose-Joel and Garcia-Ramirez, Teresa and Salas, Joaquin and Hurtado-Ramos, Juan-Bautista and Rico-Jimenez, Jose-de-Jesus, 2009, 'Optimal camera placement for total coverage', Proceedings of the 2009 IEEE international conference on Robotics and Automation, IEEE Press, pp. 3672- 3676.
- [73] Ercan, Ali O and Yang, Danny B and El Gamal, Abbas and Guibas, Leonidas J, 2006, 'Optimal placement and selection of camera network nodes for target localization', Distributed computing in sensor systems, Springe, pp. 389-404.
- [74] Zhao, Jian and Cheung, Sen-Ching and Nguyen, Thinh, 2008, 'Optimal camera network configurations for visual tagging', Selected Topics in Signal Pro cessing, IEEE Journal of, vol. 2, no. 4, pp. 464-4792.
- [75] Al Hasan, Mohammad and Ramachandran, Krishna K and Mitchell , John E, 2008, Optimal placement of stereo sensors, Optimization Letters, vol. 2, no. 1, pp. 99-111.
- [76] Horster, Eva and Lienhart, Rainer, 2006, 'Calibrating and Optimizing Poses of Visual Sensors in Distributed Platforms', Multimedia systems, vol. 12, no 3, pp. 195–210.
- [77] Olague, Gustavo and Mohr, Roger, 2002, 'Optimal camera placement for accurate reconstruction', Pattern Recognition, vol. 35, no. 4, pp 927-944.
- [78] Katz, Itai and Agha jan, Hamid and Haymaker, John, 2010, 'A Process for Sensor Configuration in Multi-Camera Networks', Electrical engineering, ICDSC, 10.
- [79] Morsly, Yacine and Aouf, Nabil and Djouadi, Mohand Said and Richardson, Mark, 2012, 'Particle swarm optimization inspired probability algorithm for optimal camera network placement', Sensors Journal, IEEE, vol. 12, no. 5, pp. 1402-1412.
- [80] Chen, Xing and Davis, James, 2008, 'An occlusion metric for selecting robust camera configurations', Machine Vision and Applications, vol. 19, no. 4, pp. 217–222.
- [81] Indu, S and Chaudhury, Santanu and Mittal, Nikhil R and Bhattacharyya, Asok, 2009, 'Optimal sensor placement for surveil lance of large spaces', Distributed Smart Cameras, 2009. ICDSC 2009. Third ACM/IEEE International Conference on, pp. 217–222.
- [82] D. Maddalena and G. Snowdon. 1997, 'Applications of genetic algorithms to drug design'. In Expert Opinion on Therapeutic Patents, pp. 247–254.
- [83] E. P. K. Tsang and J. Li., 2000, 'Combining ordinal financial predictions with genetic programming', In Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning, pp. 532–537.
- [84] H. Furuta, K. Maeda, and E. Watanabe, 1995, 'Application of genetic algorithm to aesthetic design of bridge structures', Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 10, no. 6, pp. 415–421.
- [85] S. Luke. Essentials of Metaheuristics, 2009, available at <<http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/>>.



- [86] Chen, SY and Li, YF, 2004, 'Automatic Sensor Placement for Model -Base d Robot Vision', Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on, vol. 34, no. 1, pp. 1393-408.
- [87] Zhang, Zhengyou, 2004, 'Camera calibration with one dimensional objects', Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, vol. 26, no. 7, pp. 892–899.
- [88] Malik, Rahul and Bajcsy, Peter, 2008, 'Automated Placement of Multiple Stereo Cameras', the 8th Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-classical Cameras-OMNIVIS.
- [89] Mitchell, Melanie, 1998, 'An Introduction to Ge ne tic Algorithms (Complex Adaptive Systems) ', A Bradford Book.
- [90] Xu, ZB and Zhang, JS and Zhang, YL, 2003, 'Bionics in Computational Intelligence: Theory and Algorithm, Beijing: Science Press'.
- [91] Kita, Hajime, 2001, 'A comparison study of self-adaptation in evolution strategies and real-coded genetic algorithms', Evolutionary Computation, MIT Press, vol. 9, no. 2, pp. 223–241.
- [92] Angeline, Peter J, 1995, 'Adaptive and self-adaptive evolutionary computations', Computational intelligence: a dynamic systems perspective, Citesee.
- [93] Srinivas, Mandavilli and Patnaik, Lalit M, 2010, 'Computer vision: algorithms and applications', Springer Science & Business Media.
- [94] Chen, Xing and Davis, James, 1994, 'Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms', Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, vol. 24, no. 4, pp. 656–667.
- [95] Bao, Suying and Jiang, Rui and Kwan, WingKeung and Wang, BinBin and Ma, Xu and Song, You-Qiang, 2011, 'Evaluation of next-generation sequencing software in mapping and assembly', Journal of human genetics, vol. 56, no. 6, pp. 406–414.
- [96] Goldberg, D.E. and Holland, J.H., 1988, 'Genetic algorithms and machine learning', Springer, vol. 3, no. 2, pp. 95-99.
- [97] Aissaoui, A., Baarir, Z., Ouafi, A., Pudlo, P., Taleb-Ahmed, A., Gillet, C., & Deraz, F. (2014). Optimisation technique of camera placement for motion capture simulations. Computer methods in biomechanics and biomedical engineering, 17(sup1), 122-123.
- [98] Azeddine Aissaoui, Zine-Eddine Baarir, Abdelkrim Ouafi, Philippe Pudlo, Abdelmalik Taleb-ahmed, Christophe Gillet, Foued Derraz, «Evaluating and optimizing multi-camera network positioning for motion capture tasks », First International Conference on Electrical Engineering ICEEB'14, Biskra, 07-08 December, 2014.