

Thèse de Doctorat en Informatique

Étude radiométrique d'un système de projection immersive grand-public
pour des applications de réalité mixte

Julien DEHOS

Université du Littoral Côte d'Opale
École Doctorale régionale Sciences Pour l'Ingénieur Lille Nord-de-France

2 décembre 2010, Clermont-Ferrand

Contexte de la thèse

Intitulé



systemes catadioptriques de projection
panoramique pour la realite mixte

Intitulé



systèmes catadioptriques de projection panoramique pour la réalité mixte

Projet

- Agence Nationale pour la Recherche
- coordination : Laurent Sarry
- dates : du 01/01/2007 au 31/08/2010



Intitulé



systèmes catadioptriques de projection panoramique pour la réalité mixte

Projet

- Agence Nationale pour la Recherche
- coordination : Laurent Sarry
- dates : du 01/01/2007 au 31/08/2010



Partenaires publics

- Université d'Auvergne
- Université du Littoral Côte d'Opale
- Université Pierre et Marie Curie

Intitulé



systèmes catadioptriques de projection panoramique pour la réalité mixte

Projet

- Agence Nationale pour la Recherche
- coordination : Laurent Sarry
- dates : du 01/01/2007 au 31/08/2010



Partenaires publics

- Université d'Auvergne
- Université du Littoral Côte d'Opale
- Université Pierre et Marie Curie

Partenaires industriels

- Scrome
- Allegorithmic

Principe (1)

- projection immersive + camera
- utilisation facile
- faible coût
- stéréo-vision, capture de position

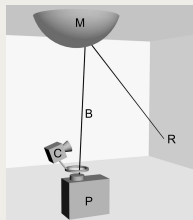


schéma de principe

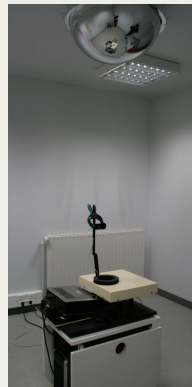
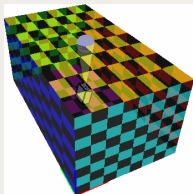


photo du prototype

Principe (2)



scène voulue

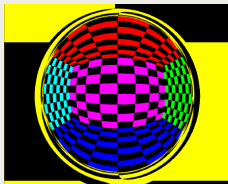
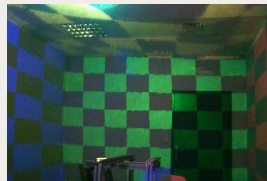


image à projeter



résultat de la projection

Applications (1)

- simulateurs
- prototypage
- bureaux virtuels
- jeux video
- ...



ambiance virtuelle

Applications (2)



aménagement d'intérieur



jeu vidéo

Casques de réalité virtuelle (HMD)



- avantages :
 - mise en oeuvre
 - prix (\$1000)
- inconvénients :
 - champ de vue restreint
 - déconnexion de soi-même

Casques de réalité virtuelle (HMD)



- avantages :
 - mise en oeuvre
 - prix (\$1000)
- inconvénients :
 - champ de vue restreint
 - déconnexion de soi-même

Salles immersives (CAVE)



- avantages :
 - qualité de l'immersion
- inconvénients :
 - prix (\$1M)
 - mise en oeuvre

mettre au point un prototype fonctionnel

mettre au point un prototype fonctionnel

Sous-projet 1 : matériel et calibrage géométrique

- systèmes de projection catadioptriques
- acquisition panoramique
- calibrage et reconstruction géométriques



système mono-projecteur



système multi-projecteur

mettre au point un prototype fonctionnel

Sous-projet 2 : édition de contenu

- environnement d'édition
- interaction
- applications

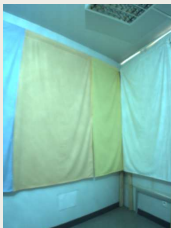


édition de panorama

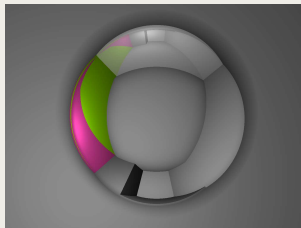
mettre au point un prototype fonctionnel

Sous-projet 3 : radiométrie

- calibrage radiométrique
- simulation d'éclairage



correction caméra



simulation d'éclairage

Contexte

- projet Catopsys, sous-projet 3
- Université du Littoral Côte d'Opale
- Laboratoire d'Informatique du Littoral
- IUT Le Puy-en-Velay
- directeur : Christophe Renaud (LIL)
- co-directeur : Éric Zeghers (LAIC)



Contexte

- projet Catopsys, sous-projet 3
- Université du Littoral Côte d'Opale
- Laboratoire d'Informatique du Littoral
- IUT Le Puy-en-Velay
- directeur : Christophe Renaud (LIL)
- co-directeur : Éric Zeghers (LAIC)



Collaborations

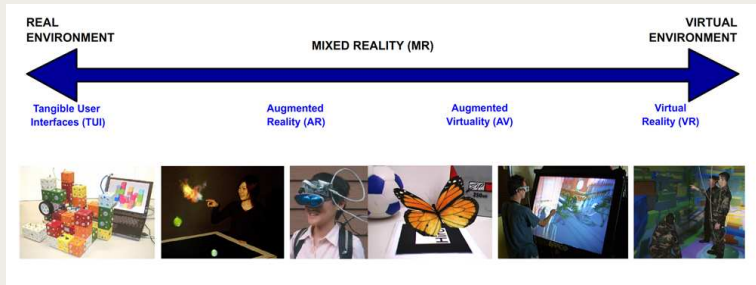
- interne (Éric Zeghers, Christophe Renaud, François Rousselle)
- sous-projet 2 (Rodolphe Crespin, Henri Astre, Pierre Pontier)
- sous-projet 1 (Benjamin Astre, Scrome)
- entreprise Catopsys (Valentin Mathe, Pierre Pontier)

Problématique de la thèse

permettre au système Catopsys de réaliser de la réalité mixte

permettre au système Catopsys de réaliser de la réalité mixte

Réalité mixte



permettre au système Catopsys de réaliser de la réalité mixte

permettre au système Catopsys de réaliser de la réalité mixte

⇒ contrôler la radiométrie de l'ensemble du système

permettre au système Catopsys de réaliser de la réalité mixte

⇒ contrôler la radiométrie de l'ensemble du système

Radiométrie

mesure des rayonnements électromagnétiques

quantités :

- flux (W)
- éclairement (W.m^{-2})
- luminance ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$)

fonctions :

- émission (sources de lumières)
- réflexion (objets réfléchissants)
- absorption (capteurs de lumière)

permettre au système Catopsys de réaliser de la réalité mixte

⇒ contrôler la radiométrie de l'ensemble du système

permettre au système Catopsys de réaliser de la réalité mixte

⇒ contrôler la radiométrie de l'ensemble du système

Étapes à réaliser

- acquisition du réel
- (mélange réel-virtuel)
- simulation d'éclairage
- affichage

permettre au système Catopsys de réaliser de la réalité mixte

⇒ contrôler la radiométrie de l'ensemble du système

Etapes à réaliser

- acquisition du réel
- (mélange réel-virtuel)
- simulation d'éclairage
- affichage

Problèmes posés

- faisabilité
- limites
- méthodes
- contraintes (facilité d'utilisation, faible coût, temps-réel)

permettre au système Catopsys de réaliser de la réalité mixte

⇒ contrôler la radiométrie de l'ensemble du système

Etapes à réaliser

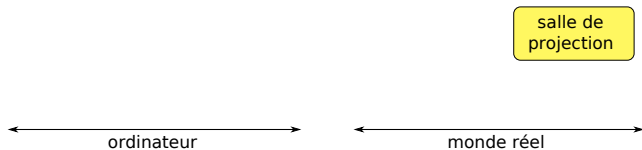
- acquisition du réel
- (mélange réel-virtuel)
- simulation d'éclairage
- affichage

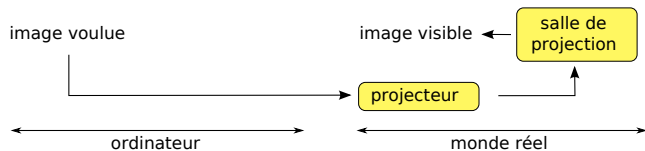
Problèmes posés

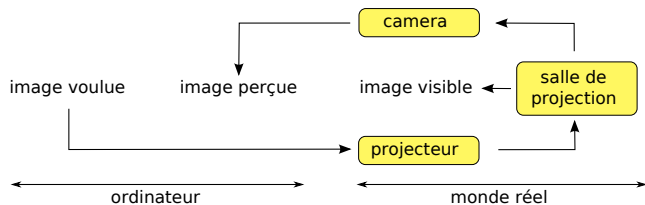
- faisabilité
- limites
- méthodes
- contraintes (facilité d'utilisation, faible coût, temps-réel)

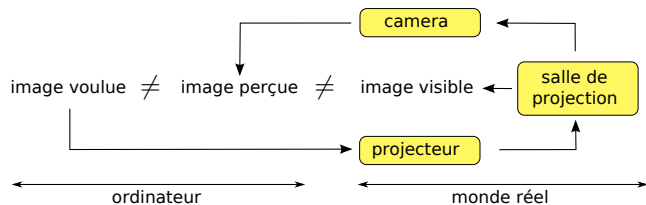
Approche suivie

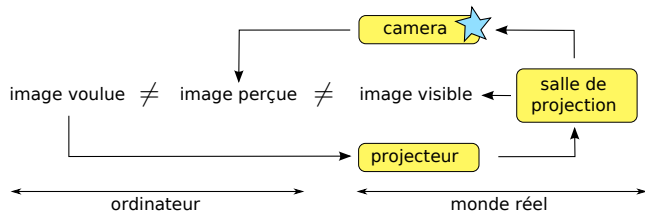
- établir la chaîne de traitement
- caractériser les problèmes
- trouver des solutions et estimer leurs limites

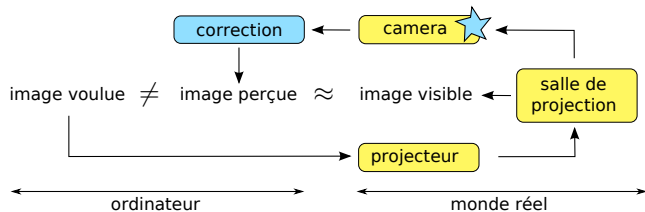


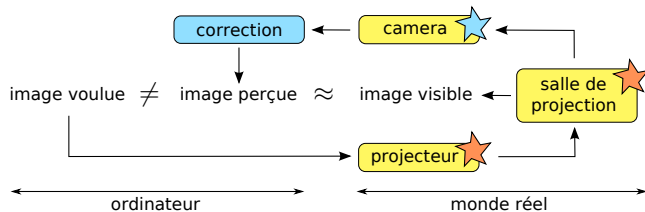


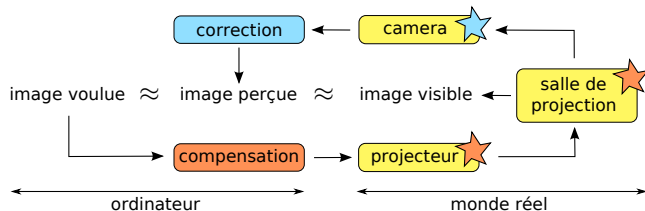


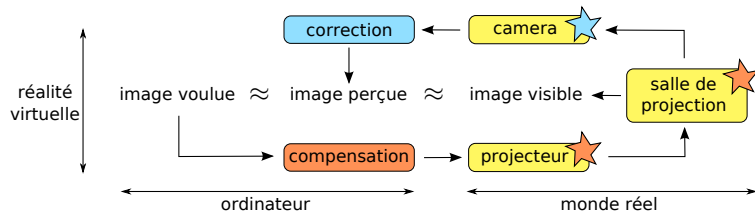


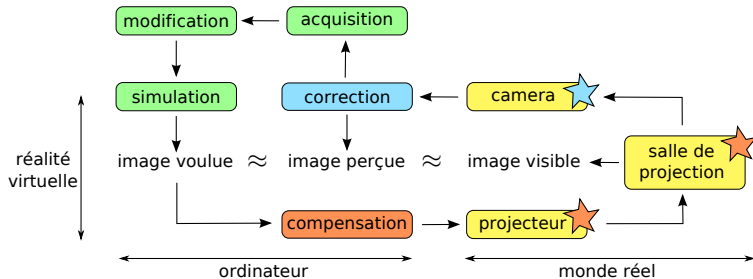


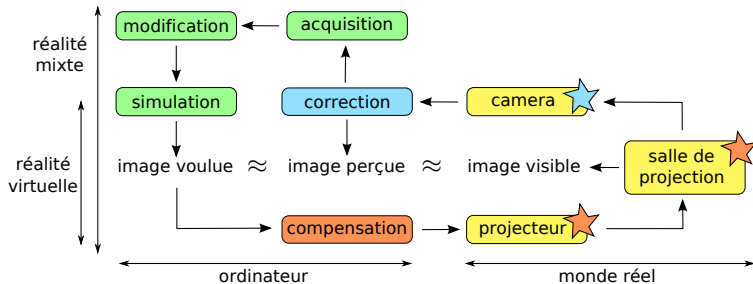




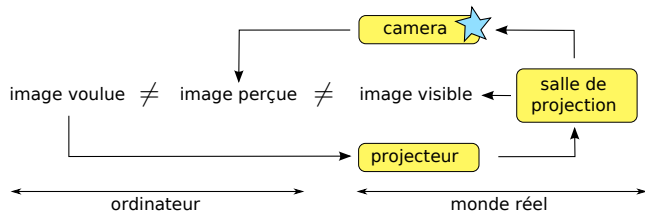






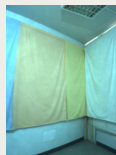


Travaux réalisés

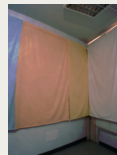


Problématique

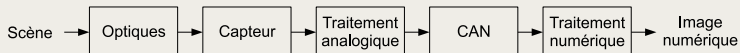
- besoin d'estimer la qualité d'affichage du système
- acquisition caméra peu fidèle à la réalité



avant correction

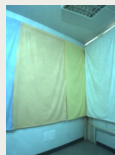


après correction

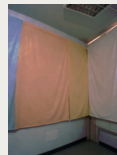


Problématique

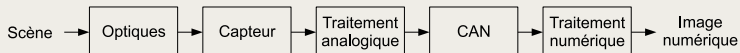
- besoin d'estimer la qualité d'affichage du système
- acquisition caméra peu fidèle à la réalité



avant correction



après correction

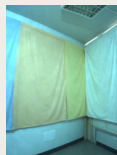


Objectif

- caractériser les perturbations radiométriques et les corriger

Problématique

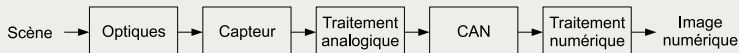
- besoin d'estimer la qualité d'affichage du système
- acquisition caméra peu fidèle à la réalité



avant correction



après correction



Objectif

- caractériser les perturbations radiométriques et les corriger

Originalité

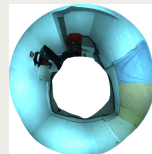
- matériel et contraintes du système Catopsys

Caractéristiques caméra

- matricielle
- couleur
- grand-angle
- panoramique
- format RAW



acquisitions réelles



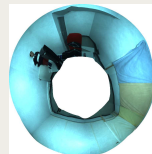
panorama

Caractéristiques caméra

- matricielle
- couleur
- grand-angle
- panoramique
- format RAW



acquisitions réelles



panorama

Perturbations radiométriques



Luminance
réelle



Vignetage



Variation
de sensibilité



Réponse
du capteur



Système
de couleur

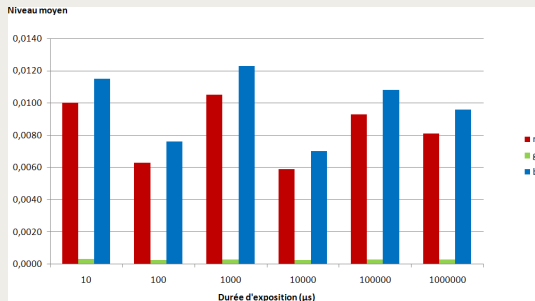
+ bruit

Bruit

- variations aléatoires produites lors de l'acquisition
- concerne tout système d'acquisition
- différents types, origines, modèles
- pour Catopsys :
 - bruit d'obscurité → biais
 - bruit de mesure → variance

Bruit d'obscurité

- intérêt : modéliser le biais introduit par l'agitation thermique
- expérience : acquisition d'une scène noire
- résultats :

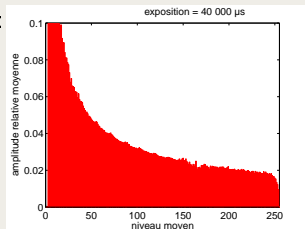


- conclusion : ici biais réel mais négligeable

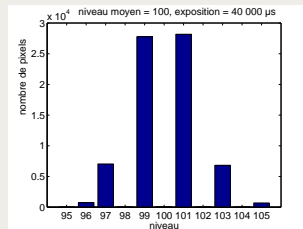
Bruit de mesure

- intérêt : évaluer l'importance du bruit en conditions réelles
- expérience : étude statistique d'après plusieurs acquisitions d'une même scène

- résultats :



influence relative



distribution

- conclusion :

- perturbe fortement les niveaux faibles
- distribution complexe
- correction temporelle applicable

Variation de sensibilité du capteur

- effet de champ plat dû au processus de fabrication
- expérience : mesure d'éclairement d'une scène blanche
- résultats :



variation de sensibilité

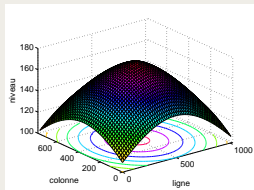


variation après correction

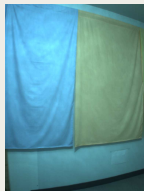
- conclusion :
 - amplitude de la variation : 10% du niveau moyen
 - après correction : 5%

Vignetage

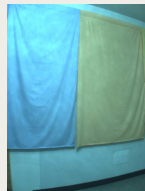
- effet coins noirs dû aux optiques
- expérience : mesure de luminance d'une scène blanche
- correction : optimisation d'après un modèle et des recouvrements
- résultats :



modèle estimé



sans correction



avec correction

- conclusion :
 - perturbation importante
 - méthode de correction applicable au système Catopsys

Exposition et réponse d'intensité

- faible dynamique du capteur (saturations), réponse non linéaire
- acquisition d'une même scène à des expositions différentes
- calcul de la réponse et de la luminance
- résultats :



acquisitions caméra

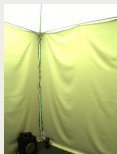
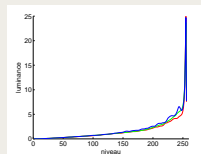


image HDR



réponse d'intensité

- conclusion :
 - dynamique camera faible
 - réponse CCD linéaire, réponse CMOS non linéaire
 - méthode d'acquisition d'images HDR



Gestion de la couleur

- $C_k = \int I(\lambda)R_k(\lambda)d\lambda$
- réponse spectrale de la caméra non neutre
- expérience : image d'une mire (blanc de référence, ColorChecker)
- correction : pondération des canaux de couleur
- résultats :

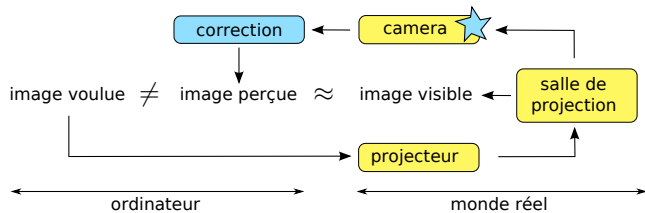


sans correction



avec correction

- conclusion :
 - couleurs souvent déformées
 - correction limitée, dans un espace à 3 primaires



Problématique

- nombreuses perturbations
- pas de méthode de correction standard satisfaisante
- pas de matériel de calibrage spécifique

Problématique

- nombreuses perturbations
- pas de méthode de correction standard satisfaisante
- pas de matériel de calibrage spécifique

Contribution

- modèle de perturbations
- méthode de correction nécessitant peu de matériel et de supervision



J. Dehos, E. Zéghers, L. Sarry, F. Rousselle, C. Renaud : *Practical photoquantity estimation for computer vision applications*, soumis à IETIPR

Modèle

$$c_{sk\lambda n} = a_\lambda f_\lambda (u_{s\lambda} v_{s\lambda} t_k l_{s\lambda}) + b_{sk\lambda n}$$

- c : couleur caméra
- a, f, u, v, b : perturbations radiométriques
- t : durée d'exposition
- l : luminance de la scène

Calibrage (hors ligne)

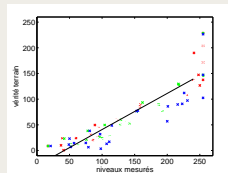
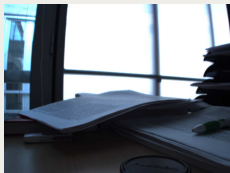
- détermine les paramètres a , f , u et v
- corrige le bruit par une méthode temporelle
- nécessite quelques acquisitions et un peu de supervision
- déroulement :
 - réponse du capteur (durée d'exposition)
 - étalonnage couleur (mire)
 - variation de sensibilité (capteur sans objectif)
 - vignetage (recouvrements)

Correction (en ligne)

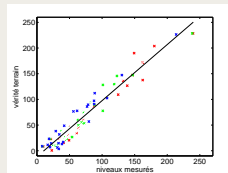
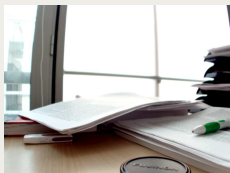
- nécessite uniquement quelques acquisitions à différentes durées d'exposition
- déroulement :
 - réponse + étalonnage couleur (LUT)
 - variation de sensibilité + vignetage (image de pondération)

Résultats

sans correction



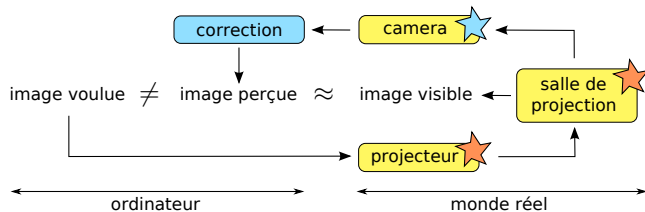
avec correction



scène de test

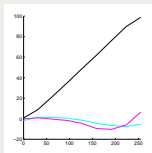
mire calibrée

corrélation
vérité-terrain



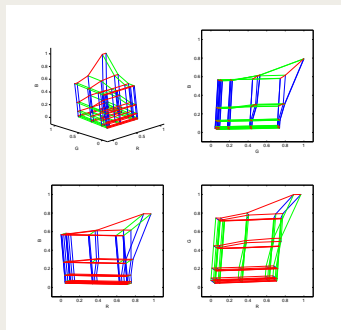
Sources de lumière

- étude expérimentale pour caractériser des sources possibles
- types de source : vidéoprojecteur, lampes (ampoule, néon, LED)
- appareils de mesure : colorimètre, caméra
- mesures : puissance, gamut, fonction de transfert, contraste



transfert de luminance
et de chrominance

- conclusion :
 - vidéoprojecteur exploitable
 - attention au réglage de blanc
 - limiter les sources parasites



gamut 3D

Étude des matériaux

- lumière du projecteur visible après réflexion sur les murs
- contribution :
 - étude théorique → valider le principe de compensation
 - étude expérimentale → caractériser des matériaux types

Étude des matériaux

- lumière du projecteur visible après réflexion sur les murs
- contribution :
 - étude théorique → valider le principe de compensation
 - étude expérimentale → caractériser des matériaux types

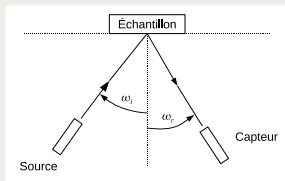
Étude théorique

$$L_r(\vec{\omega}_r, \lambda) = \int_{\Omega_i} f_r(\vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r, \lambda) L_i(\vec{\omega}_i, \lambda) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i$$

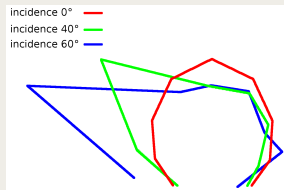
- propriétés :
 - linéarité par rapport à la lumière incidente
 - linéarité par rapport à la BRDF
- conséquence : l'influence des matériaux peut être compensée localement par la lumière projetée

Étude expérimentale

- but : estimer la BRDF d'un matériau (réflexion selon les directions)
- banc de mesure (source, échantillon, sonde)
- matériaux de la pièce, matériaux de référence



banc de mesure



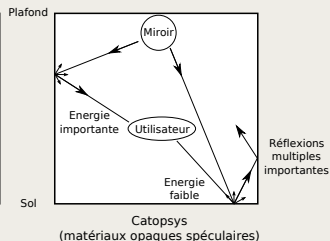
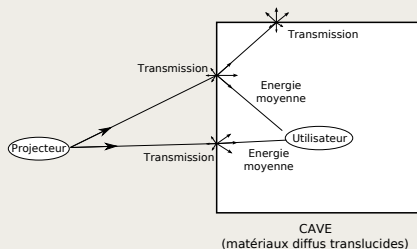
BRDF mesurée

- conclusion :
 - comportement intermédiaire diffus-spéculaire
 - matériaux exploitables pour la projection
 - perte d'énergie importante



Projet DUT : Visualisateur de BRDF, 2010

Problématique



lumière totale

=



lumière réfléchie
une fois

+



lumière réfléchie
plusieurs fois

Objectif de la simulation (contribution)

- évaluer l'influence des réflexions multiples
- évaluer l'efficacité de la compensation

Objectif de la simulation (contribution)

- évaluer l'influence des réflexions multiples
- évaluer l'efficacité de la compensation

Objectif de la simulation (contribution)

- évaluer l'influence des réflexions multiples
- évaluer l'efficacité de la compensation

Principe de la simulation

- projection : $E_i = \frac{\rho_i}{\#K} \sum_{k \in K} \cos \theta^k L_p^k$
- échanges énergétiques : $B = (I - G)^{-1} E$
- visualisation : $L_c^k = B_i - E_i + \rho_i \cos \theta^k L_p^k$
- compensation

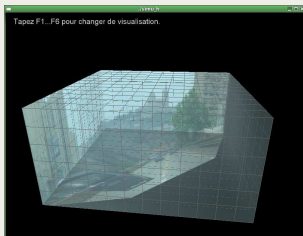


J. Dehos, E. Zéghers, L. Sarry, F. Rousselle, C. Renaud : *Analyse en simulation de projection immersive par l'avant*, AFIG 2010, primé 2^e meilleur papier



J. Dehos, E. Zéghers, L. Sarry, F. Rousselle, C. Renaud : *Analyse en simulation de projection immersive par l'avant*, soumis à REFIG

Résultats



simulation de la projection

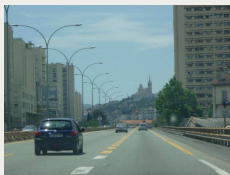


image voulue

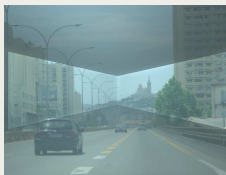
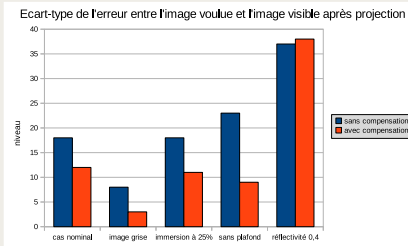
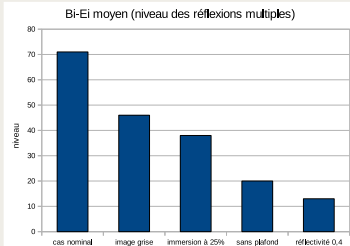


image visible
sans compensation

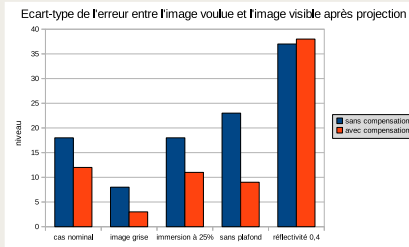
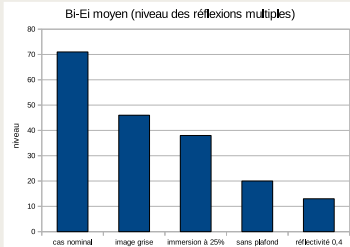


image visible
avec compensation

Analyse

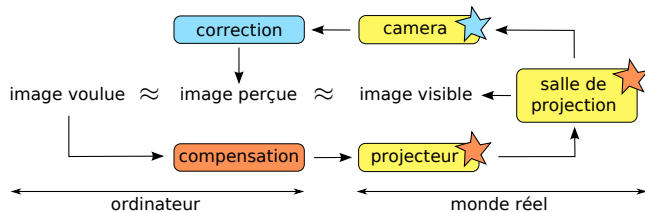


Analyse



Facteurs améliorant la projection

- 1 pièce partiellement ouverte
- 2 immersion partielle
- 3 image voulue sombre et peu contrastée
- 4 réflectivité importante



Contribution

- (non-linéarité, mélange de couleur)
- réflexions multiples
- projection immersive



J. Dehos, E. Zéghers, C. Renaud, F. Rousselle, L. Sarry : *Radiometric compensation for a low-cost immersive projection system*, VRST 2008



J. Dehos, E. Zéghers, F. Rousselle, C. Renaud, L. Sarry : *Compensation radiométrique d'un système de projection immersive grand-public*, REFIG 2009

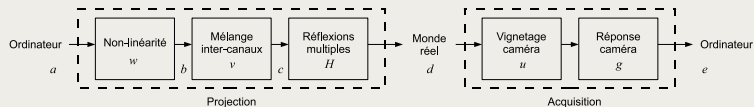


J. Dehos, E. Zéghers, F. Rousselle, C. Renaud, L. Sarry : *Compensation radiométrique d'un système de projection immersive grand-public*, AFIG 2008

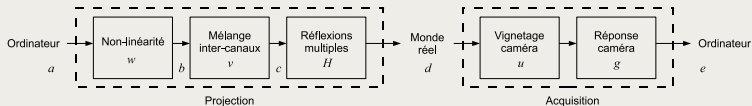


Projet DUT : Compensation radiométrique, 2008

Modélisation



Modélisation



Calibrage

- géométrie
- caméra
- projecteur
- réflexions multiples



mesure des réflexions multiples

Compensation

- tone mapping inverse
- réflexions multiples
- projecteur

Compensation

- tone mapping inverse
- réflexions multiples
- projecteur

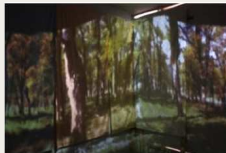
Résultats



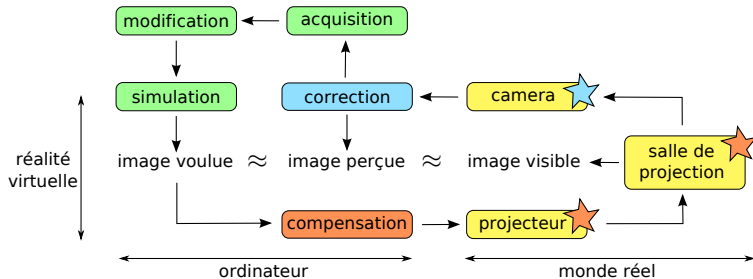
pièce réelle



sans compensation



avec compensation



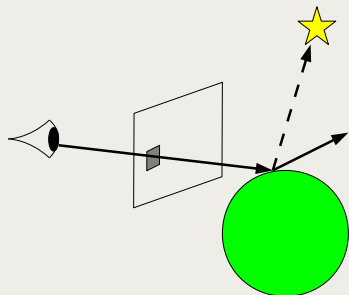
Problématique

- calculer l'éclairement d'une scène (objets, matériaux, sources de lumière, caméra)
- méthodes classiques : z-buffer, radiosité, lancer de rayons...
- originalité de Catopsys : géométrie des scènes de réalité mixte



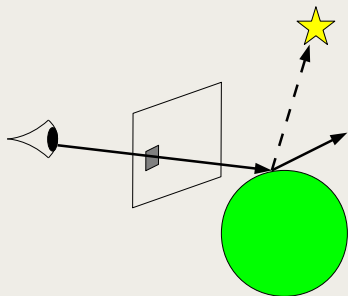
Projet DUT : Bibliothèque de projection catadioptrique, 2009

Lancer de rayons



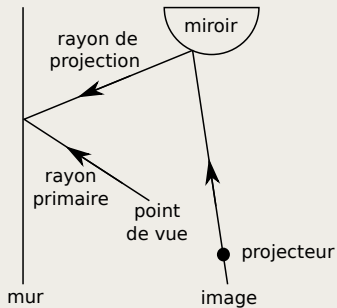
- algorithme récursif

Lancer de rayons



- algorithme récursif

Application à Catopsys

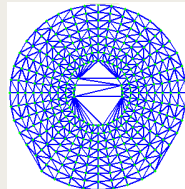


- rayons primaires précalculés

Données fournies par le SP1



maillage 3D

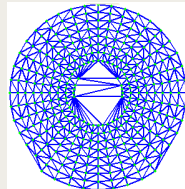


maillage 2D

Données fournies par le SP1

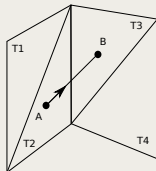


maillage 3D



maillage 2D

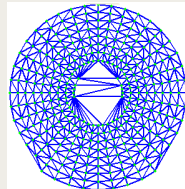
Problème à résoudre



Données fournies par le SP1

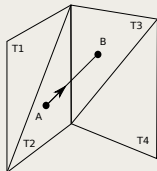


maillage 3D



maillage 2D

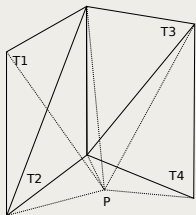
Problème à résoudre



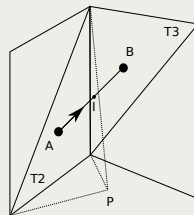
Méthodes

- partitionnement de la scène 3D
- parcours dans la carte projecteur
- estimation de trajectoires 2D

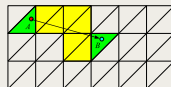
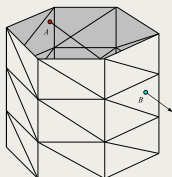
Partitionnement de la scène 3D



partitionnement en tétraèdres



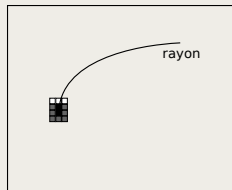
parcours entre tétraèdres



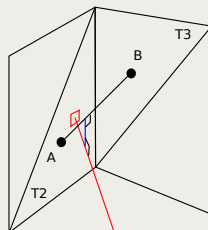
parcours dans la scène

Parcours dans la carte projecteur

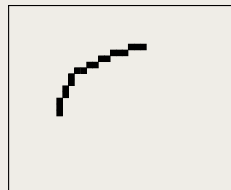
- trouver le pixel suivant
- tester l'intersection rayon-scène dans la carte projecteur



parcours de proche en proche



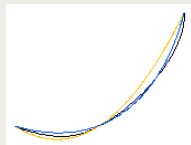
distance entre rayons



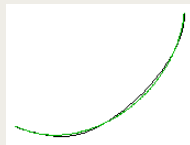
résultat du parcours

Estimation de trajectoires 2D

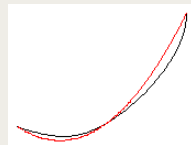
- calculer plusieurs points
- estimer la trajectoire
- parcourir la trajectoire



interpolation

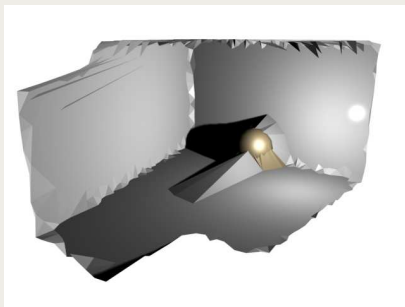


arc d'ellipse



parabole

Résultats (1)



scène à simuler

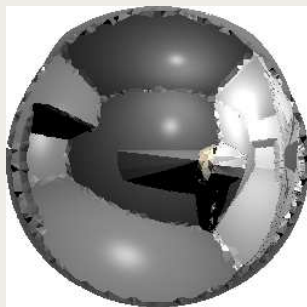
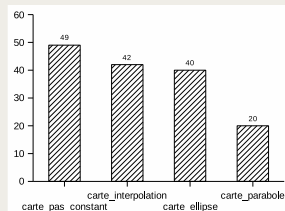
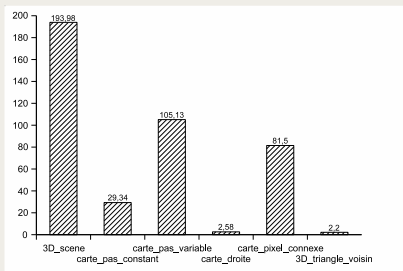
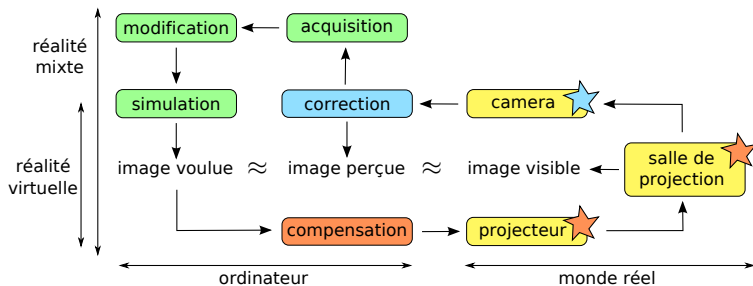


image à projeter

Résultats (2)

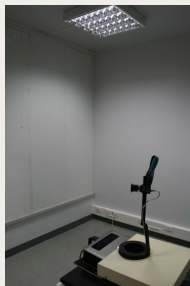


temps de calcul (en secondes)

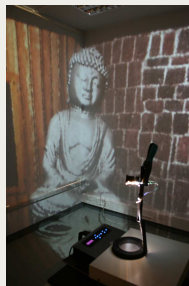


Problématique

- acquérir et modifier les objets et les matériaux



pièce réelle



réalité mixte

Objets

- acquisition lors du calibrage géométrique (SP1)
- intégration d'objets virtuels

Objets

- acquisition lors du calibrage géométrique (SP1)
- intégration d'objets virtuels

Matériaux

- acquisition du diffus simple
- acquisition du spéculaire complexe
- modification immédiate (compensation)

Bilan

Travaux réalisés

- bibliographie (vision, synthèse et traitement d'images...)
- études expérimentales et théoriques
- conception et implémentation d'algorithmes (C++, OpenGL, GLSL, Matlab)

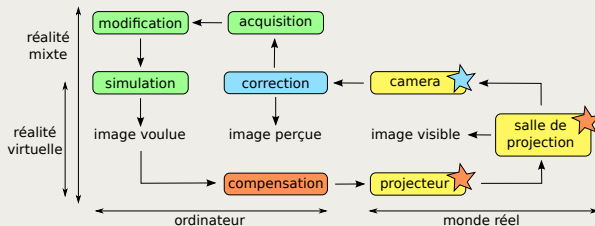
Travaux réalisés

- bibliographie (vision, synthèse et traitement d'images...)
- études expérimentales et théoriques
- conception et implémentation d'algorithmes (C++, OpenGL, GLSL, Matlab)

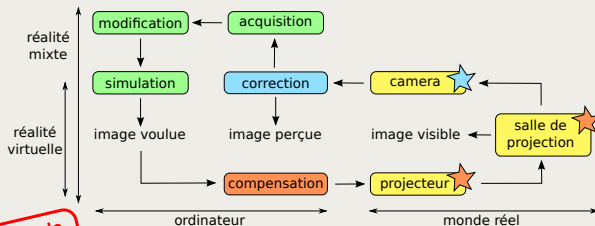
Bilan par rapport au projet Catopsys

- étude de faisabilité
- réalisation de fonctionnalités (synthèse, compensation, correction)

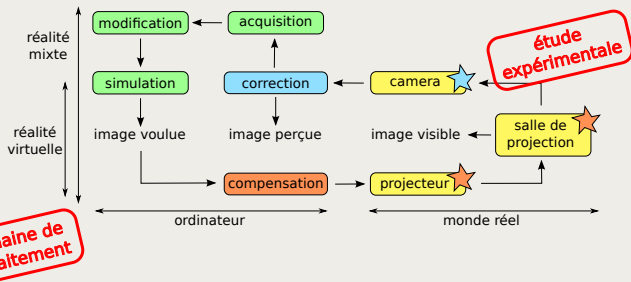
Contributions



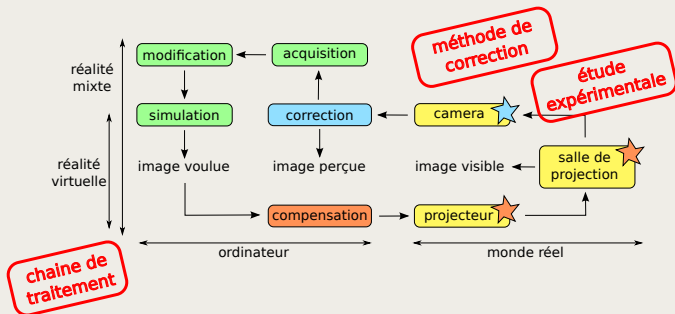
Contributions



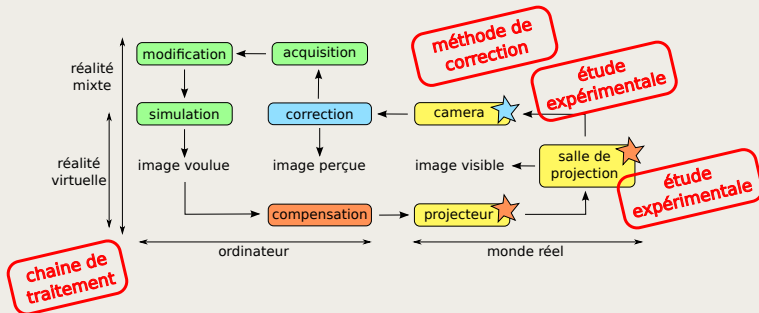
Contributions



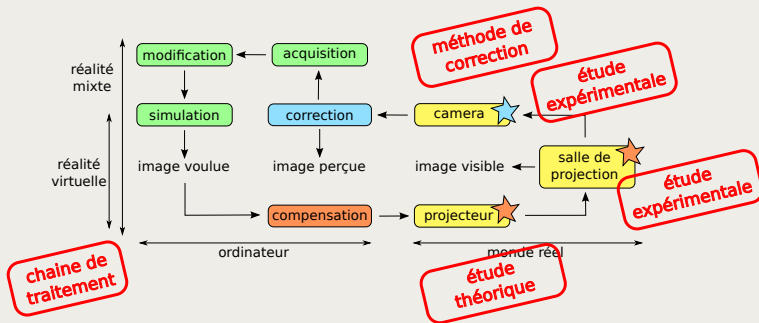
Contributions



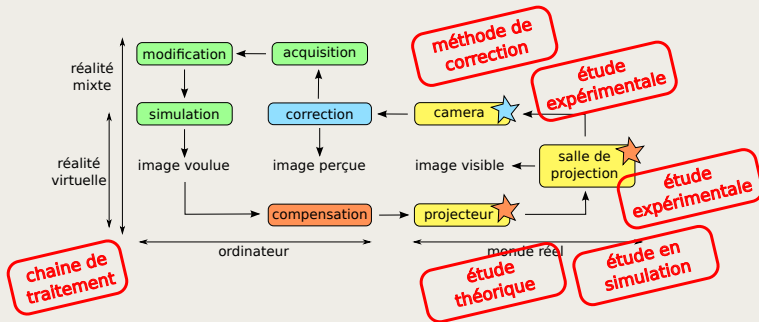
Contributions



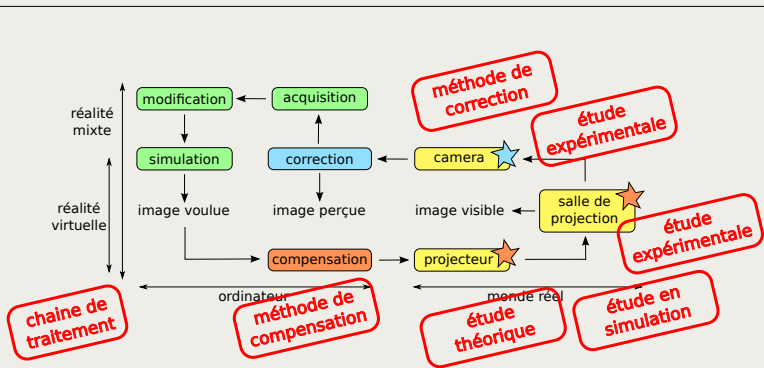
Contributions



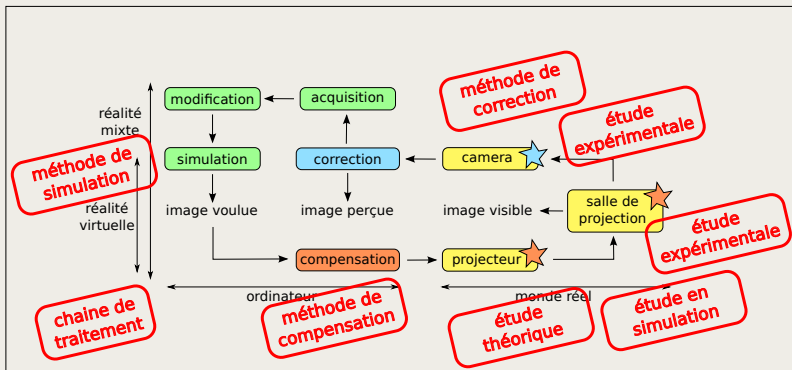
Contributions



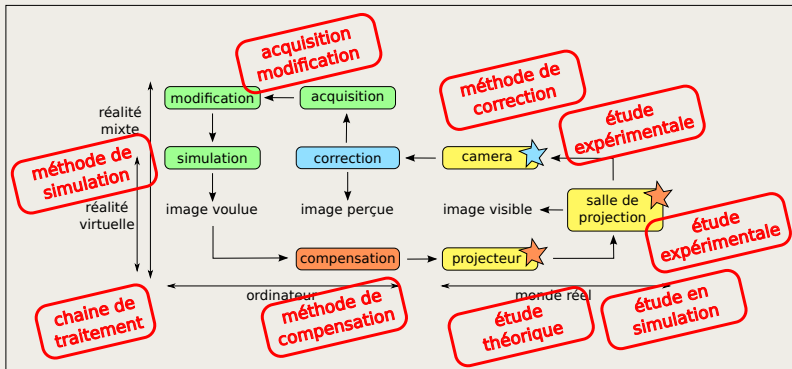
Contributions



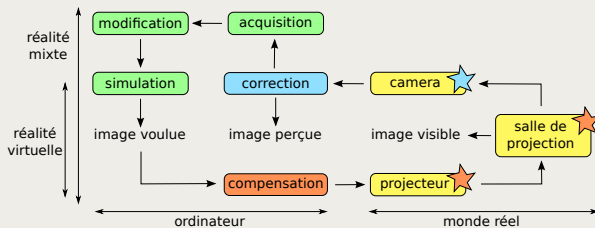
Contributions



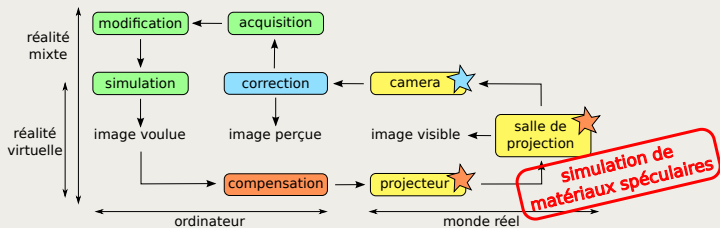
Contributions



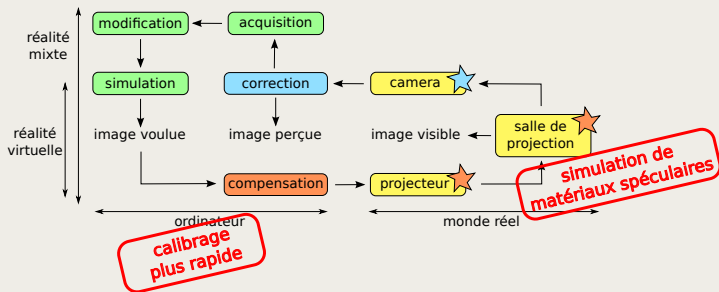
Perspectives



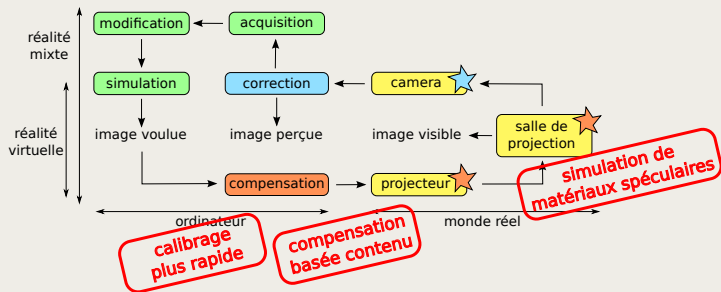
Perspectives



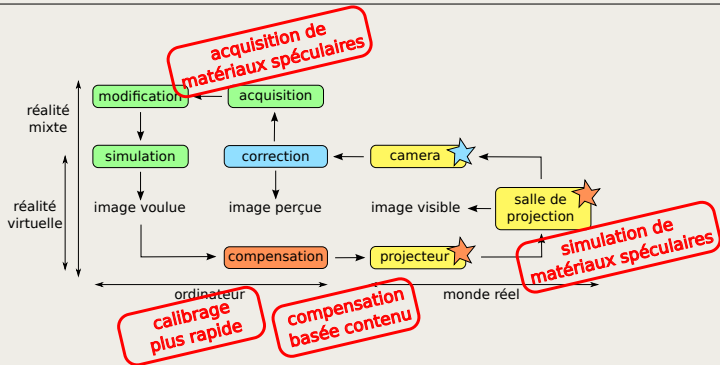
Perspectives



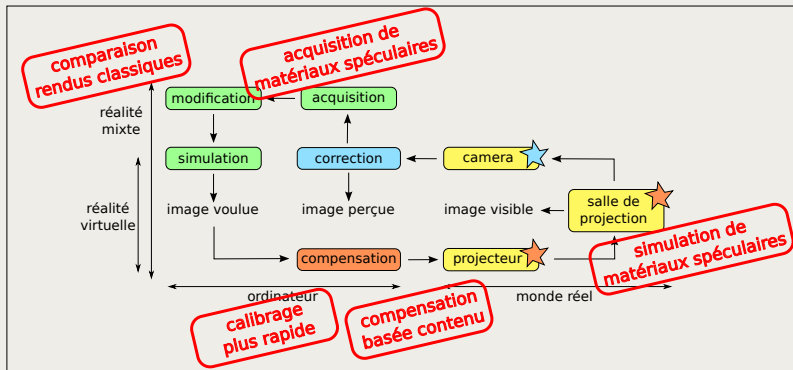
Perspectives



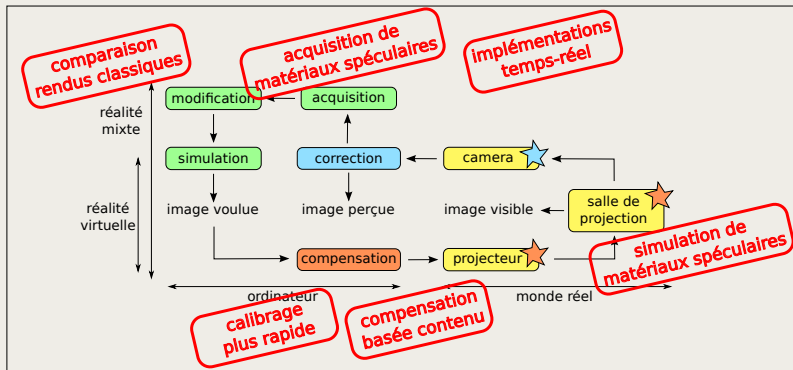
Perspectives



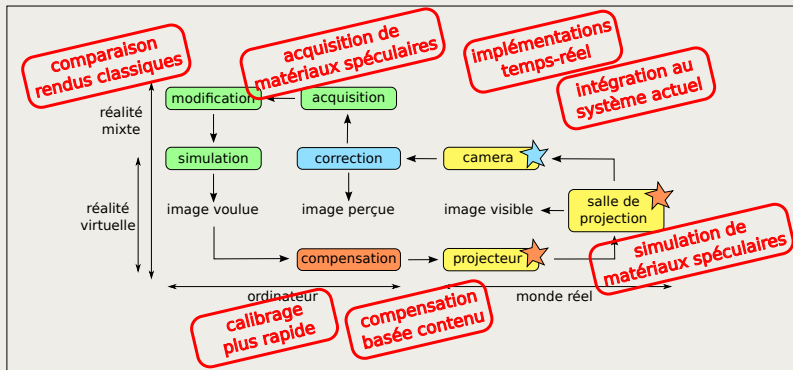
Perspectives



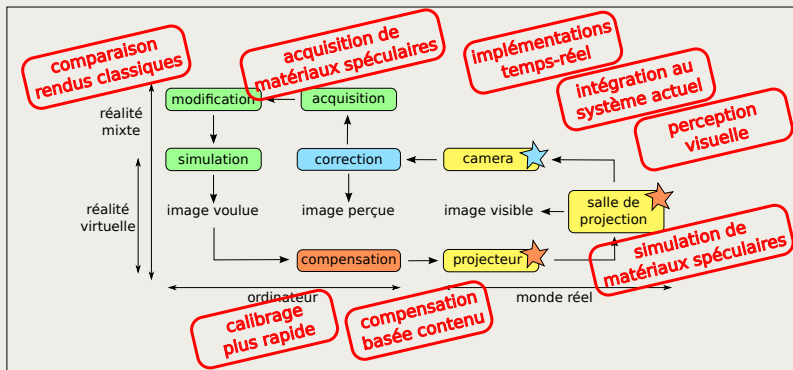
Perspectives



Perspectives



Perspectives



Publications

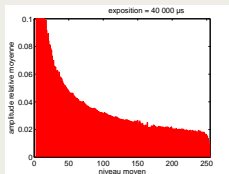
- Conférence internationale :
 - J. Dehos, E. Zéghers, C. Renaud, F. Rousselle, L. Sarry : *Radiometric compensation for a low-cost immersive projection system*, VRST 2008
- Revue nationale :
 - J. Dehos, E. Zéghers, F. Rousselle, C. Renaud, L. Sarry : *Compensation radiométrique d'un système de projection immersive grand-public*, REFIG 2009
- Conférences nationales :
 - J. Dehos, E. Zéghers, L. Sarry, F. Rousselle, C. Renaud : *Analyse en simulation de projection immersive par l'avant*, AFIG 2010, **primé 2^e meilleur papier**
 - J. Dehos, E. Zéghers, F. Rousselle, C. Renaud, L. Sarry : *Compensation radiométrique d'un système de projection immersive grand-public*, AFIG 2008
- Articles soumis :
 - J. Dehos, E. Zéghers, L. Sarry, F. Rousselle, C. Renaud : *Practical photoquantity estimation for computer vision applications*, soumis à IETIPR (révision mineure)
 - J. Dehos, E. Zéghers, L. Sarry, F. Rousselle, C. Renaud : *Analyse en simulation de projection immersive par l'avant*, soumis à REFIG

Pour terminer

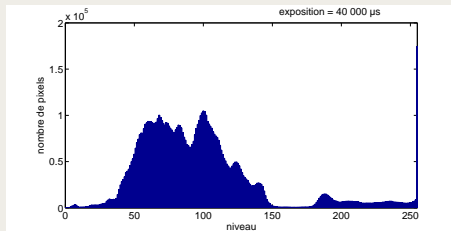
- vidéo de présentation
- démonstration
- questions et remarques

Annexes

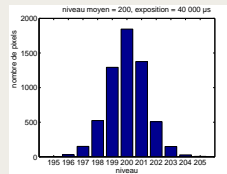
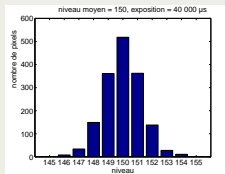
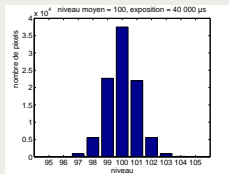
Canal rouge



amplitude relative du bruit

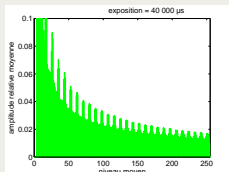


histogramme type

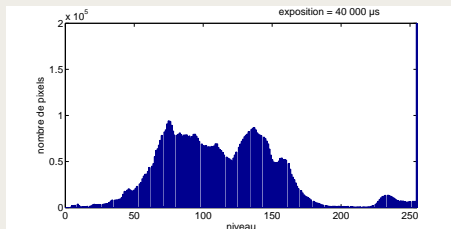


distribution du bruit

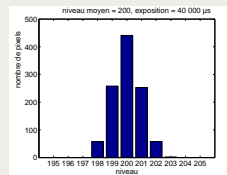
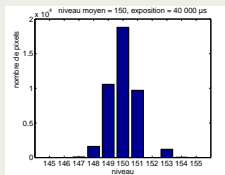
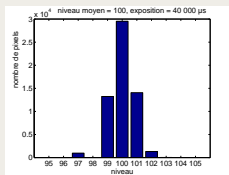
Canal vert



amplitude relative du bruit

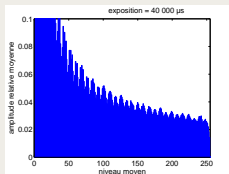


histogramme type

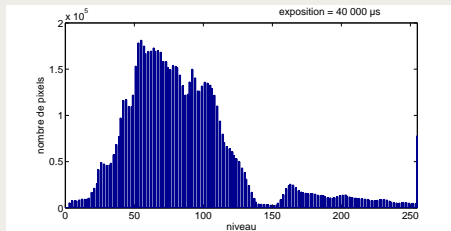


distribution du bruit

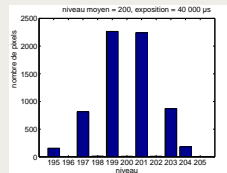
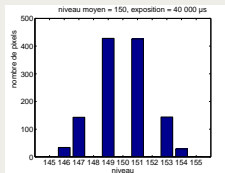
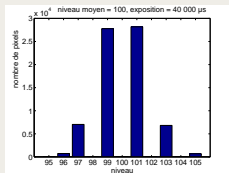
Canal bleu



amplitude relative du bruit



histogramme type



distribution du bruit

Mapping caméra-projecteur



image caméra

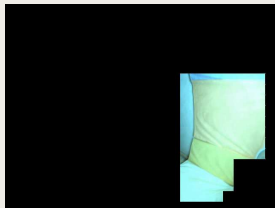


image projecteur partielle

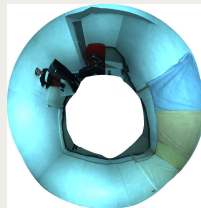
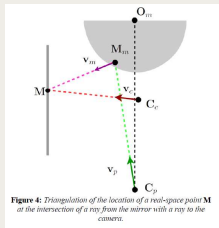


image projecteur complète

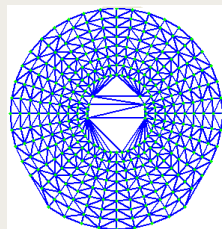
Triangulation



principe



scène 3D



carte projecteur

Problèmes restants

- l'interpolation bilinéaire ne respecte pas la déformation réelle
- évaluer l'erreur n'est pas simple car on ne connaît pas la déformation réelle
- mesures manuelles possibles mais fastidieuses
- conséquences géométriques et radiométriques : positions, directions. . .

Compensation basée contenu

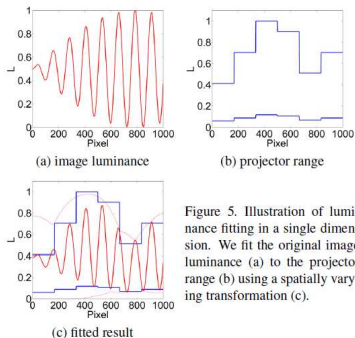


Figure 5. Illustration of luminance fitting in a single dimension. We fit the original image luminance (a) to the projector range (b) using a spatially varying transformation (c).

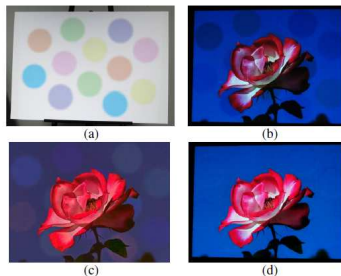
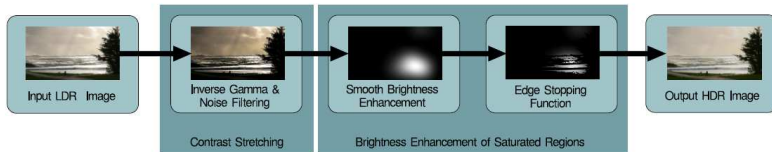


Figure 1. A patterned projector surface (a) will affect a projected image (b) but we generate a compensation image (c) that removes the irregularities (d).



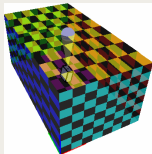
Ashdown, Okabe, Sato, Sato, *Robust Content-Dependent Photometric Projector Compensation* CVPRW, 2006

LDR2HDR



Rempel, Trentacoste, Seetzen, Young, Heidrich, Whitehead, Ward : *Ldr2Hdr : on-the-fly reverse tone mapping of legacy video and photographs*, SIGGRAPH, 2007

Déformation du miroir



scène voulue

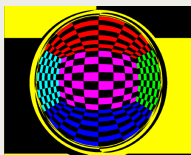


image à projeter

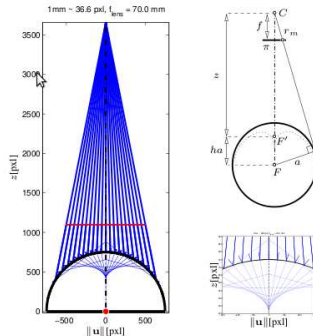


Figure 3: Rays reflected by the mirror are tangent to a caustic surface. Left: A perspective camera looking at a spherical mirror. Right top: An approximation of a non-central spherical model by a central one with a fictive viewpoint F' . Right bottom: A detail view of the caustic.

déformation du miroir

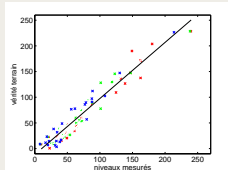
Optimisations classiques

- partitionnement
 - grille régulière
 - BVH
 - BSP tree, kD tree, octree
- calcul d'intersection
 - algorithme Moller-Trumbore
 - coordonnées de Plucker (tétraèdres)

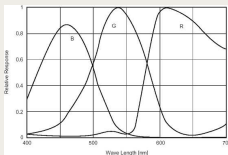
Optimisations des parcours 2D

- méthode de calcul direct de la projection inverse
- GPU : parallélisme (rayons), vecteurs, images
→ mais algos séquentiels
- algorithmes incrémentaux (Bresenham)
→ séquentiels

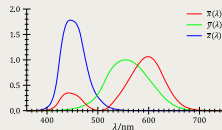
Évaluation du calibrage



corrélation avec
la vérité-terrain



réponse spectrale
de la caméra



réponse spectrale de
l'observateur standard

- difficulté pour obtenir une vérité terrain
- compatibilité projecteur-caméra-oeil
- perception visuelle