

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



systemes catadioptriques de projection  
panoramique pour la realite 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

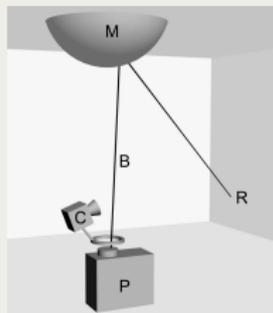
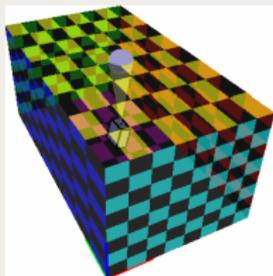


schéma de principe



photo du prototype

## Principe (2)



scène voulue



image à projeter



résultat de la projection

### Applications (1)

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

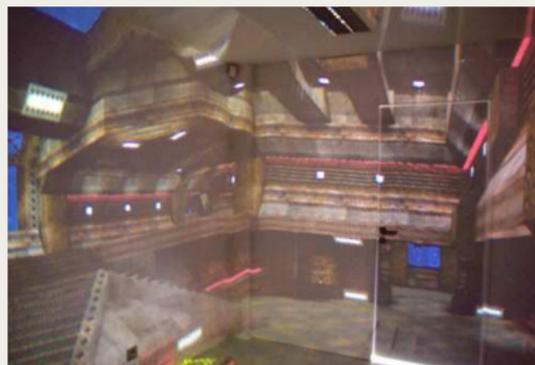


ambiance virtuelle

## 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

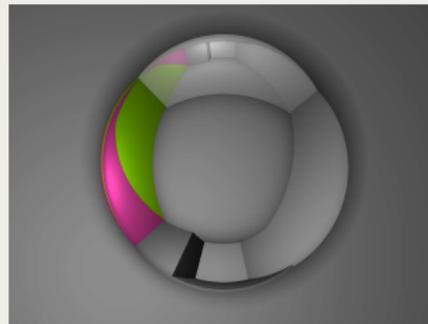
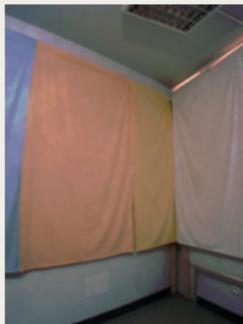
mettre au point un prototype fonctionnel

### 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)

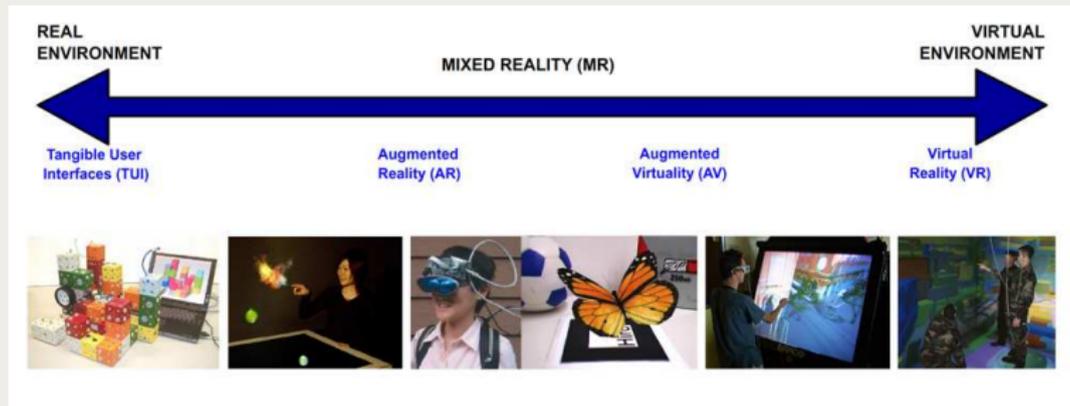
# Problématique de la thèse



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 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )
- luminance ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ )

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

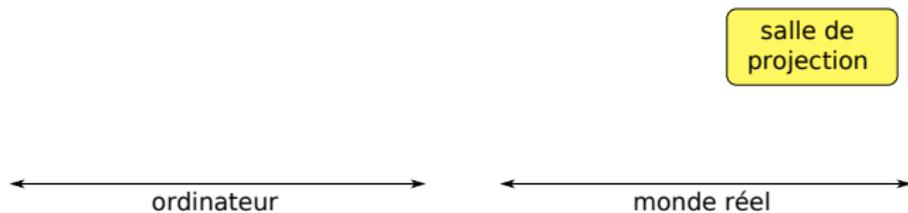
### Problèmes posés

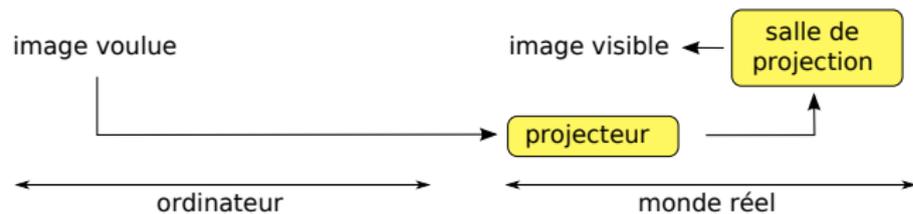
- faisabilité
- limites
- méthodes
- contraintes (facilité d'utilisation, faible coût, temps-réel)

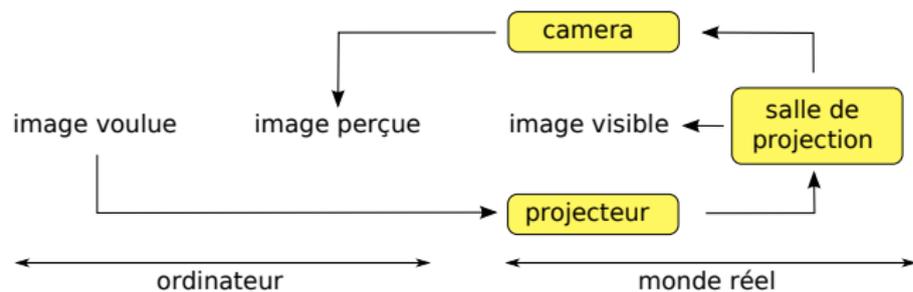
### Approche suivie

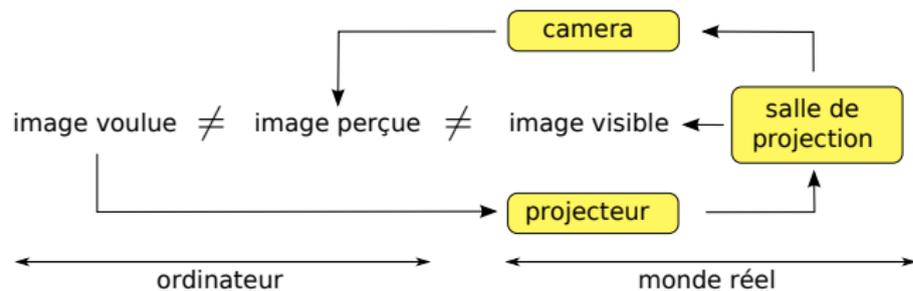
- établir la chaîne de traitement
- caractériser les problèmes
- trouver des solutions et estimer leurs limites

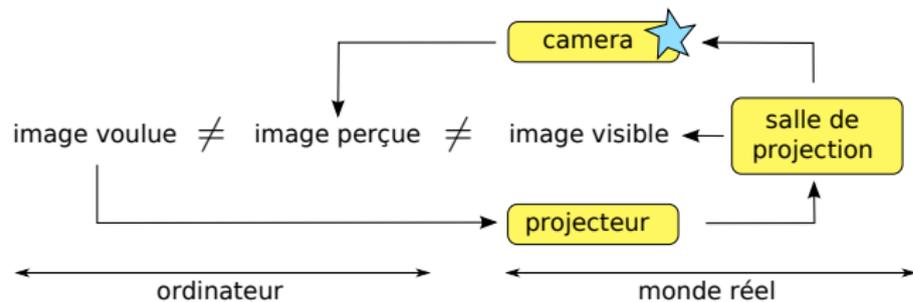


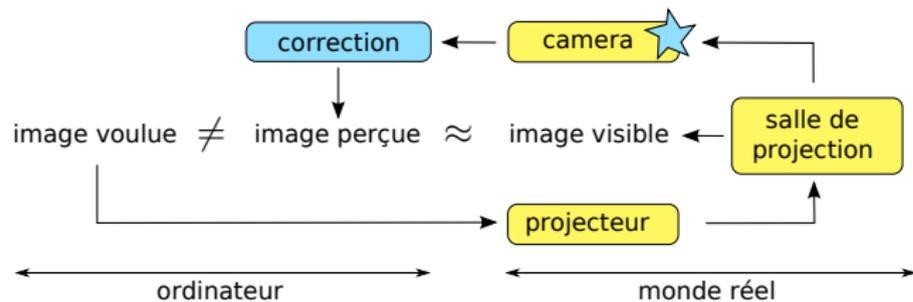


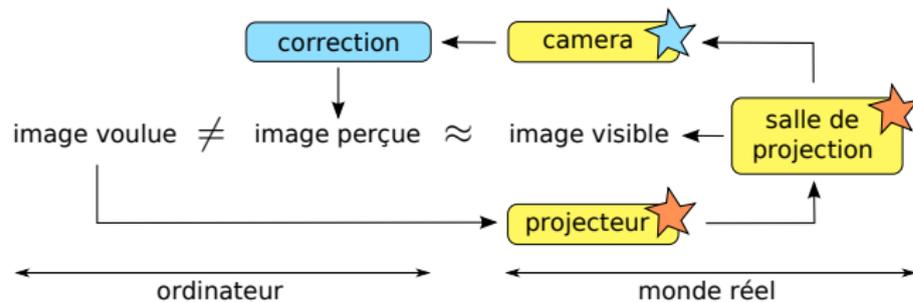


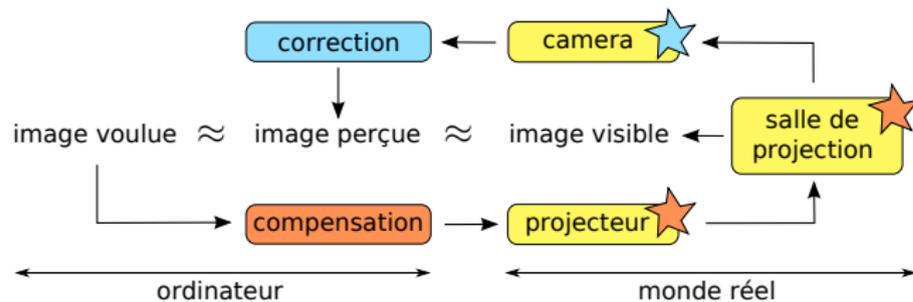


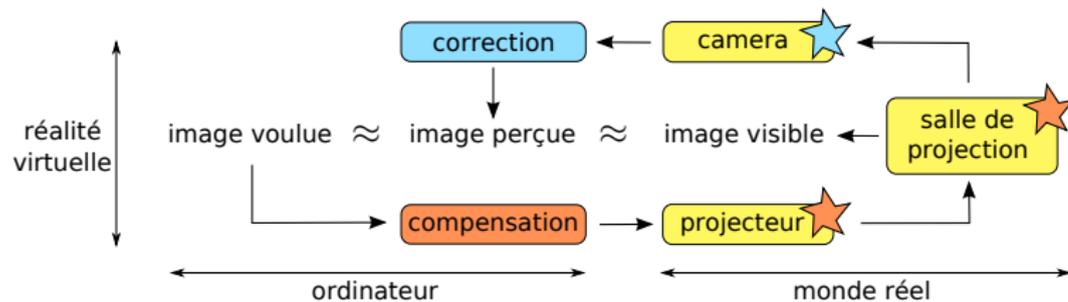


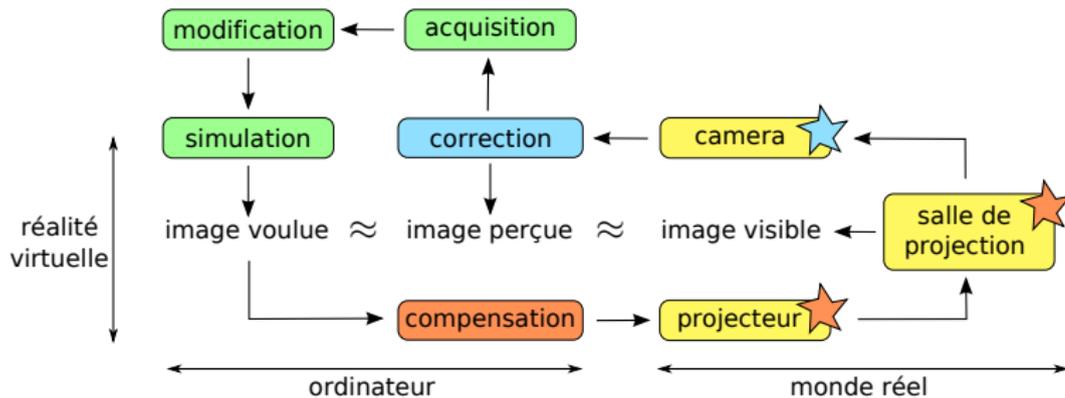


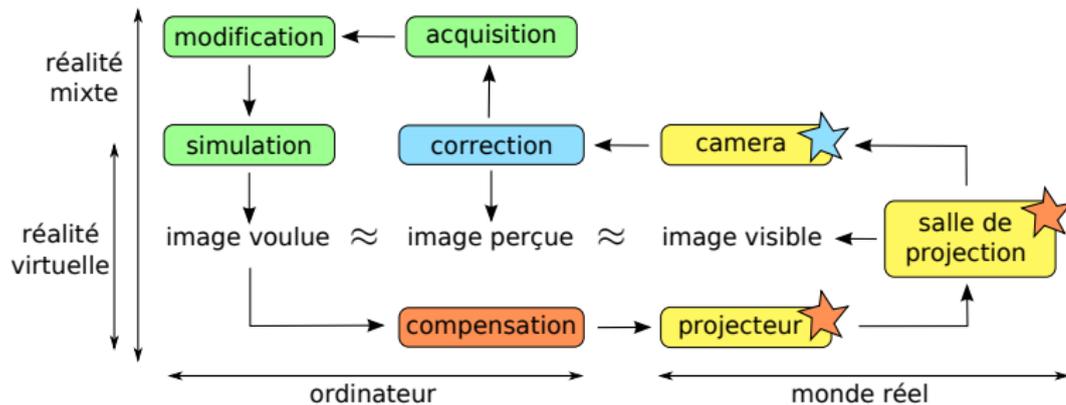






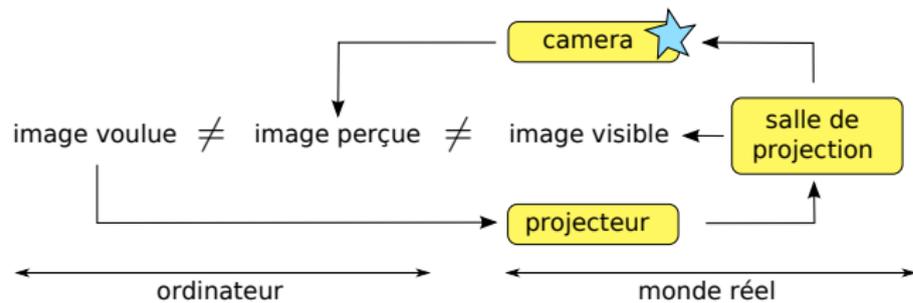






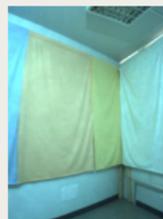
## Travaux réalisés





## Problématique

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



avant correction

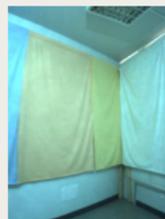


après correction



## Problématique

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



avant correction



après correction

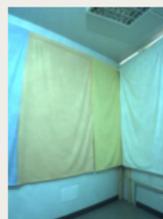


## Objectif

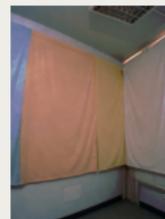
- caractériser les perturbations radiométriques et les corriger

## 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

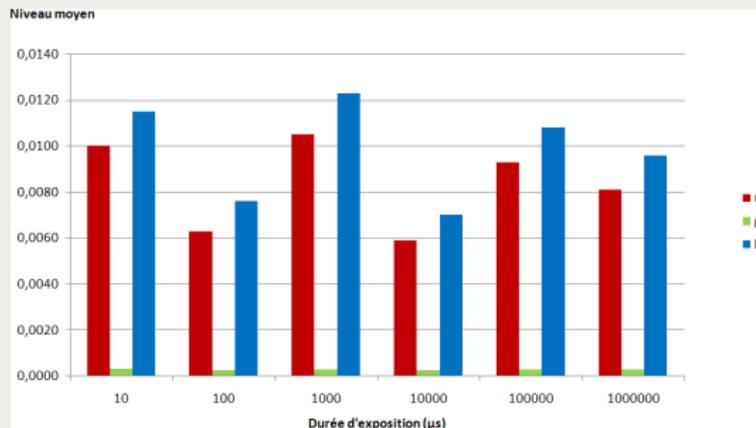
+ bruit

### 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 :

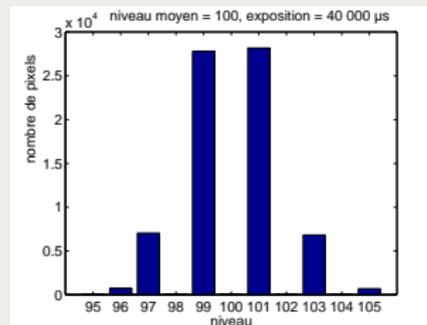
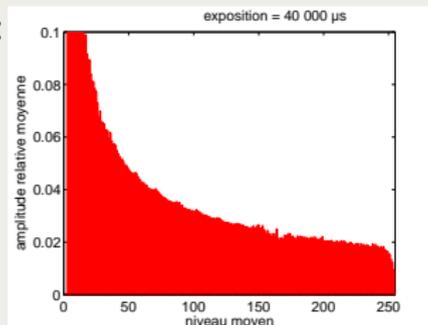


- conclusion : ici biais réel mais négligeable

## Bruit de mesure

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

- résultats :



- conclusion :

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

distribution

### 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

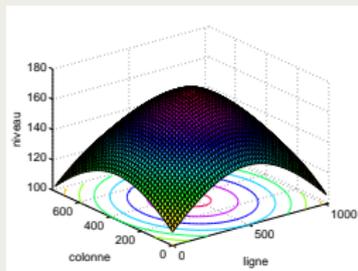


variation après correction

- 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

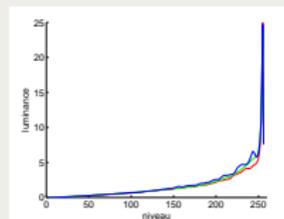
- faible dynamique du capteur (saturations), réponse non linéaire
- acquisition d'une même scène à des expositions différentes
- calcul de la réponse et de la luminance
- résultats :



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 :



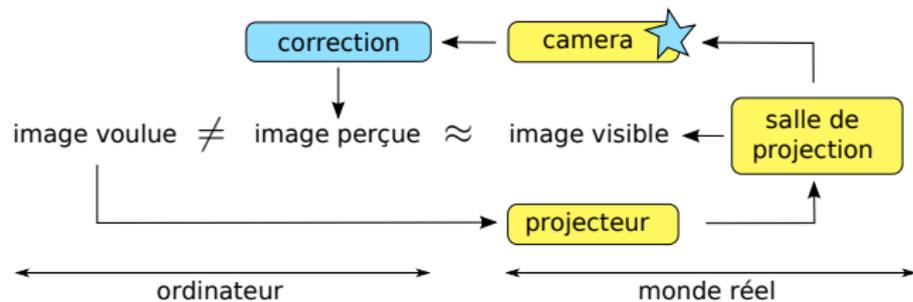
sans correction



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)

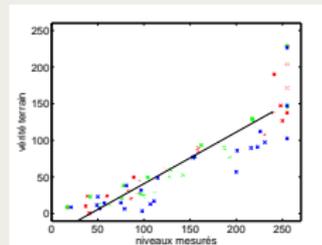
- détermine les paramètres  $a$ ,  $f$ ,  $u$  et  $v$
- corrige le bruit par une méthode temporelle
- nécessite quelques acquisitions et un peu de supervision
- déroulement :
  - réponse du capteur (durée d'exposition)
  - étalonnage couleur (mire)
  - variation de sensibilité (capteur sans objectif)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

### Correction (en ligne)

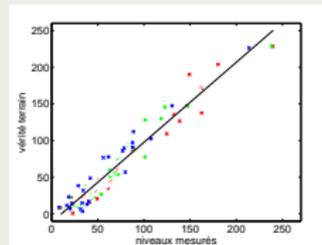
- nécessite uniquement quelques acquisitions à différentes durées d'exposition
- déroulement :
  - réponse + étalonnage couleur (LUT)
  - variation de sensibilité + vignetage (image de pondération)

## Résultats

sans correction



avec correction

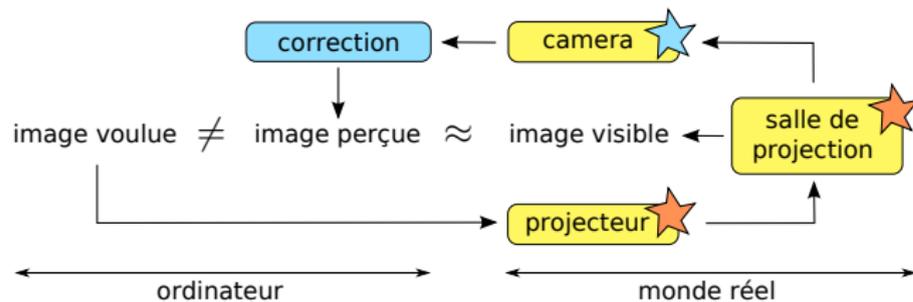


scène de test

mire calibrée

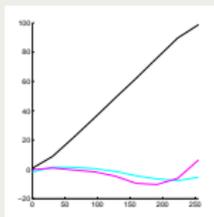
corrélation  
vérité-terrain





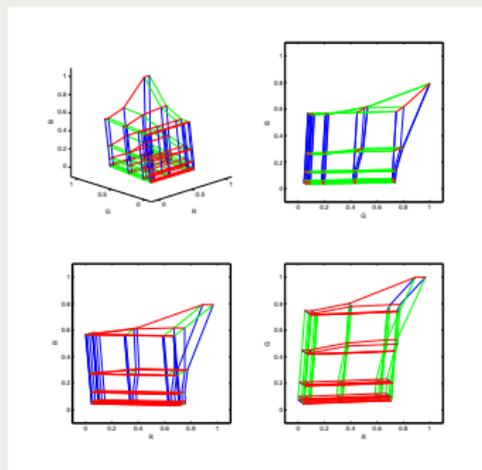
## Sources de lumière

- 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

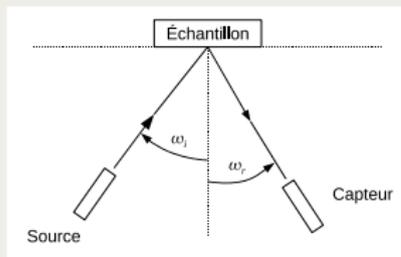
## Étude théorique

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

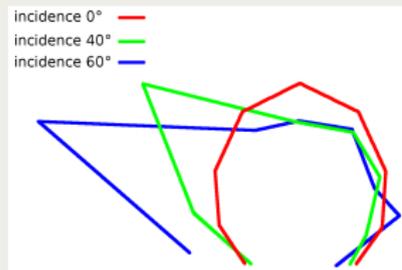
- propriétés :
  - linéarité par rapport à la lumière incidente
  - linéarité par rapport à la BRDF
- conséquence : l'influence des matériaux peut être compensée localement par la lumière projetée

## 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

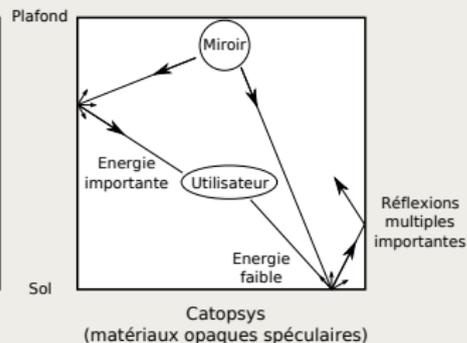
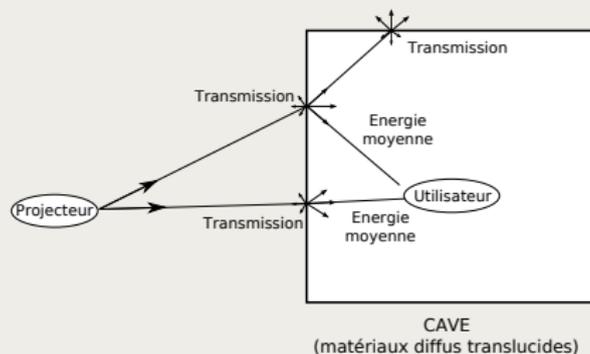
- conclusion :
  - comportement intermédiaire diffus-spéculaire
  - matériaux exploitables pour la projection
  - perte d'énergie importante



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

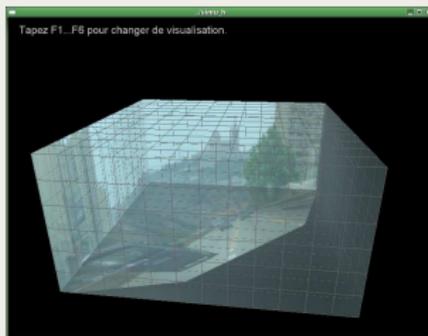


J. Dehos, E. Zéghers, L. Sarry, F. Rousselle, C. Renaud : *Analyse en simulation de projection immersive par l'avant*, AFIG 2010, primé 2<sup>e</sup> meilleur papier



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

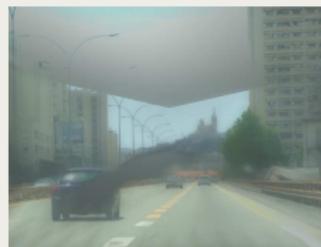
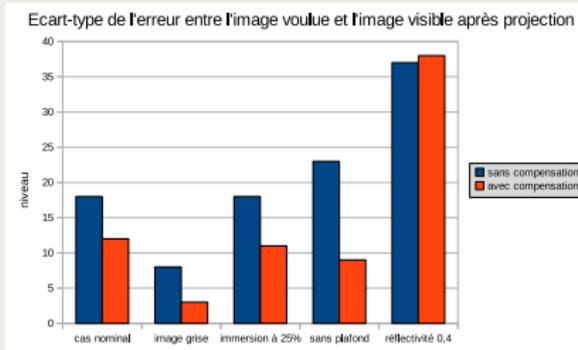
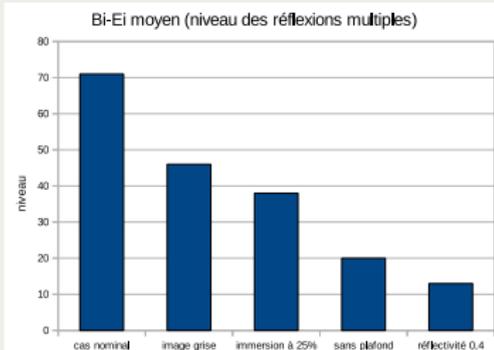
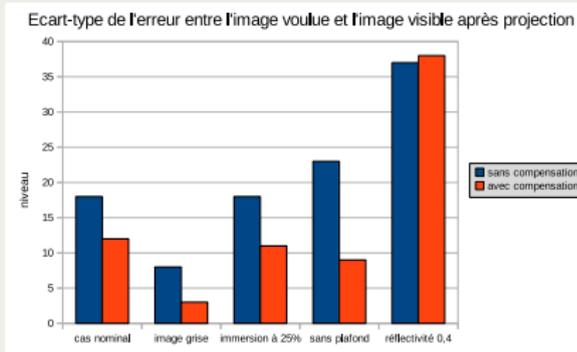
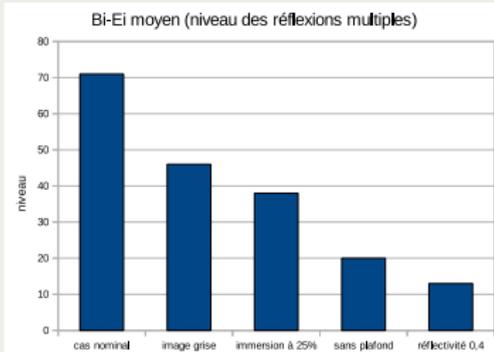


image visible  
avec compensation

## Analyse



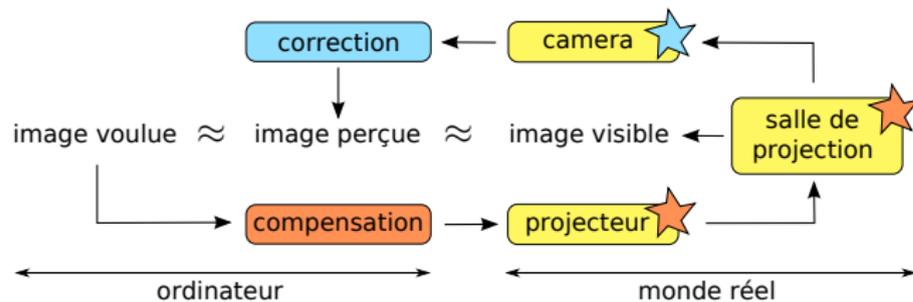
## Analyse



## 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

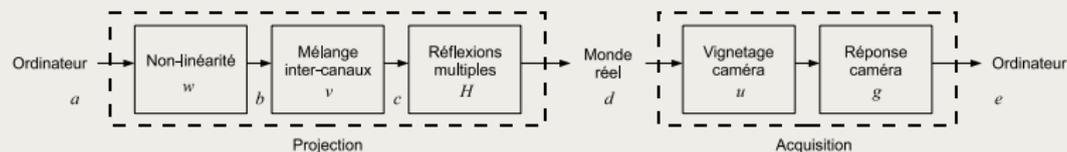


J. Dehos, E. Zéghers, F. Rousselle, C. Renaud, L. Sarry : *Compensation radiométrique d'un système de projection immersive grand-public*, AFIG 2008

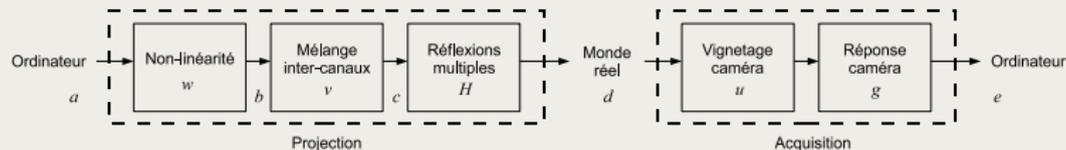


Projet DUT : Compensation radiométrique, 2008

## 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

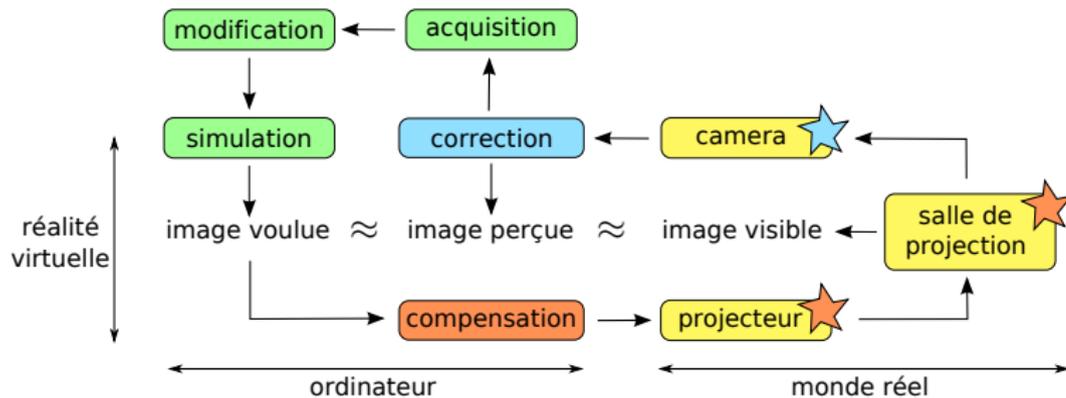


sans compensation



avec compensation





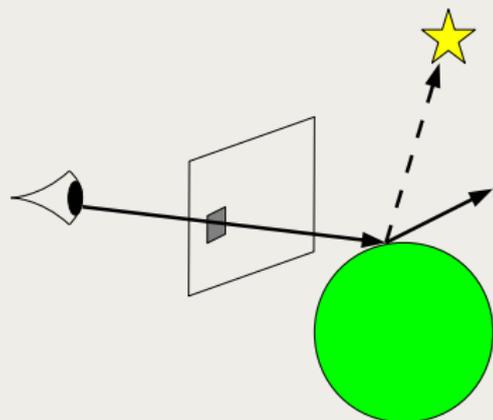
### Problématique

- 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



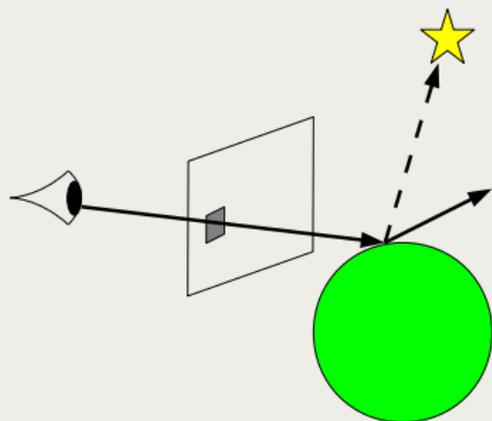
Projet DUT : Bibliothèque de projection catadioptrique, 2009

### Lancer de rayons



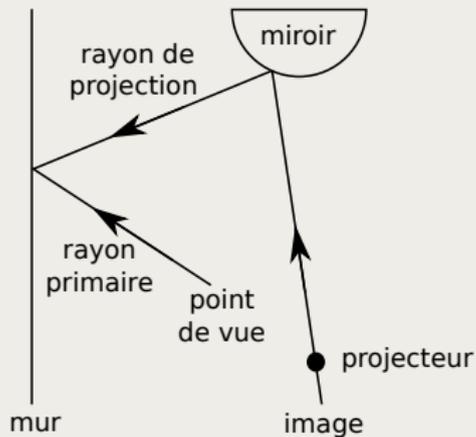
- algorithme récursif

## Lancer de rayons



- algorithme récursif

## Application à Catopsys

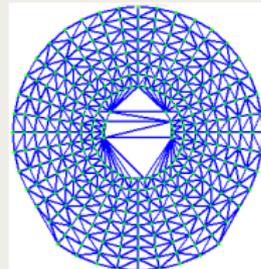


- rayons primaires précalculés

Données fournies par le SP1



maillage 3D

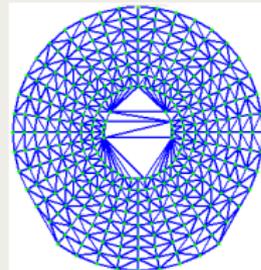


maillage 2D

## Données fournies par le SP1

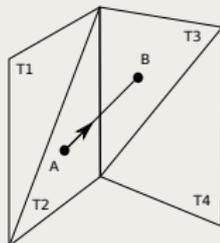


maillage 3D



maillage 2D

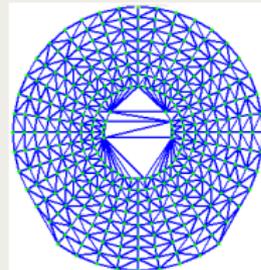
## Problème à résoudre



## Données fournies par le SP1

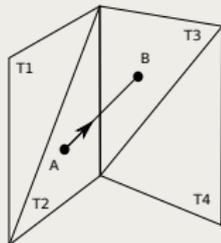


maillage 3D



maillage 2D

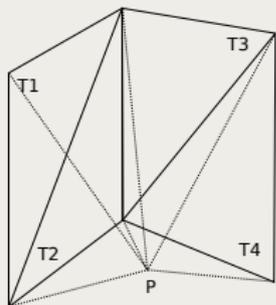
## Problème à résoudre



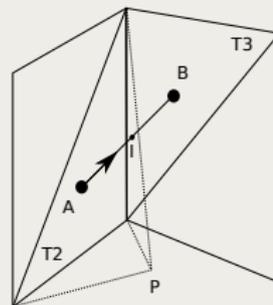
## Méthodes

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

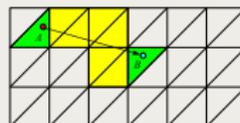
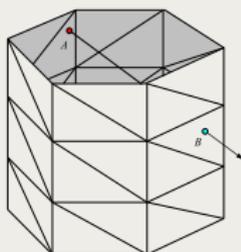
## Partitionnement de la scène 3D



partitionnement en tétraèdres



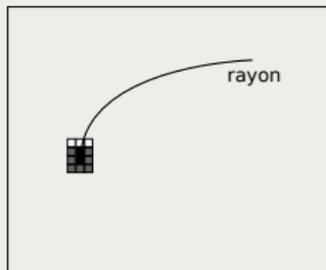
parcours entre tétraèdres



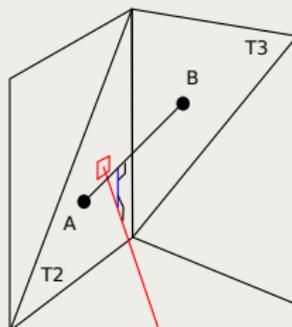
parcours dans la scène

## Parcours dans la carte projecteur

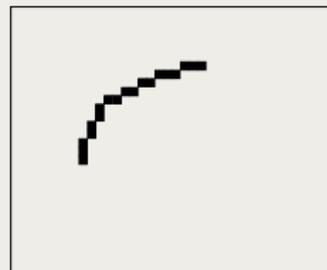
- trouver le pixel suivant
- tester l'intersection rayon-scène dans la carte projecteur



parcours de proche en proche



distance entre rayons



résultat du parcours

## Estimation de trajectoires 2D

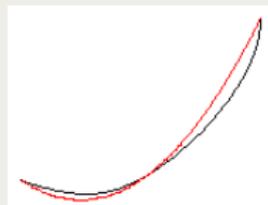
- calculer plusieurs points
- estimer la trajectoire
- parcourir la trajectoire



interpolation

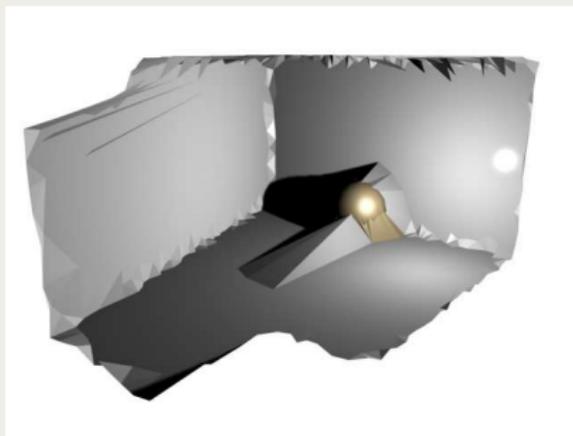


arc d'ellipse



parabole

Résultats (1)



scène à simuler

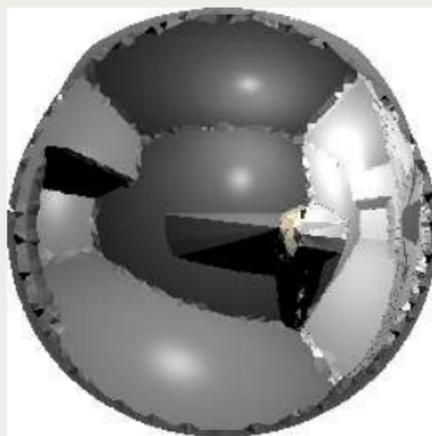
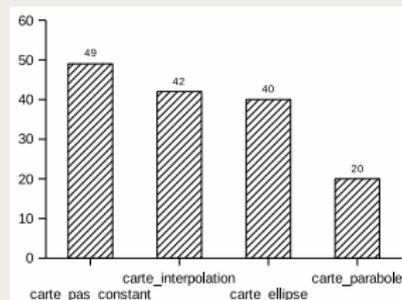
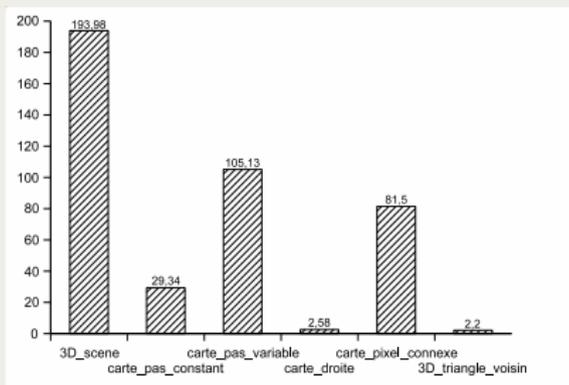


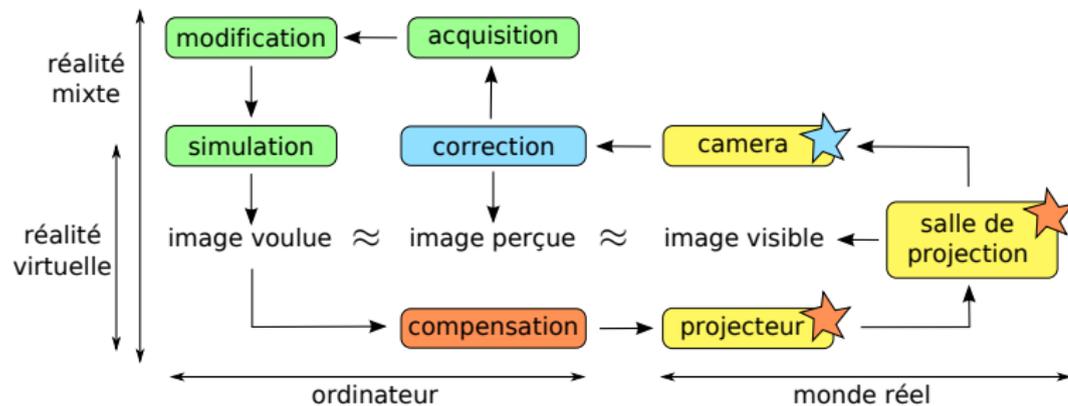
image à projeter

## 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)

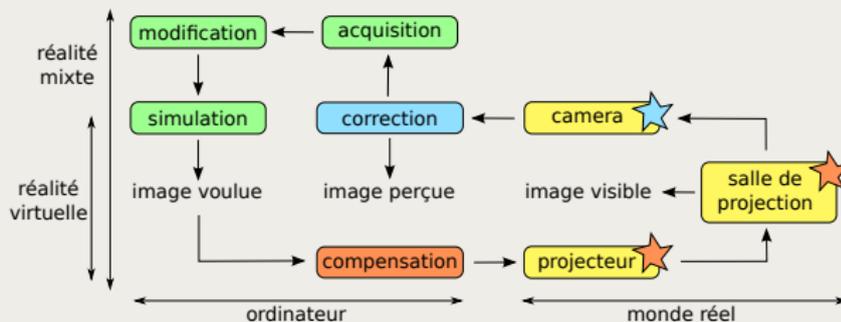
## Travaux réalisés

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

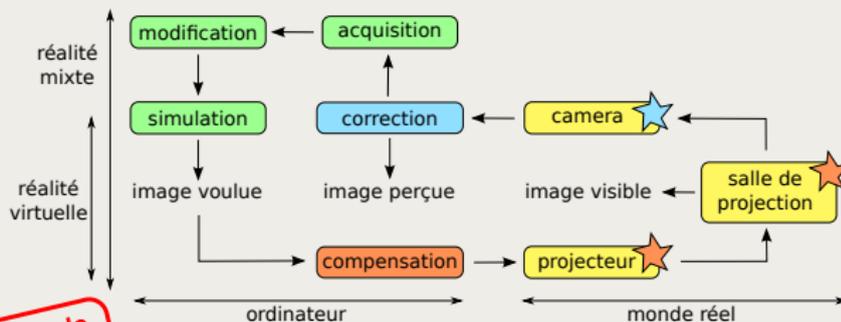
## Bilan par rapport au projet Catopsys

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

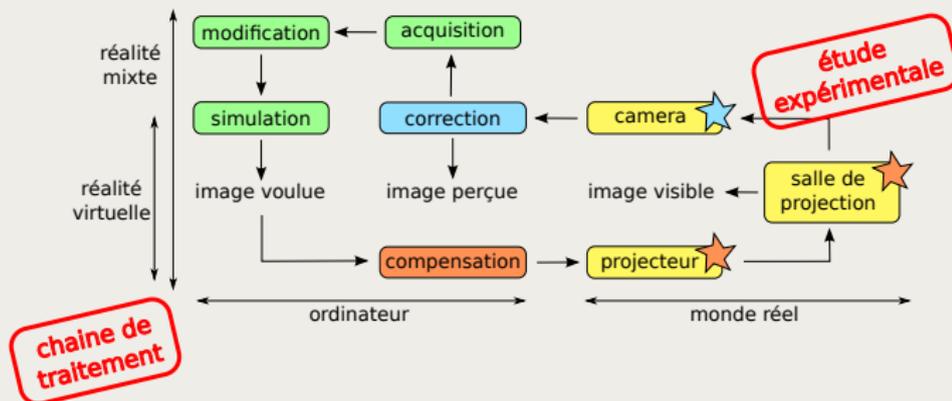
## Contributions



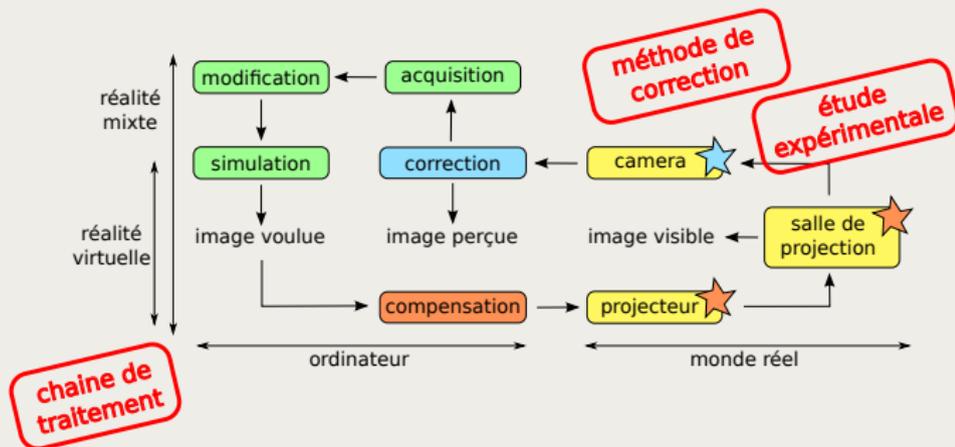
## Contributions



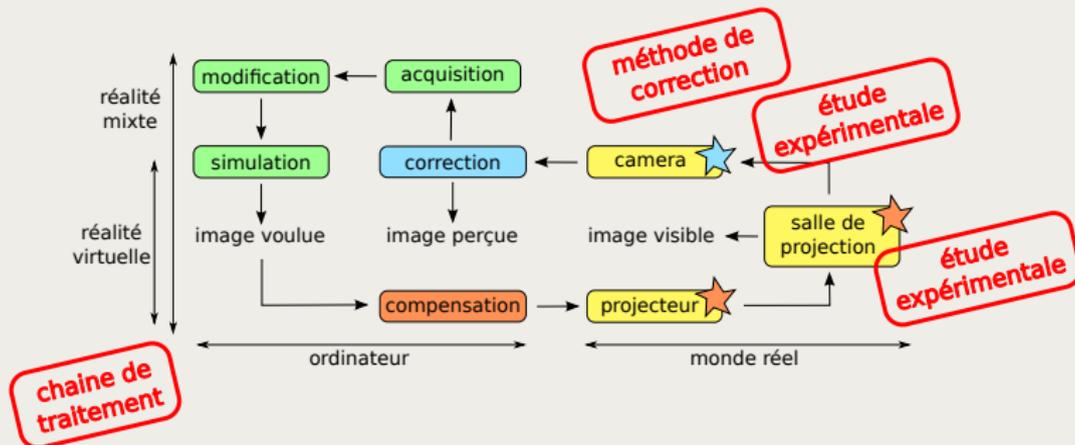
## Contributions



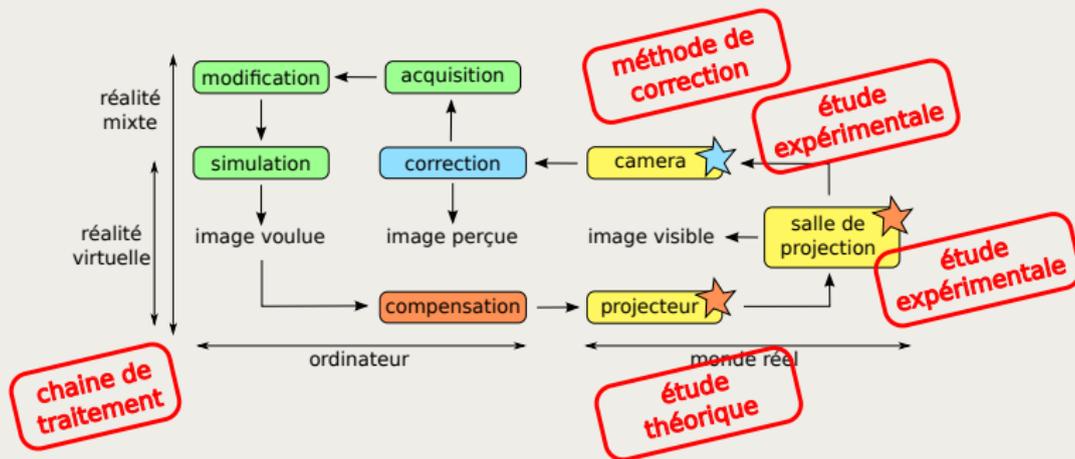
## Contributions



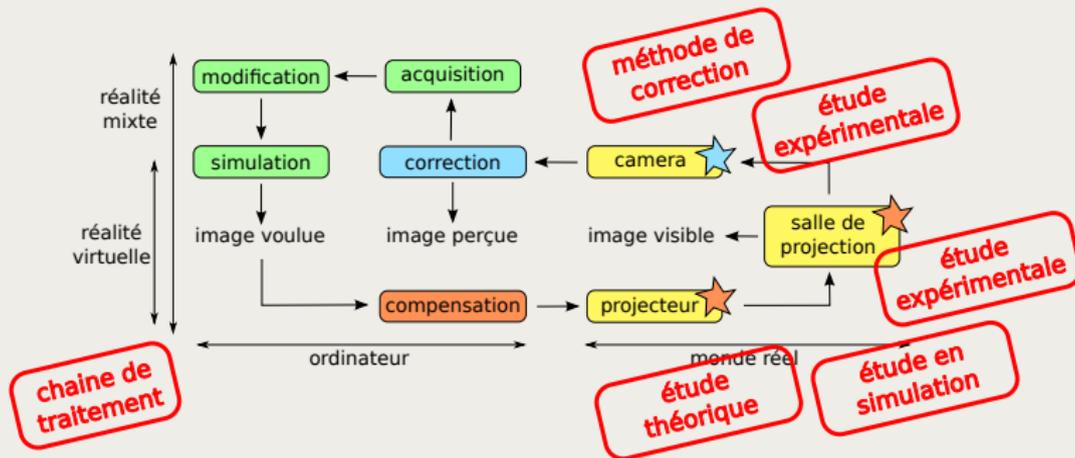
## Contributions



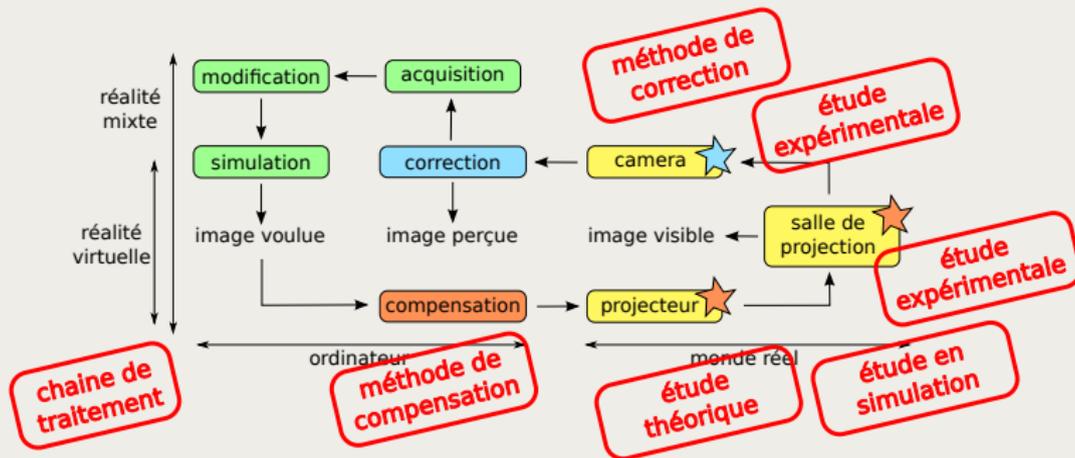
## Contributions



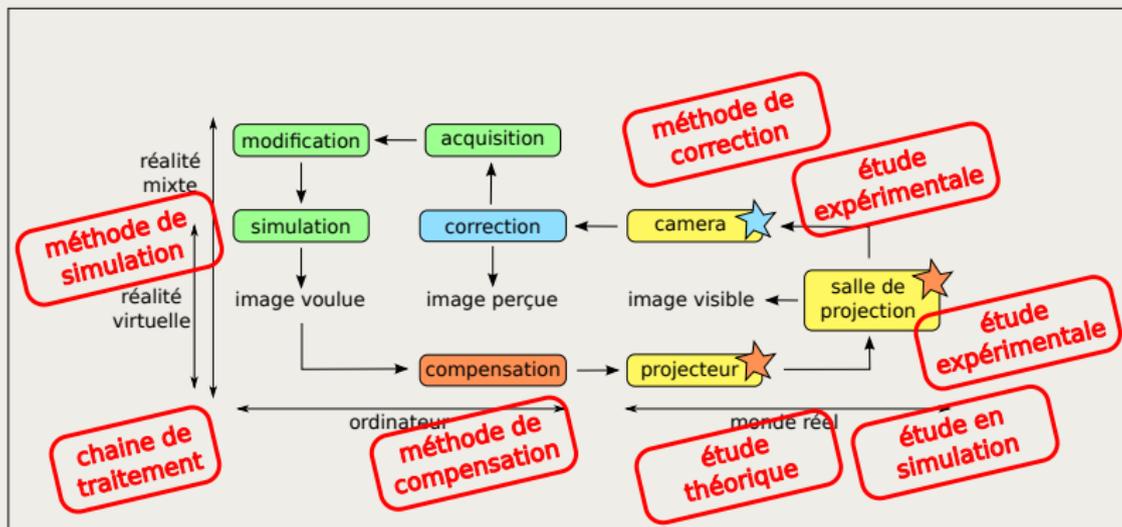
## Contributions



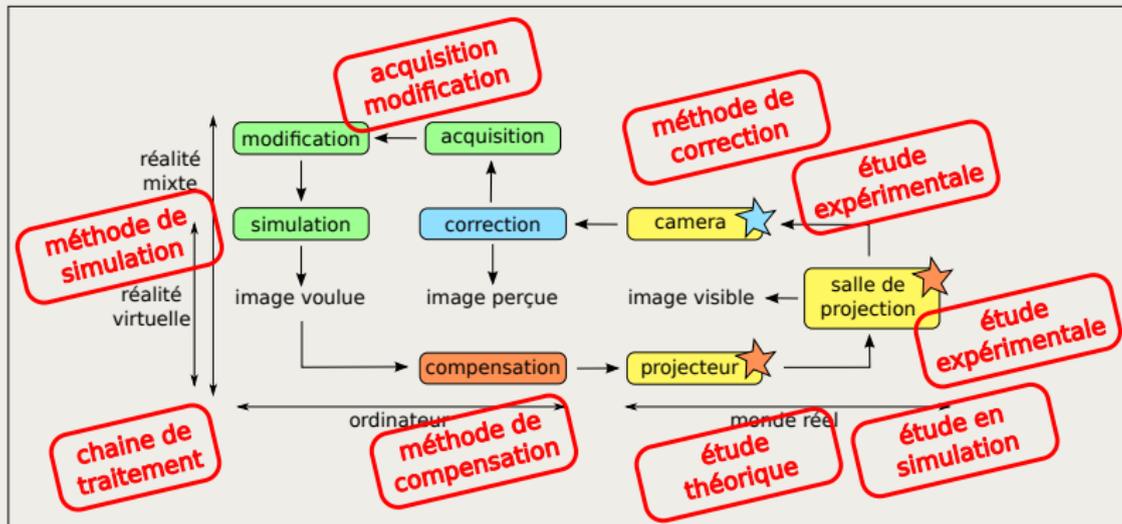
## Contributions



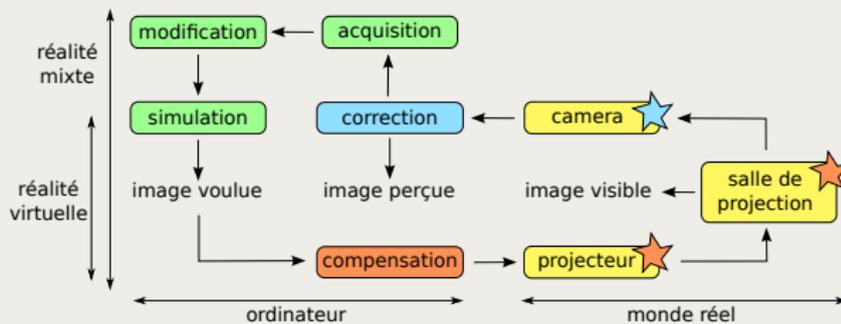
## Contributions



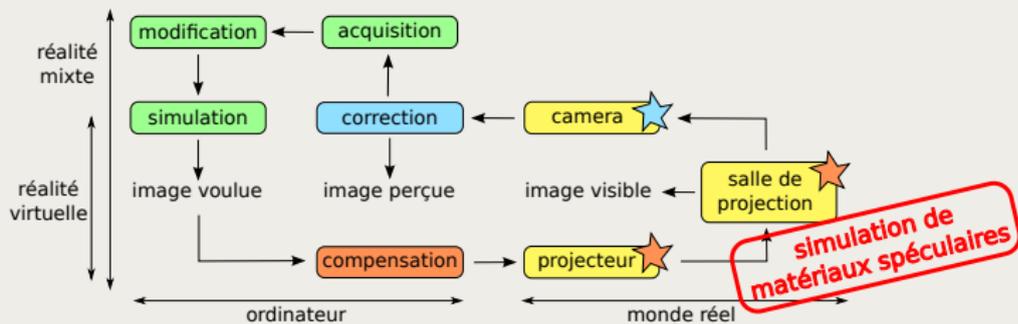
## Contributions



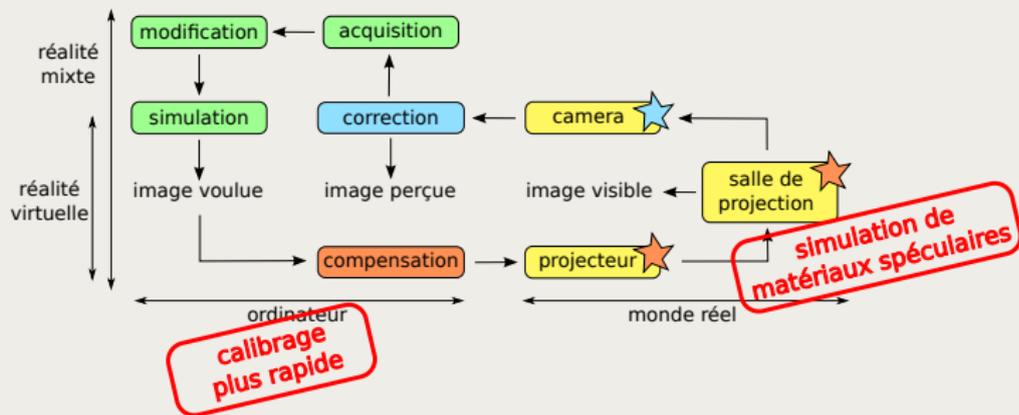
## Perspectives



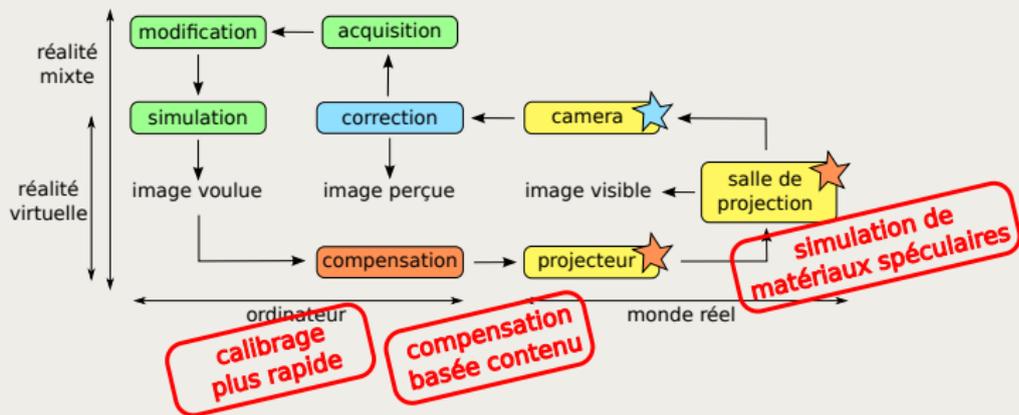
## Perspectives



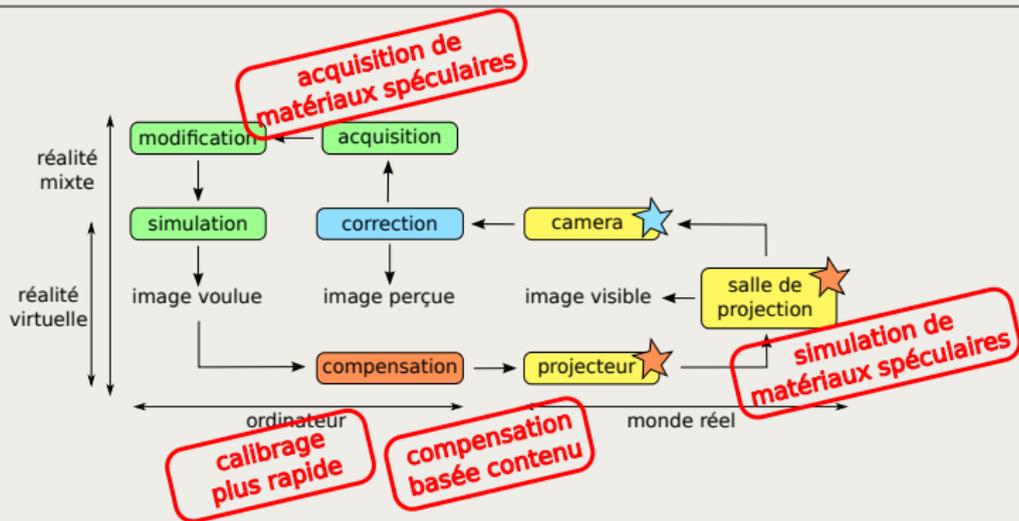
## Perspectives



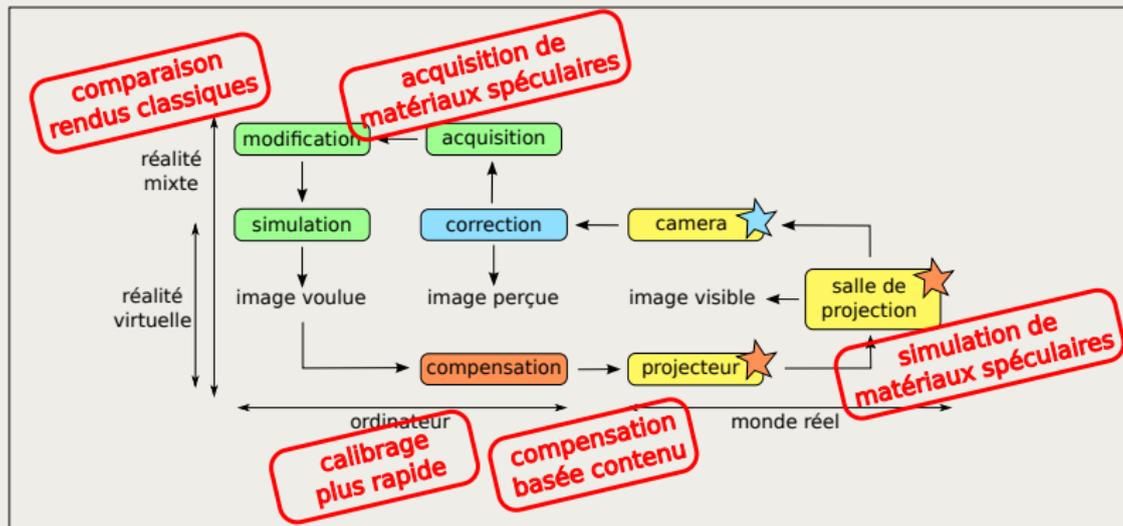
## Perspectives



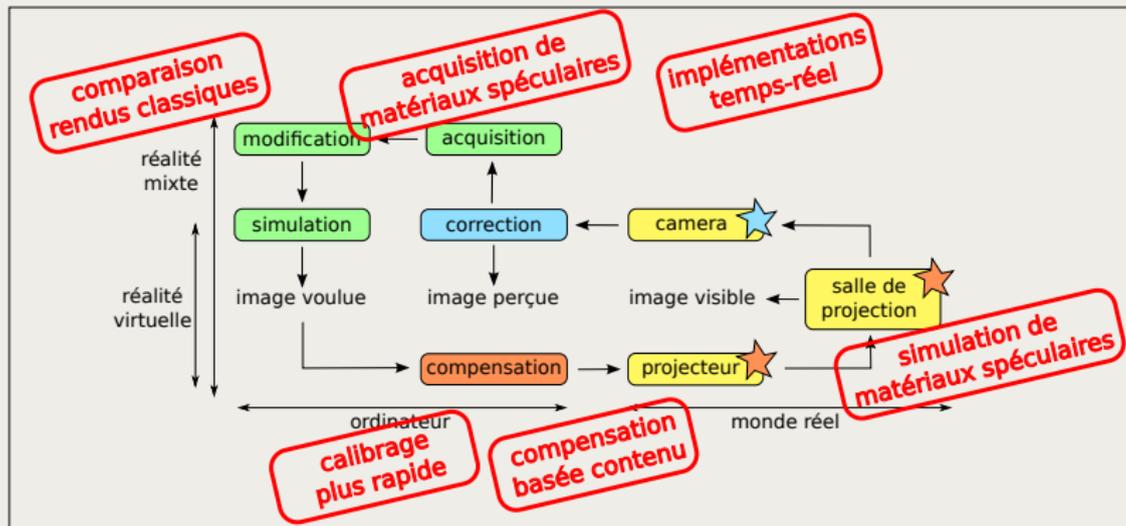
## Perspectives



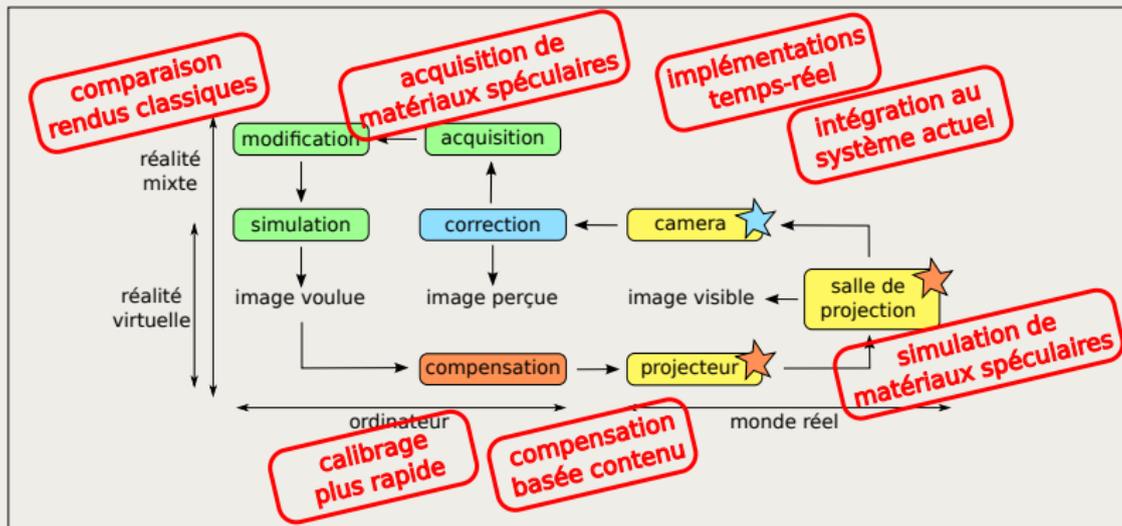
## Perspectives



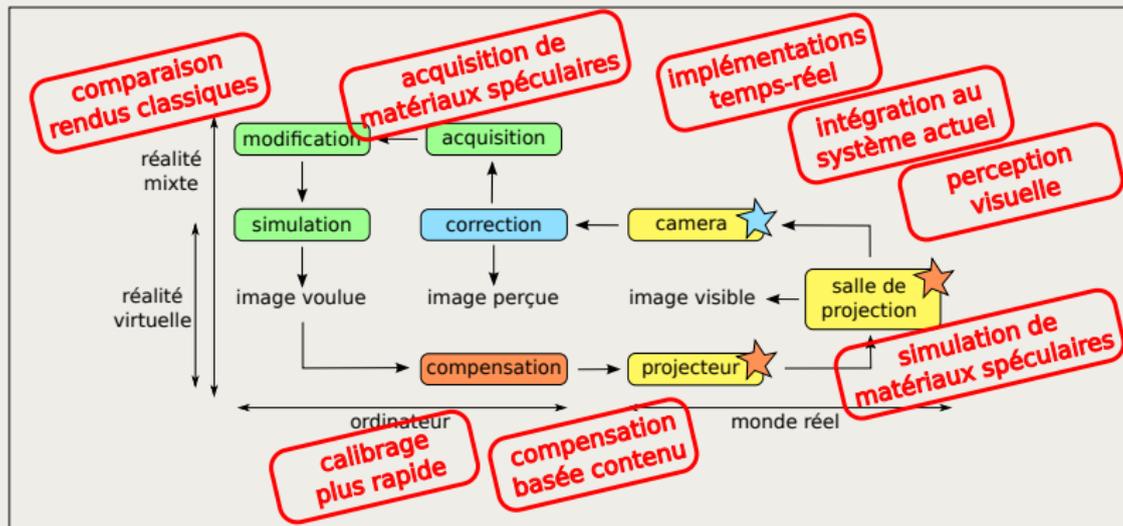
## Perspectives



## Perspectives



## Perspectives



## Publications

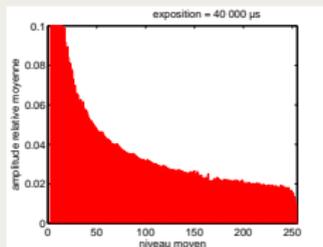
- Conférence internationale :
  - J. Dehos, E. Zéghers, C. Renaud, F. Rousselle, L. Sarry : *Radiometric compensation for a low-cost immersive projection system*, VRST 2008
- Revue nationale :
  - J. Dehos, E. Zéghers, F. Rousselle, C. Renaud, L. Sarry : *Compensation radiométrique d'un système de projection 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<sup>e</sup> 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

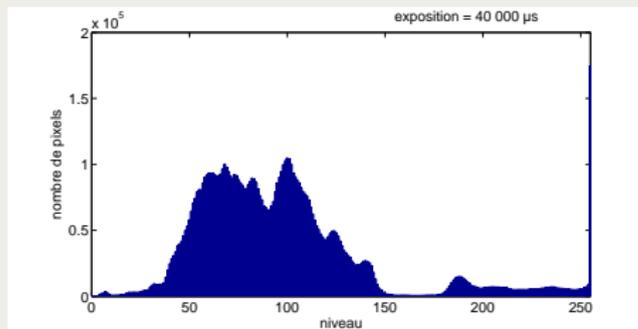
- vidéo de présentation
- démonstration
- questions et remarques

# Annexes

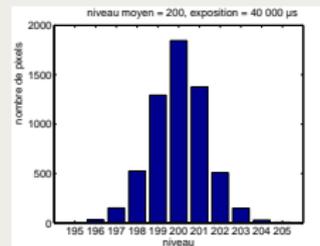
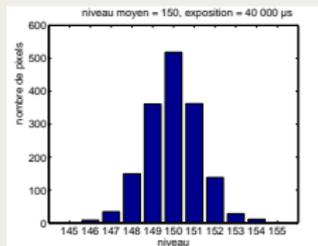
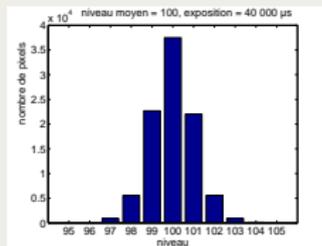
## Canal rouge



amplitude relative du bruit

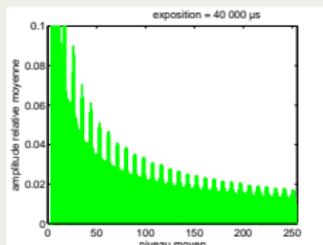


histogramme type

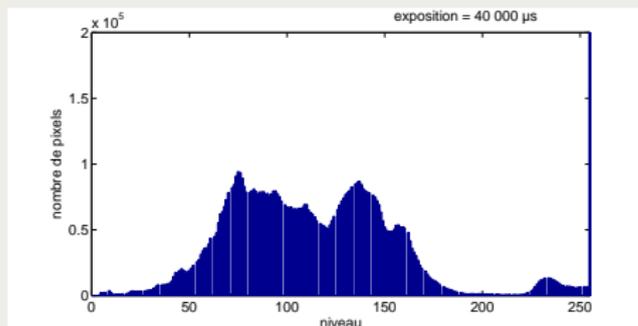


distribution du bruit

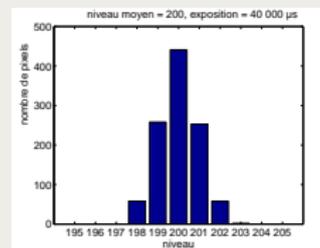
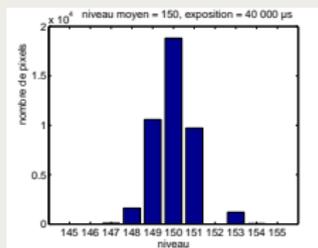
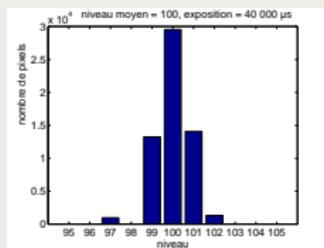
## Canal vert



amplitude relative du bruit

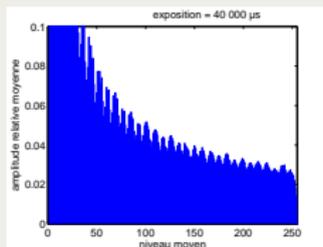


histogramme type

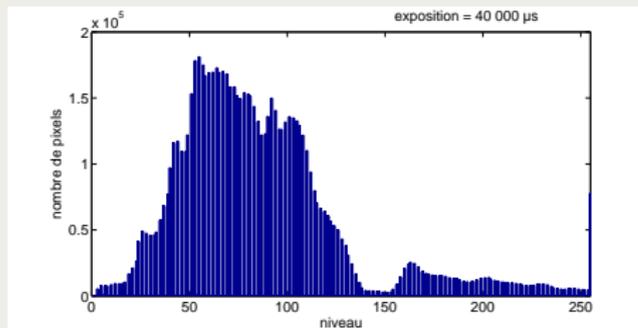


distribution du bruit

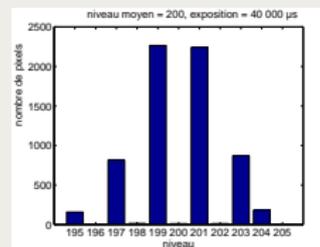
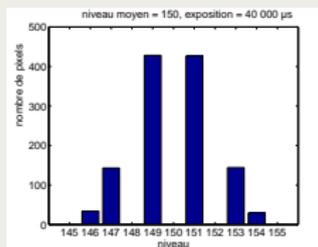
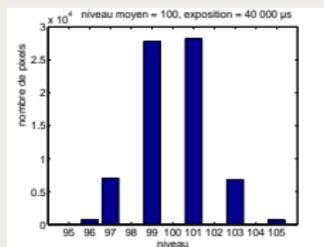
## Canal bleu



amplitude relative du bruit



histogramme type



distribution du bruit

## Mapping caméra-projecteur



image caméra

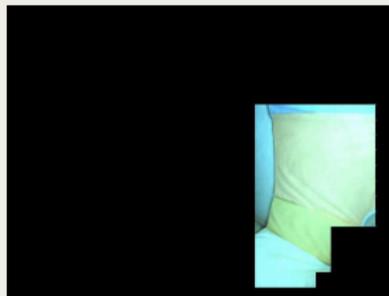


image projecteur partielle

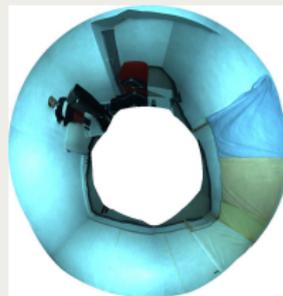
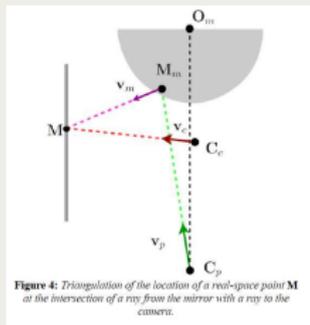


image projecteur complète

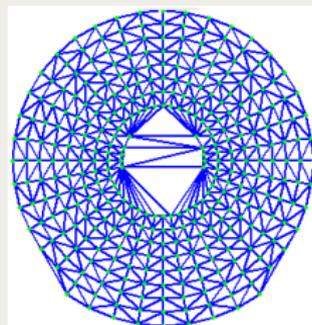
## Triangulation



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

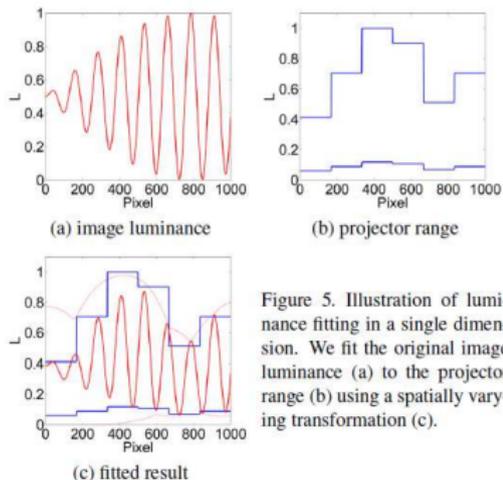


Figure 5. Illustration of luminance fitting in a single dimension. We fit the original image luminance (a) to the projector range (b) using a spatially varying transformation (c).

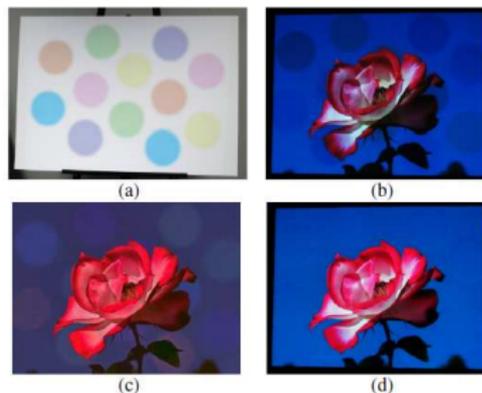
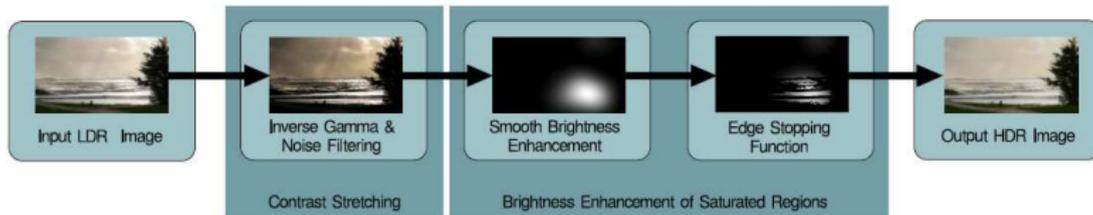


Figure 1. A patterned projector surface (a) will affect a projected image (b) but we generate a compensation image (c) that removes the irregularities (d).



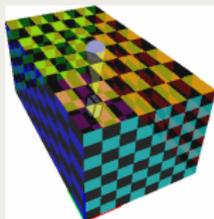
Ashdown, Okabe, Sato, Sato, *Robust Content-Dependent Photometric Projector Compensation* CVPRW, 2006

## 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

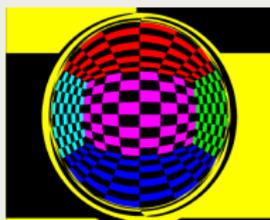


image à projeter

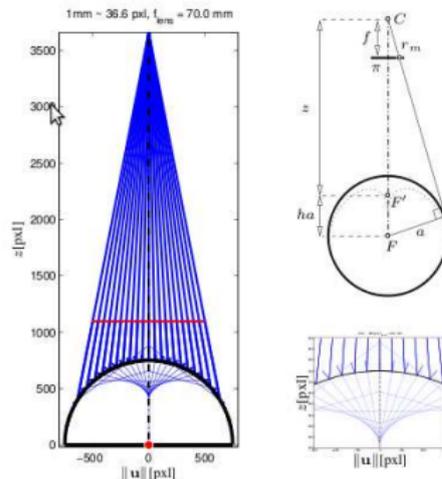


Figure 3: Rays reflected by the mirror are tangent to a caustic surface. Left: A perspective camera looking at a spherical mirror. Right top: An approximation of a non-central spherical model by a central one with a fictive viewpoint  $F'$ . Right bottom: A detail view of the caustic.

déformation du miroir

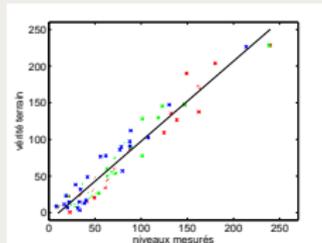
### Optimisations classiques

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

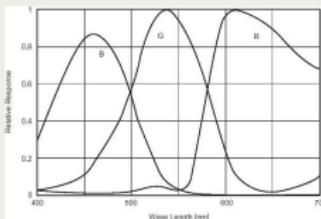
### Optimisations des parcours 2D

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

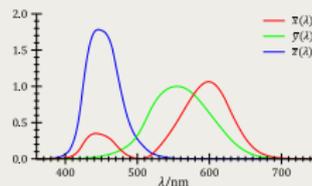
## Évaluation du calibrage



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