

# Un système de prise de vue panoramique bas-coût pour la réalité virtuelle

Romain Rabier, Roland Brémond et Jean-Michel Auberlet

Université Paris Est, LEPSIS, INRETS-LCPC

---

## Abstract

*Un système d'acquisition vidéo panoramique a été développé en vue d'une projection dans une salle de Réalité Virtuelle, avec un angle de vision horizontal de 162°. Bien que la projection de vidéos ne permette pas l'interactivité, elle permet dans certains cas une meilleure immersion des sujets, que ce soit du point de vue du visuel et des comportements des entités présentes dans la scène. Ce dispositif doit être utilisé prochainement pour analyser, dans une expérimentation en Réalité Virtuelle, le comportement de piétons en situation de traversée, ce qui doit contribuer à améliorer le comportement de piétons virtuels.*



*A panoramic video acquisition system was developed in order to display the videos in a Virtual Reality center, over a horizontal angle of 162°. Although the configuration misses interactivity, it allows to manipulate ecological situations in Virtual Reality, in terms of visual appearance and in terms of pedestrian and driver's behavior. The next step will be to improve the pedestrian behavioral models for Virtual Reality applications.*

---

## 1. Introduction

La réalité virtuelle utilise des mondes virtuels pour créer des situations immersives. Les joueurs, spectateurs ou sujets expérimentaux sont plongés dans ces mondes virtuels, et l'environnement visuel n'est finalement qu'un artifice destiné à immerger l'utilisateur, à lui donner ce que les psychologues appellent le sentiment de « présence ».

Les images de synthèse sont une des techniques privilégiées pour créer des environnements visuels réalistes sur le plan perceptif, avec la contrainte du temps réel qui est de plus en plus accessible avec l'évolution des technologies (notamment des GPU) et des outils logiciels (e.g. *shaders*, CUDA). Mais le réalisme et le sentiment d'immersion sont

également liés à la modélisation des scènes, et dans un environnement dynamique, à la modélisation du comportement des entités virtuelles.

A ce jour, le comportement des piétons est principalement modélisé, pour la réalité virtuelle, de deux points de vue : l'animation (par exemple à partir des techniques de *motion capture*) (e.g. [MGPB07, MKHKar]), et le comportement. Ce dernier point a surtout été étudié dans des situations de foules : évacuation de stade, hall de gare, métro, etc. [HM95, HB04, Tek06, PPD07]. On trouvera un état de l'art sur ces questions dans [TRM07]. Une des limites des modèles comportementaux actuels porte sur les interactions entre différents types d'agents. En particulier, à ce jour,

les déplacements piétons en ville sont très loin du réalisme comportemental, le point noir étant la traversée de rue, qui implique des interactions fortes entre piétons et automobilistes [TAB08, PYG09].

La pauvreté des modèles actuels tient notamment à la pauvreté de leurs fondements psychologiques [TAB08] aux niveaux *perception* et *décision* de la boucle perception-décision-action en psychologie cognitive. En vue de remédier partiellement à ce problème, le Projet SICAP (projet financé par la *Fondation Sécurité Routière* [FSR]) vise notamment à étudier, dans une situation de réalité virtuelle, la traversée de rue par les piétons. La finalité du Projet est d'améliorer le réalisme comportemental de piétons virtuels en situation de traversée de rue. Pour cela, nous avons fait le choix de placer des sujets expérimentaux en situation d'immersion dans une salle de Réalité Virtuelle, afin de mieux observer leur comportement en tant que piétons.

Dans le cadre de ce projet, nous utilisons une salle de réalité virtuelle utilisant 6 écrans verticaux rétro-éclairés par des vidéo-projecteurs HD, ce qui permet au « piéton » d'avoir un champ de vision complet (Cf. Fig. 1).



**Figure 1:** Salle de réalité virtuelle 6 écrans HD verticaux au LEPSIS, ici en configuration « simulateur de conduite automobile ».

Une originalité de la démarche que nous proposons est que l'utilisation d'une scène virtuelle au sens classique des images de synthèse n'a pas été retenue. En effet, le comportement des véhicules et des piétons n'aurait pas été suffisamment réalistes pour un spectateur immergé en situation de piéton du fait des lacunes mentionnées ci-dessus concernant les modèles de simulation actuels de comportement.

Nous présentons ci-dessous une solution alternative basée sur une projection vidéo panoramique, qui nous a conduit à concevoir un système adapté d'une technique (la Polyvision) déjà utilisée par Abel Gance en 1927 pour son film *Napoléon*. Nous avons pu développer ce système d'acquisition en restant dans des limites budgétaires qui en font un système

« bas-coût », par rapport aux systèmes panoramiques existants en cinéma spectacle.

Une spécificité du Projet nous a permis d'envisager cette solution : la mise en situation des « piétons » en Réalité Virtuelle vise à la meilleure immersion possible, mais sans être nécessairement interactif, au sens où les actions qui sont demandées à ces « piétons » ne modifient pas la scène virtuelle (ils doivent indiquer avec un *gamepad* si la situation à l'écran leur permet de traverser la rue ou non). De ce fait l'utilisation de la vidéo était possible, puisque la position dans la scène des caméras est prévisible : en l'occurrence, elle est fixe. Nous avons considéré que les avantages de la projection vidéo (réalisme des images et surtout des comportements) étaient supérieurs à ses inconvénients (pas d'interactivité, contrôle limité sur les situations rencontrées) pour notre application, par rapport aux avantages et inconvénients des images de synthèse.

La suite du document est organisée de la manière suivante. La section 2 décrit l'approche retenue, qui ré-actualise un très ancien procédé de cinéma spectacle. La section 3 décrit plus précisément le système d'acquisition réalisé, et détaille les conditions de prise de vue. Les sections 4 et 5 décrivent les traitements en post-production et la projection dans une salle de réalité virtuelle telle que nous l'avons réalisée. La section 6 présente des résultats dans le cas d'une application spécifique pour un Projet en cours (Projet SICAP), enfin la section 7 propose des perspectives d'application et d'évolution du dispositif proposé.

## 2. Approche proposée

La solution que nous avons retenue pour effectuer la prise de vue consiste à associer 3 caméras en batterie. La focale la plus courte d'une caméra numérique standard 16/9 étant de 4 mm pour un capteur d'un tiers de pouce, couvrant un angle de champ horizontal de l'ordre de  $60^\circ$ , l'association de 3 caméras nous permet *a priori* de couvrir un angle de l'ordre de  $180^\circ$ , supérieur aux  $150^\circ$  de la vision humaine.

Pour obtenir une qualité de projection satisfaisante, nous avons opté pour des caméras de poing au format HD 1080i avec une compression HDV, ce qui représente un budget relativement limité si on considère l'application visée (notre système d'acquisition complet a un coût inférieur à 15 000 euros).

La configuration idéale pour la visualisation des images est l'écran semi-cylindrique, au moins du point de vue de la continuité spatiale (avec toutefois une perte de précision due à la focalisation des projecteurs sur le plan image). Le choix que nous avons fait a été d'utiliser une salle de Réalité Virtuelle modulaire développée au LEPSIS (Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations, UMR INRETS-LCPC créée en 2009). La configuration retenue est constituée de 6 écrans plans de  $1,90 \times 2,55$  mètres, positionnés verticalement avec un angle de  $36^\circ$  entre eux (Cf. Fig.

1). Six rétroprojecteurs de  $1400 \times 1050$  pixels « flippés » verticalement projettent chacun une partie de l'image totale sur un des écrans (Fig. 4, à gauche). L'image visualisée atteint donc la résolution de  $6300 \times 1400$  pixels (plus du triple de la haute définition) pour un angle de champ horizontal de  $180^\circ$ .

Pour plus de flexibilité au stockage et à la projection, c'est-à-dire pour pouvoir projeter nos images dans des salles de projection conçues différemment, nous avons opté pour la création en post-production d'une séquence vidéo unique baptisée « bandeau numérique », créée à partir des 3 séquences issues de la prise de vue. Ce bandeau peut être projeté sur un nombre indifférent d'écran.

À noter qu'il existe des systèmes de prise de vue panoramique ou *ultra-wide* utilisant une seule caméra, soit filmant à travers un miroir sphérique, soit utilisant un objectif *fish-eye*. Néanmoins la restitution de ces dispositifs dans une salle de Réalité Virtuelle n'est pas crédible au niveau de la perception de l'espace, compte tenu des déformations et autres aberrations sphériques qu'ils impliquent. Ces aberrations peuvent être en partie corrigées par traitement d'images, mais la faible résolution des objectifs *fish-eye* sur les bords de l'image implique une interpolation qui dégrade la qualité finale. Cette solution n'a donc pas été retenue.

Historiquement, le système que nous proposons est plutôt inspiré du procédé de cinéma spectacle « Cinérama » inventé dans les années 1950. Ce système utilisait 3 caméras pellicules en vertical et en arc de cercle pour filmer un champ de  $150^\circ$ . Les 3 films obtenus étaient projetés simultanément sur un écran courbe au format 2,25/1. Ce procédé, connaissant lui-même comme ancêtre le « Polyvision » d'Abel Gance, a été peu à peu remplacé par le Cinémascope anamorphique qui diffuse le même format à l'aide d'une unique caméra et d'un seul projecteur (e.g. caméra Panavision *Genesis*). Cette dernière technique présentait toutefois dans notre cas un problème de coût, ce qui nous a conduit à proposer une solution technique *low cost*.

Notre système transpose donc le procédé « Cinérama » à l'ère du numérique en l'étendant sur un champ horizontal de  $162^\circ$  et avec un ratio (proche de 4/1) plus large. La résolution avoisine les 6 millions de pixels, et surtout le support de projection est indifférent, puisqu'un unique fichier « bandeau numérique » peut *a priori* être diffusé sur n'importe quel dispositif de visualisation.

### 3. Conception du système

Nous décrivons dans cette section les choix techniques qui ont été fait pour réaliser le système de prise de vue panoramique, au niveau du matériel et au niveau du montage.

Nous avons retenu des caméras *Canon XHAs* qui utilisent le format de compression semi-professionnel HDV. Elles fournissent une image de taille HD 16/9 ( $1920 \times 1080$ ) entrelacé, compressé au format mpeg-2 *long GOP*. Une

gamme de caméra supérieure avec l'option *Genlock* (synchronisation des caméras entre elles par un système d'asservissement du code temporel) ou un synchronisateur externe auraient permis d'éviter des problèmes de raccord que nous décrivons section 7.

Ces caméras ont une focale maximum  $f_{max}$  de 4,5mm et offrent donc un angle de champ horizontal  $\alpha_H = 60,3^\circ$  et un angle de champ vertical de  $44^\circ$  :

$$\alpha_H = 2 \arctan\left(\frac{L}{2f_{max}}\right) \quad (1)$$

avec  $L$  la largeur du capteur, ici 1/3 pouce.

Pour éviter au maximum les problèmes de parallaxe (rupture de perspective trop importante entre deux caméras) et la disparition d'objets passant du champ d'une caméra à l'autre, les caméras doivent être disposées non pas en étoile mais en arc de cercle, les lentilles des caméras étant positionnées le plus près possible l'une de l'autre. La caméra située à droite du système et filmant la partie gauche de la scène est nommée **A**, celle du centre filmant en face est nommée **B**, celle de gauche, filmant à droite est nommée **C** (Cf. Fig. 2).



**Figure 2:** Montage des caméras en batterie pour la prise de vue panoramique.

L'inconvénient de ce positionnement est que l'angle de champ n'est pas accessible, puisque les caméras **A** et **C** se regardent et se filment. Nous avons ainsi dû sacrifier une partie de l'image panoramique : la caméra **A** apparaît sur l'image de la caméra **C** et réciproquement. Les images des caméras **A** et **C** ne sont donc pas utilisées dans leur format maximum 16/9, mais au format 14/9. Une partie de l'image centrale est également utilisée pour effectuer les recouvrements à la post-production, elle est utilisée au format 15/9. Notre image à la prise de vue est donc au format 43/9 et sa taille est de  $5160 \times 1080$  pixels. Son angle de champ horizontal est finalement de  $162^\circ$ , supérieur au champ visuel humain, qui est de l'ordre de  $150^\circ$ . Toutefois, cette solution est nettement

supérieure à la solution « en étoile » au niveau de la jonction entre les caméras, ce qui nous a conduit à la préférer malgré la perte de champ horizontale.

Une autre méthode, plus complexe à mettre en œuvre, permet de filmer à 180° en réduisant encore les problèmes de parallaxe : 3 caméras parallèles et dirigées vers le haut avec un système de 3 miroirs positionnées à 45°. Ce dispositif est notamment utilisé pour le cinéma 360° [Tot], mais implique un budget complètement différent. Ce point est important car notre approche visait à trouver une solution technique bas-coût.

Pour réaliser un système d'accroche des trois caméras sur un trépied unique, nous avons opté pour un tube fixé par une rotule sur le trépied, sur lequel coulisent trois autres rotules qui supportent chacune une tête caméra (Fig. 3). Ce système, modulable, permet plusieurs dimensions de déplacement : écartement des caméras (pour pouvoir utiliser d'autres modèles de caméra), pivotement de chaque caméra autour de son point nodal, avancée et recul par rapport à son axe, possibilité de « piquer » chaque caméra indépendamment des autres ou collectivement. Ce système a l'avantage d'être léger, compact et maniable.



Figure 3: Machinerie pour la prise de vue panoramique.

Compte tenu des dimensions des caméras, le positionnement optimal des caméras, à 60° l'une de l'autre, est un écartement de 22cm entre les centres des caméras et un recul de 6cm de la caméra centrale **B**.

Pour que l'image finale soit homogène, il faut évidemment que les réglages des caméras soient identiques. Nous avons retenu le format d'enregistrement HD 1080/50i (HDV entrelacé). L'entrelacé permet d'obtenir une image moins dégradée, avec une netteté supérieure au progressif. Un passage au format progressif est effectué en post-production (Cf. section 4).

La synchronisation entre les caméras est réalisée avec un « clap » à quelques centimètres des lentilles des caméras, afin qu'il soit vu par les trois caméras. L'utilisation d'un casque audio et des potentiomètres permet de régler le volume audio des micros caméras afin d'éviter les pics de saturation. Le réglage automatique du son est à éviter car il dénature la dynamique sonore de l'espace enregistré.

#### 4. Post-production

Le bandeau panoramique est réalisé à partir des 3 vidéos issues de la prise de vue à l'aide d'un logiciel de montage. Une des limites rencontrées est que ces logiciels (du type *Final Cut*, *Avid* ou *Adobe Premiere*) ont comme résolution maximum la résolution des caméras HD les plus puissantes du marché qui enregistrent en 4K. Or notre image panoramique, résultat de la fusion de trois images HD, mesure 5160×1080 pixels. De ce fait, le plus grand format de séquence que nous avons pu créer est de 4000×850 pixels.

Pour chaque prise de vue, les quatre coins des images peuvent être déplacés pour récupérer les déformations optiques et faire correspondre chaque point à l'infini entre deux images. Des corrections colorimétriques et d'exposition peuvent également être nécessaires entre les caméras.

La prise de vue produit 6 pistes son (deux par caméra). Elles peuvent être organisées de deux manières dans la *timeline*, soit pour une sortie *Dolby 5.1* (**B1**, **A1**, **C1**, **A2**, **C2**, **B2**) soit pour une sortie stéréo simple pour laquelle on ne garde que deux pistes : une venant de la caméra **A** pour les sons venant de droite, l'autre de la caméra **C** pour les sons venant de gauche.

Une fois que les transitions entre caméras sont correctes et que les objets se déplacent de manière fluide, les séquences peuvent être exportées. Nous avons utilisé le codec H264 qui permet une bonne qualité d'image pour une taille de fichier raisonnable. C'est notamment la norme utilisée par les DVD *Blu-Ray* HD.

Les réglages des caractéristiques vidéo de l'export dépendent de la capacité de l'ordinateur de projection à lire le fichier exporté. Si l'ordinateur est assez puissant, la qualité de la compression peut-être augmentée en encodant en passes multiples, en augmentant le débit ou en augmentant le nombre d'images clé. Avec les paramètres choisis, une vidéo d'une minute pèse environ 1Go.

## 5. Projection pour la Réalité Virtuelle

Le bandeau numérique, image panoramique sous forme d'un fichier vidéo unique, peut maintenant être projeté sur un nombre quelconque d'écrans, moyennant une configuration informatique adaptée. Dans le cadre de notre recherche, nous avons utilisé 6 vidéoprojecteurs HD couplés à 6 écrans, positionnés verticalement et recouvrant 180° de champ visuel. Pour cela, nous avons adapté un PC pour réaliser cette projection en temps réel.



**Figure 4 :** Salle de réalité virtuelle du LEPSIS. A gauche : vidéo-projecteur HD utilisé en rétro-projection. A droite : poste de contrôle, avec 6 écrans LCD « flippés » verticalement.

Le PC utilisé était sous Windows XP, avec 3 Go de Ram et un processeur Intel Core Duo 3GHz. La difficulté consistait à trouver des cartes graphiques capables d'afficher une image sur 6 écrans positionnés verticalement. Deux cartes *Matrox M9140* couplées nous ont permis de mettre en œuvre un tel affichage. Chaque carte comporte 4 sorties vidéos, il est donc possible de piloter jusqu'à 8 écrans HD depuis ce poste de travail. Le logiciel *Matrox Powerdesk* fourni avec les cartes permet d'afficher un bureau étendu avec les 6 écrans « flipés » verticalement (Cf. Fig. 1 et 4, à droite).

L'alternative classique aurait consisté à utiliser deux PC synchronisés, projetant chacun une moitié du bandeau numérique avec un tripleur. Outre son coût et sa complexité, cette solution est également moins « portable » que celle que nous avons retenue, si l'on envisage de l'utiliser dans une autre salle de Réalité Virtuelle (projet envisagé avec le LA-MIH, à l'Univ. Valenciennes).

Les vidéo-projecteurs sont raccordés au PC par des câbles analogiques VGA, moins sensibles aux retards dus aux longueurs de câble que les câbles numériques DVI. Bien entendu, une conversion analogique/numérique s'effectue en entrée et en sortie de câble, provoquant une légère perte de qualité en projection.

Les vidéoprojecteurs utilisés ont une résolution de 1400×1050 pixels. L'image projetée sur les 6 écrans verticaux mesure donc 6300×1400 pixels, à comparer aux 4000×850 de notre bandeau numérique. Il faut dès lors utiliser un logiciel de lecture assez performant qui permette

d'étirer le bandeau numérique en mode « plein écran » sans provoquer de saccade. VLC, par exemple, fonctionne très bien [Vid].

Un système de sonorisation *Dolby 5.1* équipe la salle de projection : un caisson de basse et une enceinte sont situés au centre du dispositif, deux enceintes arrières sont situées aux extrémités, et deux enceintes, gauche et droite, sont situées à mi-distance.

## 6. Résultats

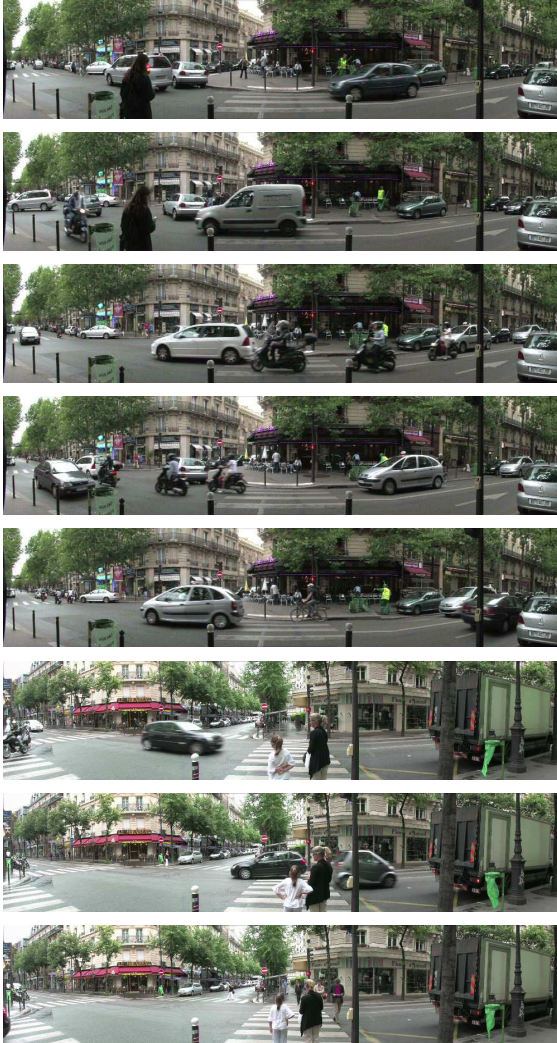
Le dispositif proposé ci-dessus, couplant acquisition vidéo et projection en Réalité Virtuelle, est utilisé dans le cadre d'une expérimentation sur le comportement des piétons en situation de traversée de rue (Projet SICAP).

Pour les besoins de cette expérimentation, trois carrefours urbains ont été filmés dans Paris (exemples Fig. 5). Ils ont été en partie choisis en fonction des contraintes liées à l'immersion des sujets expérimentaux dans le dispositif de Réalité Virtuelle : ce sont des carrefours avec une voie à double sens (à gauche et à droite) et une voie à sens unique, avec les véhicules arrivant de face (par rapport au positionnement du système d'acquisition). Les caméras sont ainsi disposées de façon à ce qu'aucun véhicule ne surgisse « par derrière », ce qui aurait souligné une des limites de la salle de RV, à savoir que la projection est sur 180° et non pas 360°. De plus, nous avons choisi des carrefours dont la voie principale, légèrement coudée, permettait d'avoir une bonne visibilité des deux côtés malgré la limite des 162° lors de l'acquisition.

Les prises de vue ont été effectuées à des horaires d'affluence, entre 8h et 9h, entre 12h et 13h et entre 17h30 et 18h30, avec une présence simultanée de piétons et de véhicules. Une cinquantaine de clips (inférieurs à une minute chacun) ont été sélectionnés et extraits pour les besoins de l'expérimentation.

Le dispositif de Réalité Virtuelle utilisé a pour but de recréer le champ de vision d'un piéton sur le point d'effectuer une traversée de rue. Nous avons donc recherché pour la prise de vue le positionnement simulant au mieux cette position. La caméra centrale **B** était ainsi située face à un passage piéton (Fig. 6). La hauteur des caméras découlait de la hauteur des vidéo-projecteurs dans la salle de Réalité Virtuelle, à 1,30m du sol et 3m des écrans. Nous avons opté pour une position de caméra à 1,55m du sol et piquée de 3° pour compenser la différence de hauteur. Le cadrage retenu correspond au point de vue d'un individu de 1,60 à 1,70m. A noter que pour une voiture, la hauteur des projecteurs à 1,30m est plus proche de la réalité, et qu'il n'y aurait pas besoin de « piqué ».

La distance au trottoir découle de ce cadrage. En effet, le dispositif commence à filmer le sol à une distance de 3,20m. Pour les besoins de l'expérimentation, nous avons placé le système d'acquisition panoramique à 2m du bord du trottoir



**Figure 5:** Bandeaux numériques 4000×850 pour une projection panoramique en réalité virtuelle. A noter que la projection ne se fait pas sur un écran plan mais sur 6 écrans faisant un angle de 36° les uns avec les autres, ce qui modifie l'apparence visuelle par rapport à la présentation imprimée.

pour que seule la fin de la première bande de passage piéton apparaisse à l'image.

Pour que l'immersion du spectateur soit bonne, il est nécessaire que celui-ci se place à la distance à laquelle les caméras se situaient dans l'espace filmé. Le bas de l'image projetée correspondant au sol, le spectateur doit se tenir à 3,20m des écrans.

Les problèmes de parallaxe apparaissent quand un objet se déplaçant du champ d'une caméra vers une autre passe trop près du dispositif et risque d'apparaître simultanément dans le champ de deux caméras au même instant. Il était donc im-



**Figure 6:** prise de vue panoramique en carrefour urbain.

portant de déterminer un seuil critique en deça duquel deux images ne peuvent plus être recollées. Les réglages utilisés lors des prises de vue étaient adaptés à une prise de vue en extérieur, avec une fluidité correcte d'une caméra à l'autre pour des objets mobiles à partir de 1,50m des caméras. Toutefois le dispositif peut être adapté pour des scènes d'intérieur avec des réglages différents (nous l'avons testé).

Dans le cadre du Projet, l'expérimentation proprement dite doit débuter début 2010 et contribuer à l'amélioration des modèles de comportement piéton en situation de traversée. Dans un second temps, un modèle de déplacement piéton intégrant ces avancées doit être implémenté dans un Système Multi-Agent [Fer95], et disponible pour des plateformes de réalité virtuelle traitant de situations de déplacements urbains.

## 7. Discussion

Le cinéma panoramique existe depuis près d'un siècle (notamment sur des sites de cinéma spectacle comme le Futuroscope de Poitiers), et des entreprises spécialisées proposent des procédés panoramiques performants sur le marché. Son utilisation pour la Réalité Virtuelle est plus originale. Sans chercher à reproduire la qualité de ces dispositifs, notre système a été conçu autour de trois exigences qui fondent sa spécificité : modularité, légèreté et économie. La technique proposée peut être vue comme le détournement d'un dispositif originaire du monde du spectacle, transposé pour la réalité virtuelle.

Une des difficultés techniques consiste à raccorder en même temps des objets situés loin du dispositif et d'autres beaucoup plus proches. Des situations de prise de vue dans lesquelles la distance à laquelle se trouvent les objets mobiles serait mieux connue rendraient cet aspect plus aisé à mettre en oeuvre.

L'utilisation du « clap » a permis de synchroniser les ca-

méras à l'image près, c'est-à-dire au 50<sup>e</sup> de seconde près. Un décalage inférieur au 50<sup>e</sup> de seconde peut toutefois apparaître entre deux caméras, ce qui introduit un léger décalage à la jonction entre deux images : un objet rapide arrive trop tôt dans une image, provoquant un léger dédoublement, ou trop tard dans l'autre, provoquant une brève disparition. L'utilisation d'une fonction *Genlock* ou d'un système d'asservissement externe pourrait résoudre le problème, les obturateurs des caméras étant dès lors parfaitement synchronisés.

Une autre limite de ce travail est que la focale utilisée à la prise de vue est plus large que celle équivalente à l'œil humain. Le champ couvert est sensiblement le même, mais la perspective entre les objets est différente : un objet loin va paraître plus petit qu'à l'œil humain, et inversement un objet proche va paraître plus grand.

Une évolution de l'angle de champ à la prise de vue paraît assez complexe. L'ajout d'une quatrième caméra, en positionnant les caméras cette fois-ci en étoile, augmenterait certes l'angle de champ à plus de 200°. Mais comme nous l'avons souligné, les objets mouvants proches du dispositif risqueraient de disparaître du champ aux raccords, une distance de sécurité de l'ordre de 3m devenant nécessaire. Le passage à la prise de vue 360° demanderait quand à lui l'usage d'un système de miroirs plus précis, et délicat à réaliser.

Une des perspectives est également de faire sauter la limite des 4000 pixels que nous avons actuellement pour la projection, et il est probable que l'évolution des capteurs (donc des logiciels de montage) le permette à terme. On peut également envisager d'exporter deux vidéos inférieures à 4000 pixels de large, et projetées de manière synchronisée, mais cela ferait perdre une partie du bénéfice de notre approche, basée sur une simplicité de mise en oeuvre.

D'autres usages et évolution paraissent envisageables. Le dispositif pourrait être utilisé en dynamique, soit accroché à un *steadycam* pour simuler la vision d'un individu se déplaçant, soit accroché à un véhicule pour simuler la vision d'un conducteur automobile (e.g. [GBB\*08]). On peut aussi imaginer un système couplant le cinéma panoramique et le cinéma relief pour l'obtention un système d'immersion panoramique 3D : une Géode *low cost*.

## Remerciements

Cette étude a été financée par la Fondation Sécurité Routière, à travers le Projet SICAP. Les auteurs remercient A. Tom, F. Vienne, M.-A. Granié, L. Désiré, M. Maestracci et V. Bodard pour leur collaboration.

## References

[Fer95] FERBER J. : *Les systèmes multi-agents*. InterEditions, 1995.

[FSR] FSR : Fondation sécurité routière. <http://fondation-securite-routiere.org/>.

[GBB\*08] GIANNOPULU I., BERTIN R., BRÉMOND R., ESPIÉ S., KAPOULA Z. : Visuomotor strategies using driving simulators in virtual and pre-recorded environment. *Advances in Transportation Studies 14* (2008), 49–56.

[HB04] HOOGENDOORN S., BOVY P. : Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research Part B 38* (2004), 169–190.

[HM95] HELBING D., MOLNÁR P. : Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review Part E 51* (1995), 4282–4286.

[MGPB07] MICHOD B., GUILLOU E., PULIDO H. B., BOUAKAZ S. : Real-Time Marker-free Motion Capture from multiple cameras. In *Proceedings of ICCV : IEEE International Conference on Computer Vision* (2007).

[MKHKar] MULTON F., KULPA R., HOYET L., KOMURA T. : Interactive animation of virtual humans based on motion capture data. *Computer Animation and Virtual Worlds* ((to appear)).

[PPD07] PARIS S., PETTRÉ J., DONIKIAN S. : Pedestrian reactive navigation for crowds simulations : a predictive approach. In *Proceedings of Eurographics* (2007).

[PYG09] PAPADIMITRIOU E., YANNIS G., GOLIAS J. : A critical assessment of pedestrian behaviour models. *Transportation Research Part F 12*, 3 (2009), 242–255.

[TAB08] TOM A., AUBERLET J.-M., BRÉMOND R. : Approche psychologique de l'activité de traversée des piétons. Implications pour la simulation. *Recherche Transports Sécurité*, 101 (2008), 265–279.

[Tek06] TEKNOMO K. : Application of microscopic pedestrian model. *Transportation Research Part F 9* (2006), 15–27.

[Tot] TOTAVISION : <http://www.totavision.fr/>.

[TRM07] THALMANN D., RAUPP MUSSE S. : *Crowd Simulation*. Springer Computer Science, 2007.

[Vid] VIDEOLAN : Ecole Centrale Paris. <http://www.videolan.org/vlc/>.