

Au-delà de l'imagerie traditionnelle

Intégration optique et informatique

xavier.granier@institutoptique.fr

Un immense merci !

Patrick Reuter

Brett Ridel

Romain Pacanowski

Thomas Crespel

Antoine Lucat

Ivo Ihrke

Adrian Travis

Pascal Guitton

Plan

- 1.Introduction
- 2.L'exemple de la réalité augmentée spatiale
- 3.Vers des grandeurs physiques : HDR
- 4.Calibrer et optique non-conventionnelle
- 5.Vers le plénoptique
- 6.Conclusion

1

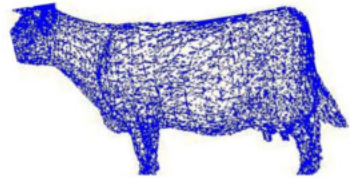
Introduction

Du monde réel au monde virtuel

Monde réel



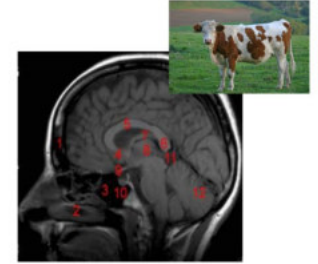
Modélisation
Acquisition



Monde virtuel



Synthèse



Optique
Perception
Synthèse

Quelles sont les compétences mises en jeu ?

Curiosité

Arts

Physique

Observation

Electronique

Mathématiques

Biologie

Sciences humaines

Optique

Informatique

Informatique Graphique



Autre vision du problème

- On observe / mesure / affiche **une combinaison**
 - Influence de la forme ? La lumière ? La matière ?
 - Une infinité de manière d'arriver au même résultats



Vangorp – SIGGRAPH 2007

Autre vision du problème

- On observe / mesure / affiche **une combinaison**
 - Influence de la forme ? La lumière ? La matière ?
 - Une infinité de manière d'arriver au même résultats
- Indépendance → processus **faiblement optimisée**
 - Ex1: mesures / modèles trop complexes pour être utilisés
 - Ex2: simulation / affichage de détails invisibles
- Besoin : **approche globale mais spécialisée**
 - Un seul objectif, le signal observé
 - Objectif : faciliter la communication réel - virtuel
- **Co-Conception**

2

Exemple de la réalité augmentée spatiale

Réalité augmentée spatiale

- Monde réel = afficheur
 - Projection
 - Suivi de geste



ACM JOCCH 2014

Réalité augmentée spatiale

- Monde réel = afficheur
 - Projection
 - Suivi de geste



- Installations muséales



Mercati di Traiano
Museo dei Fori Imperiali



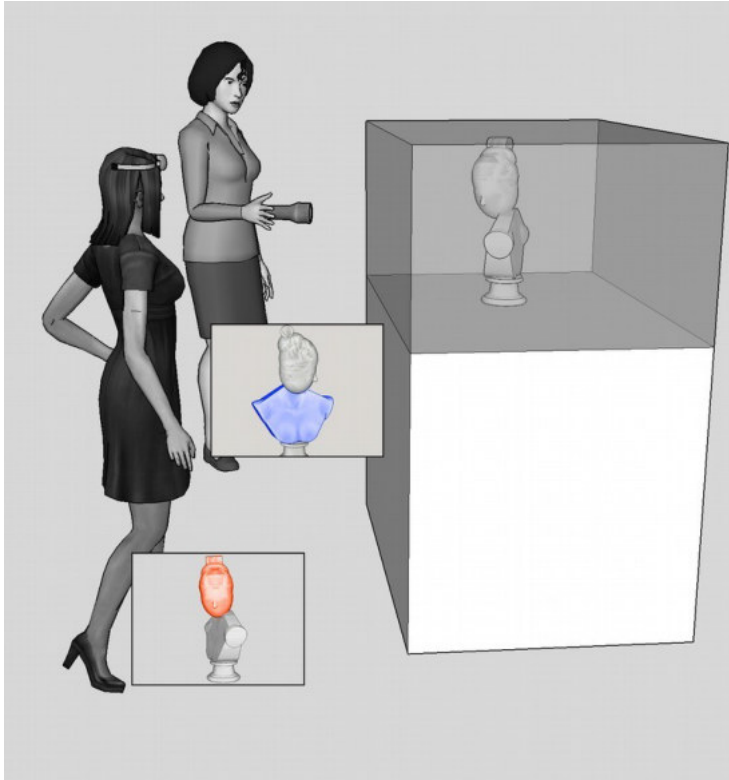
ACM JOCCH 2014

Limitations

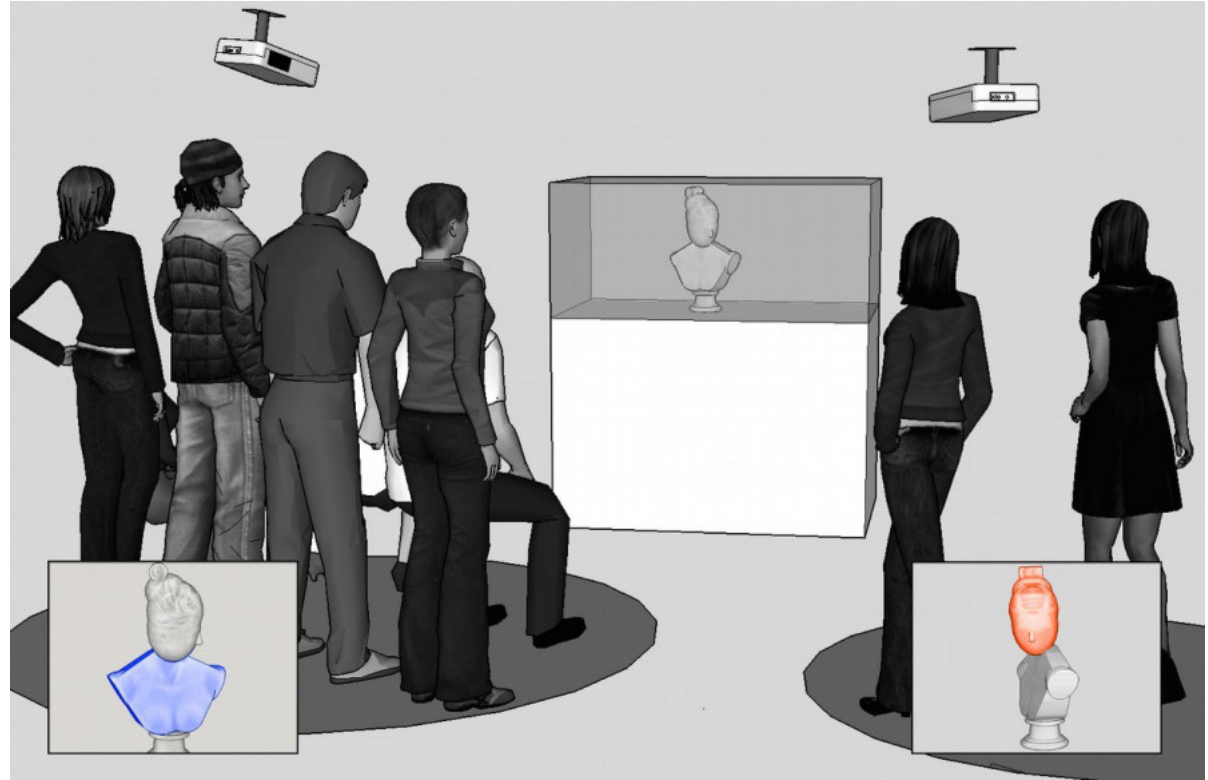
- Pas vraiment applicable pour de grandes installations
 - Une seule personne peut interagir
 - Même vue pour tous
- Les besoins
 - Plusieurs usagers
 - Des expériences visuelles différenciées

EgoSAR - Proposition de 2 scenarii

IEEE ISMAR 2016



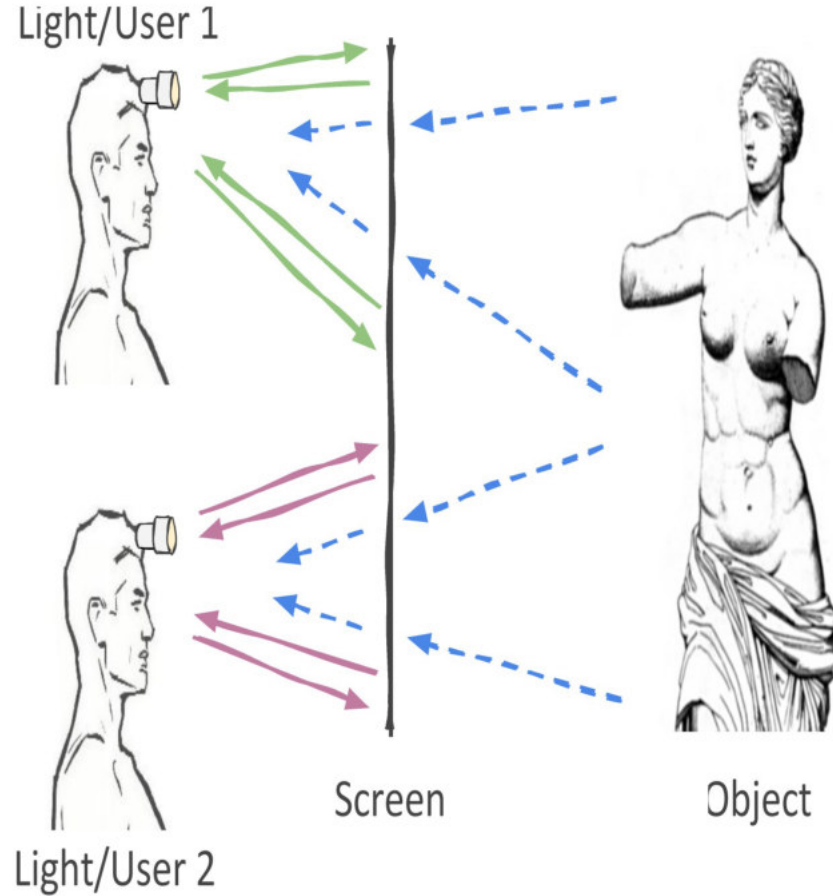
Usagers actifs



Usagers passifs

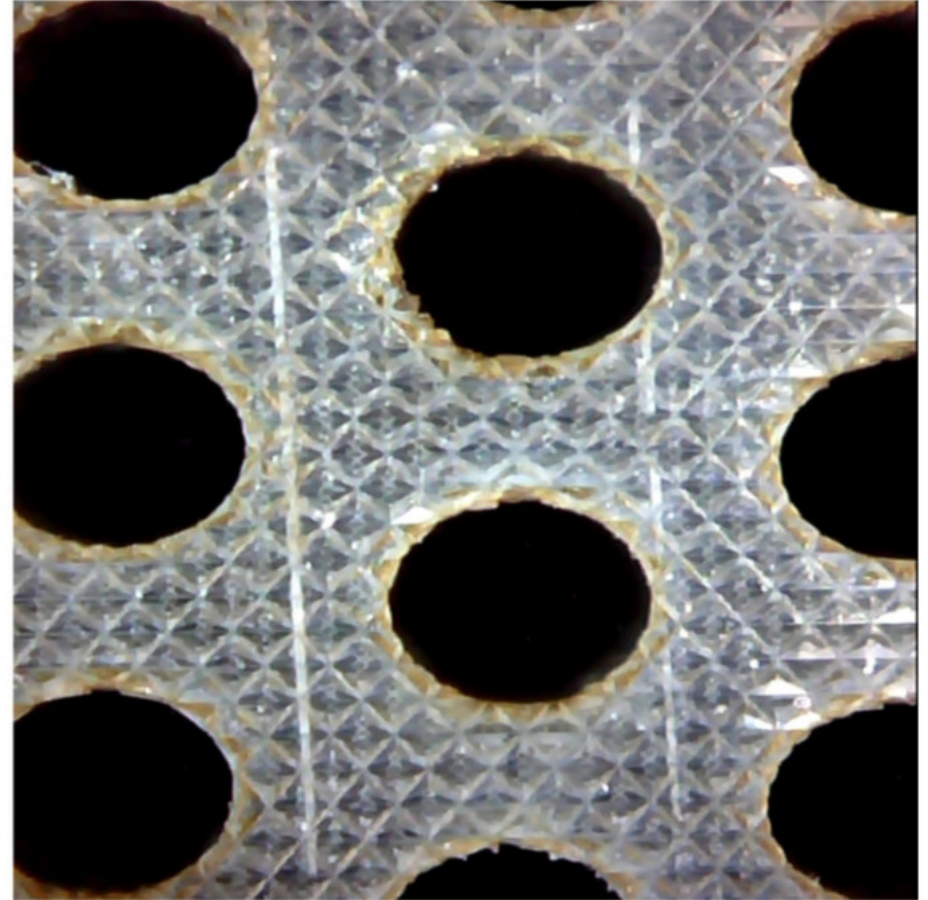
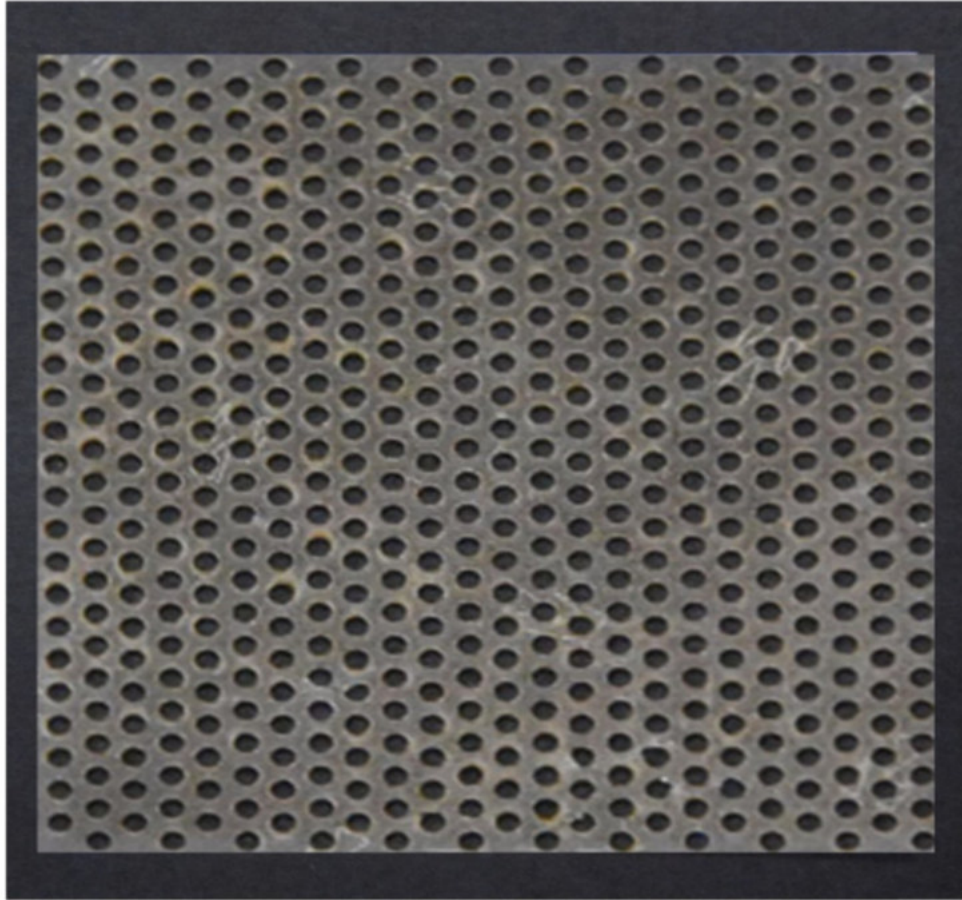
EgoSAR : une vitrine rétro-réfléchissante

IEEE ISMAR 2016



1^{er} prototype : film rétro réfléchissant perforé

IEEE ISMAR 2016



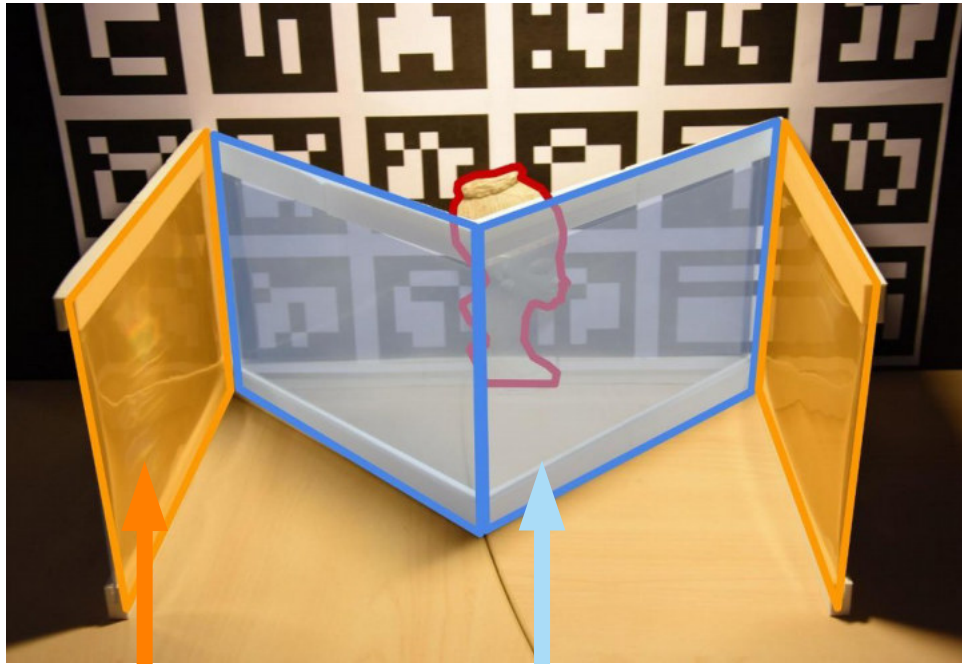
1^{er} prototype : film rétro réfléchissant perforé

IEEE ISMAR 2016



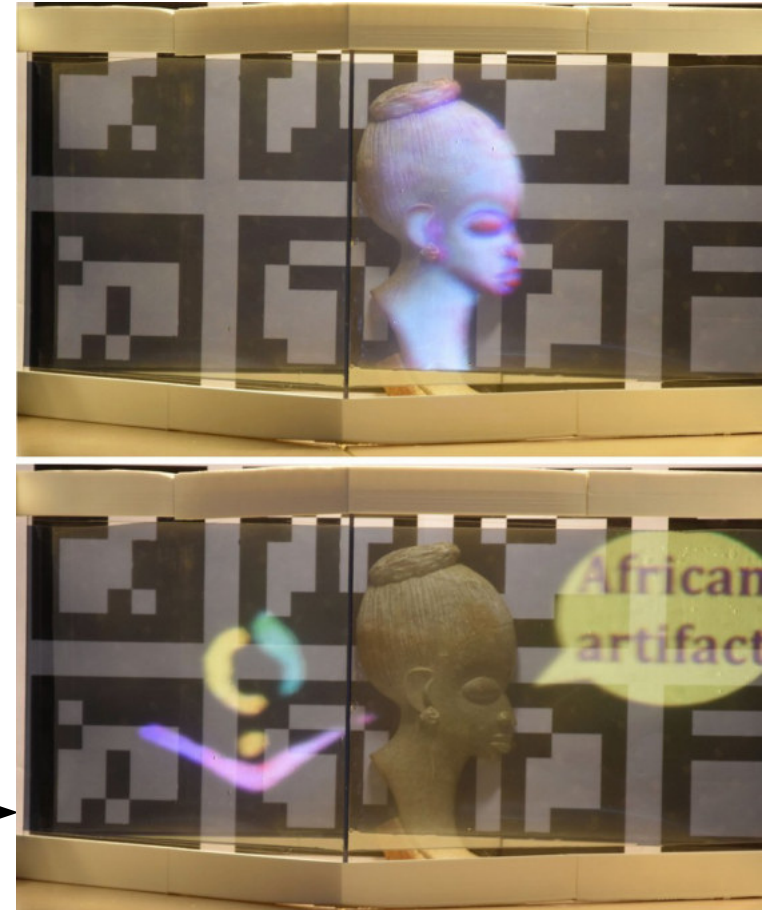
2nd prototype : rétro réflexion indirecte

IEEE ISMAR 2016

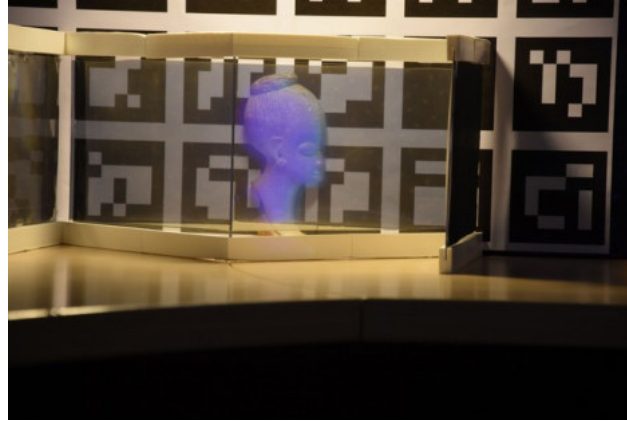
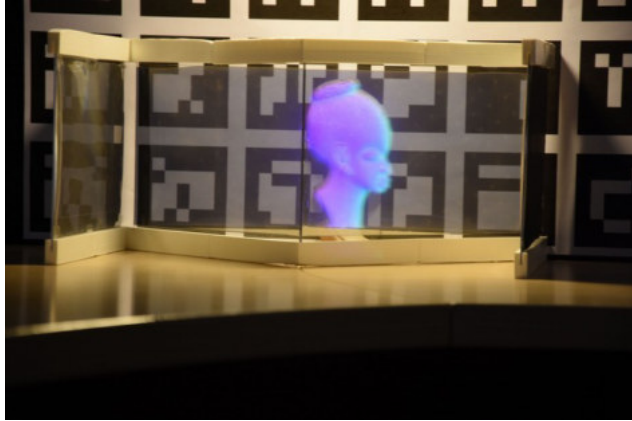


Rétro réflexion Lame semi-transparent

Augmentation personnalisée et dépendante du point de vue



Déplacement du point de vue sur la droite



3

Vers des grandeurs physiques : HDR

Capturing, Representing, and Manipulating High Dynamic Range Imagery (HDRI)



Dynamic Range in the Real World



Sony VX2000 video camera

Office interior

Indirect light from
window

1/60th sec shutter

f/5.6 aperture

0 ND filters

0dB gain

Dynamic Range in the Real World



Outside in the shade

1/1000th sec shutter

f/5.6 aperture

0 ND filters

0dB gain

16 times the light as inside

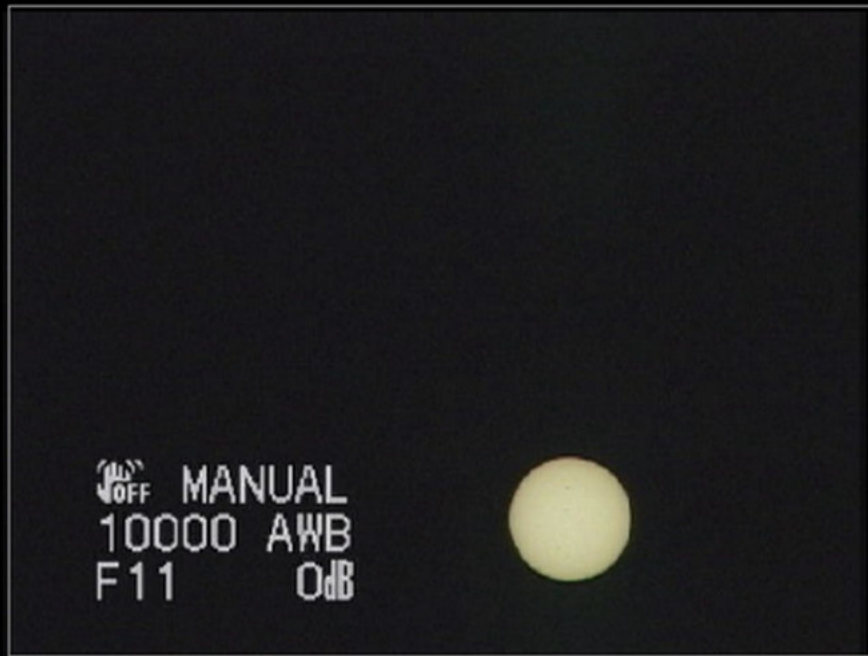
Dynamic Range in the Real World



Outside in the sun
1/1000th sec shutter
f/11 aperture
0 ND filters
0dB gain

64 times the light as inside

Dynamic Range in the Real World



Straight at the sun
1/10,000th sec shutter
f/11 aperture
13 stops ND filters
0dB gain

5,000,000 times the light as inside

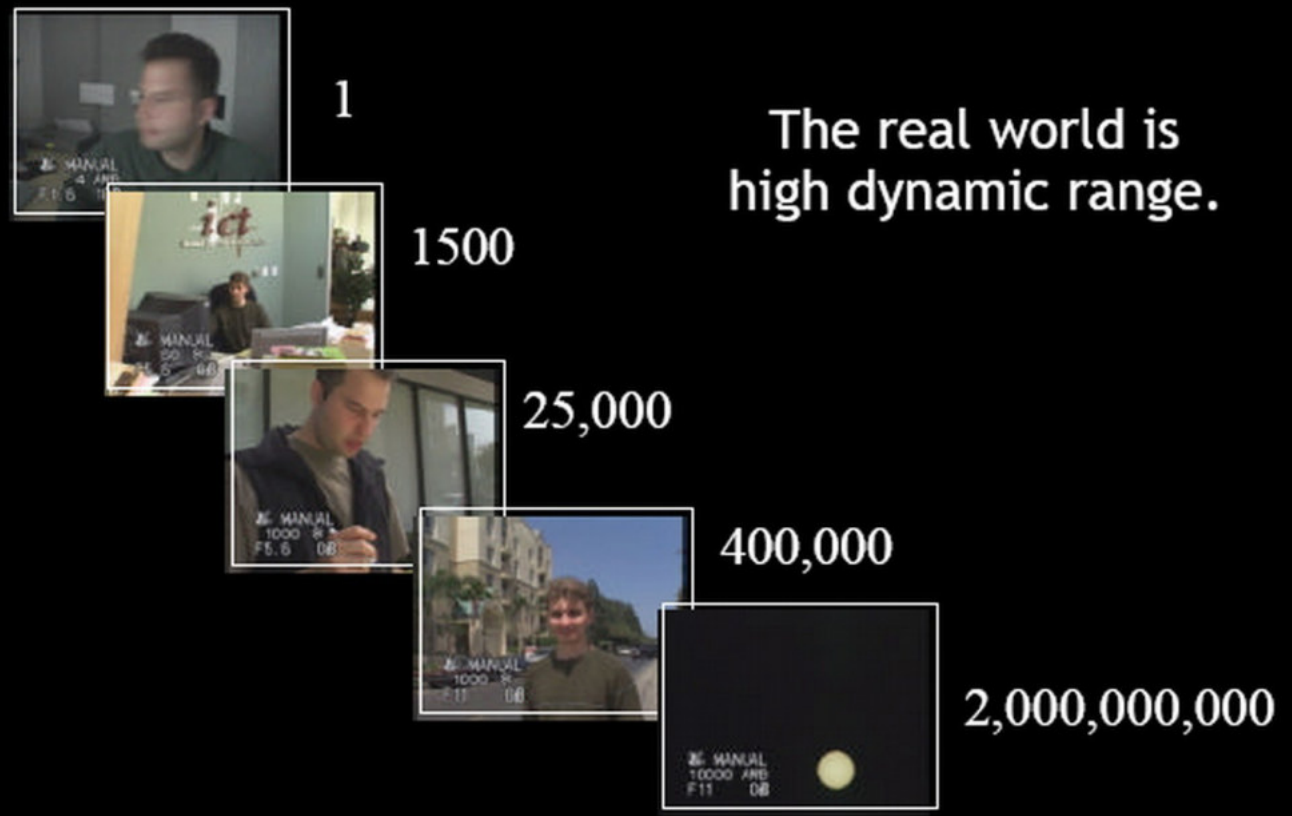
Dynamic Range in the Real World



- Very dim room
- 1/4th sec shutter
- f/1.6 aperture
- 0 stops ND filters
- 18dB gain

1/1500th the light than inside

Dynamic Range in the Real World



HDR : un peu d'histoire

- 1850 ~ Gustav Le Gray – combinaison de négatifs
- 1940 ~ Charles Wyckoff – Photos d'explosion nucléaire
- 1980 ~ Usage propriétaire dans l'industrie du film
- **1985 : Premier format HDR par Gregory Ward (Radiance)**
- 1997 : reconstruction HDR à partir de photographie par Debevec
 - The Campanile movie
- Premier programme d'édition d'images: HDRShop par Debevec
- 2004: Valve Software utilise le rendu HDR dans Half life 2

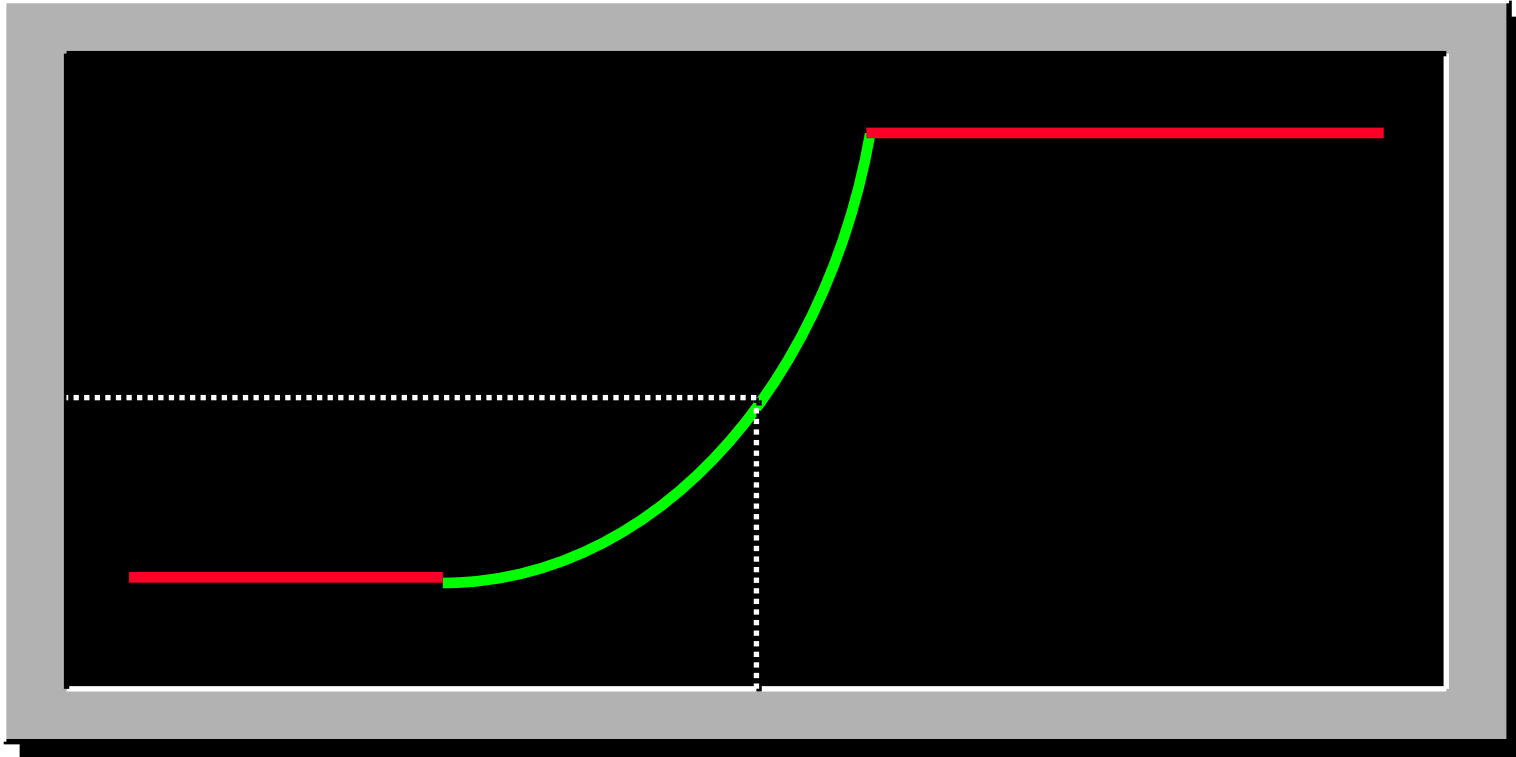
Capteur : processus physique

- Première action d'un capteur d'image
 - Énergie reçue \rightarrow volt (\sim linéaire)
- Seconde action d'un capteur
 - Volt \rightarrow valeurs relatives encodées sur X bits
 - Filtrage, réduction de bruit, interpolations (e.g., Bayer),

$$z_p = f(E_p \Delta t)$$

Courbe de réponse du système

Valeur
d'un pixel



$\log \text{ exposition} = \log (\text{éclairement} * \Delta t)$
Compte le nombre de photons

2 approches de la calibration du capteur

- 1) Approximation des mesures par un courbe de réponse pré-définie
 - Demande l'accès à des outils de radiométrie/photométrie
 - Ex : luminance mètre
 - Des sources de lumières variées et contrôlable souhaitable
 - Ex : sources calibrées, pièce noire, ...
- 2) Retrouver une courbe de réponse dans une base de fonctions
 - Multiplier les expositions d'une scène complexe
 - Nécessité d'une scène avec de forts contrastes

Conclusion

- Appareils photographiques classiques
 - Pas des outils de radiométrie !!!!
 - Mais traitement numérique + calibration → de vraie valeur radiométriques
- Limitations originelles
 - Dynamique limitée (avec un seuil de saturation)
 - Courbe de réponse pas nécessairement connue
 - Besoin d'une première calibration
 - Précision limitée
- Solution proposée
 - De multiples acquisitions pour retrouver des valeurs d'éclairement / de luminance

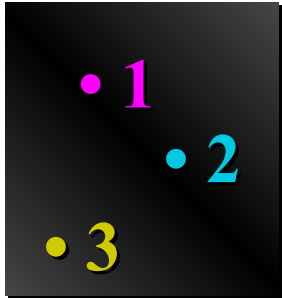
Comment obtenir une carte d'éclairement ?

- Solution matérielle dédiée
 - Toujours un limitation intrinsèque
- Solution mixte logicielle et matérielle
 - Combinaison de multiples images
 - Avec un variation de l'exposition

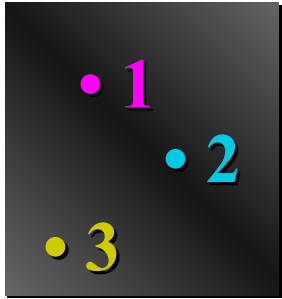
$$E_p \simeq \sum_k \frac{w(Z_{pk})}{\sum_k w(Z_{pk})} \frac{f^{-1}(Z_{pk})}{\Delta t_k}$$

Ex: Algorithme de Debevec et Malik (1997)

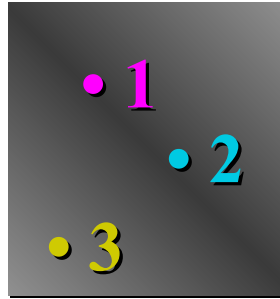
Un séquence d'images avec différent temps d'exposition



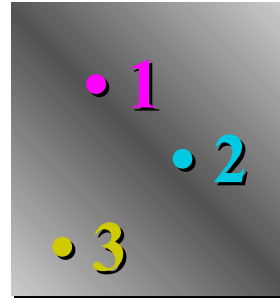
$\Delta t =$
1/64 sec



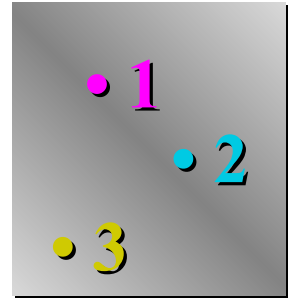
$\Delta t =$
1/16 sec



$\Delta t =$
1/4 sec



$\Delta t =$
1 sec



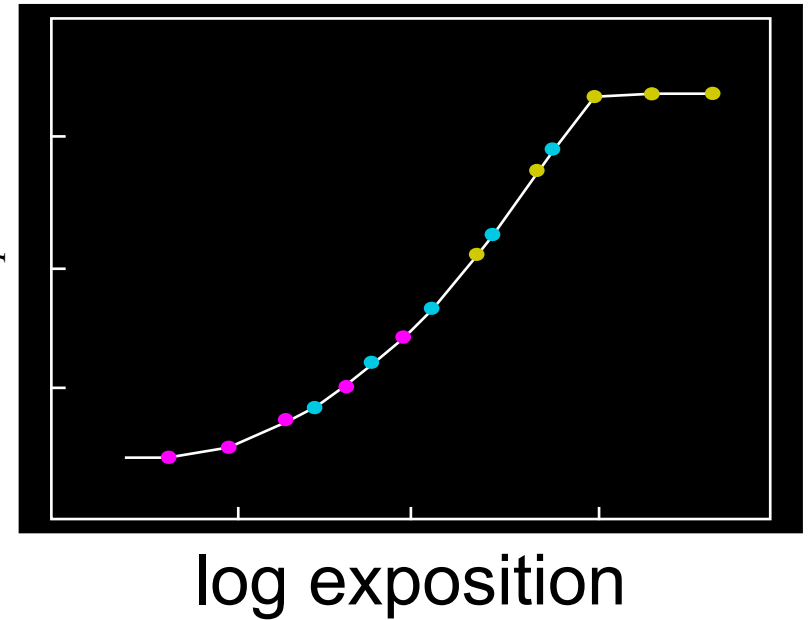
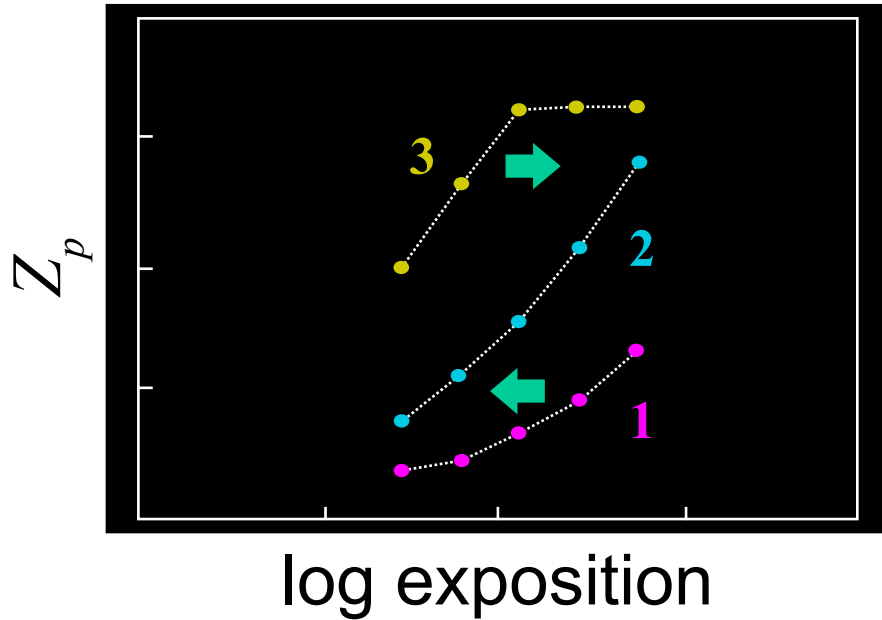
$\Delta t =$
4 sec

$$Z_{pk} = f(E_p \Delta t_k)$$

$$\log f^{-1}(Z_{pk}) = \log E_p + \log \Delta t_k$$

Trouver la courbe de réponse intrinsèque

Ajuster les valeurs de E_p pour obtenir une courbe monotone



Problème d'optimisation

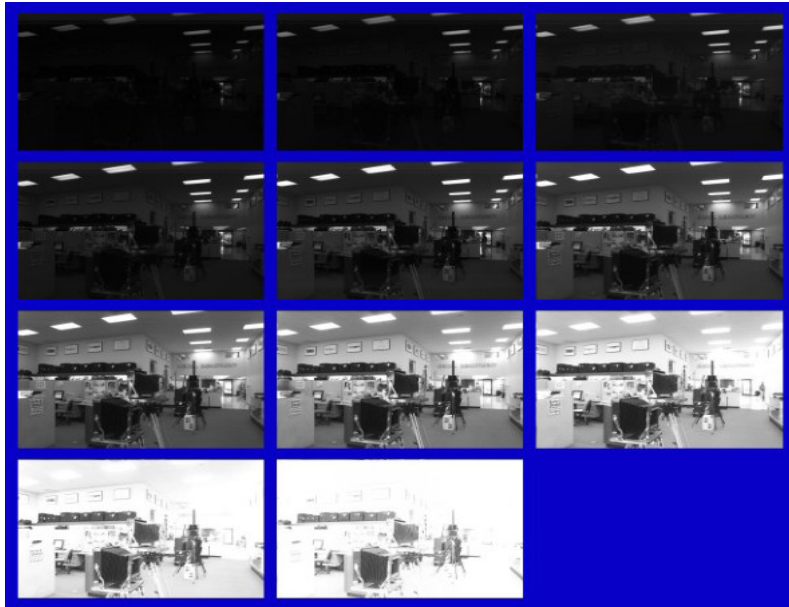
- $g(z)$
 - Logarithme de l'inverse de la courbe de réponse
 - Tabulée (base constante par morceau) $g(Z_{pk}) = \log E_p + \log \Delta_k$
- Mise en place du problème

Fonction d'objectif

$$\underbrace{\sum_k \sum_p \left[\log E_p + \log \Delta t_k - g(Z_{pk}) \right]^2}_{\text{Erreur Quadratique}} + \lambda \underbrace{\sum_{z=Z_{\min}-1}^{Z_{\max}+1} \partial_{zz}^2 g(z)^2}_{\text{Lissage / régularisation}}$$

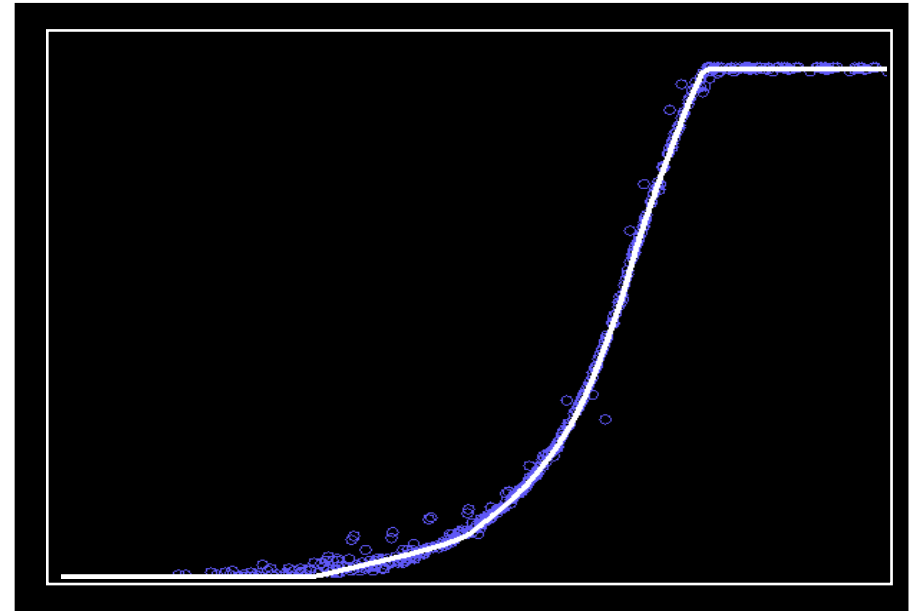
Résultat sur un Kodak DCS460

Temps d'exposition
de 1/30 à 30 sec



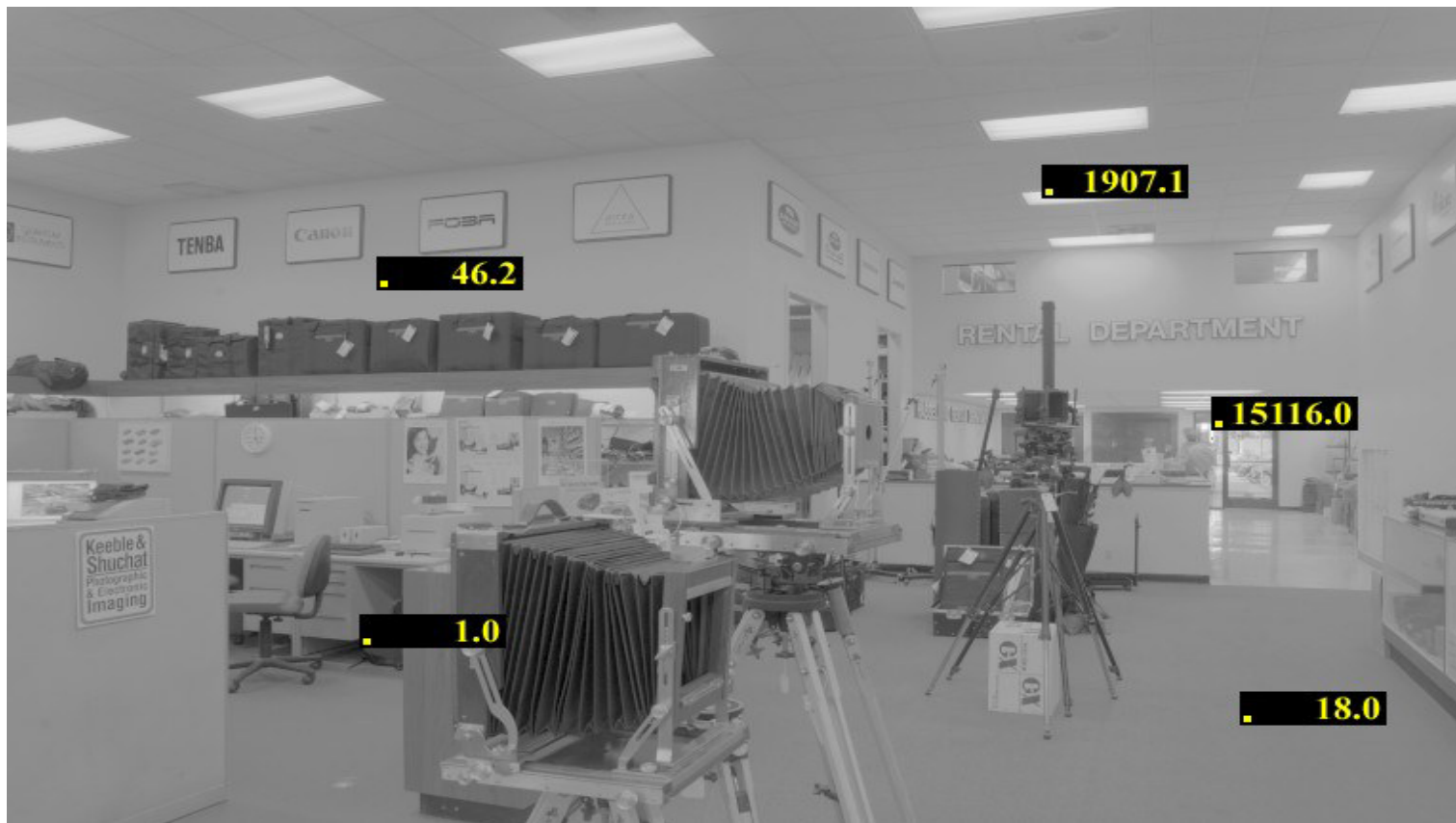
Courbe de réponse estimée

Z_p



log Exposition

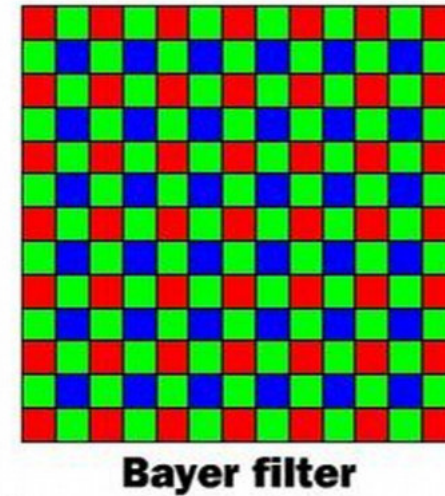
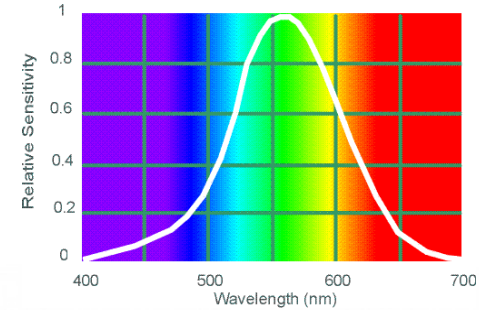
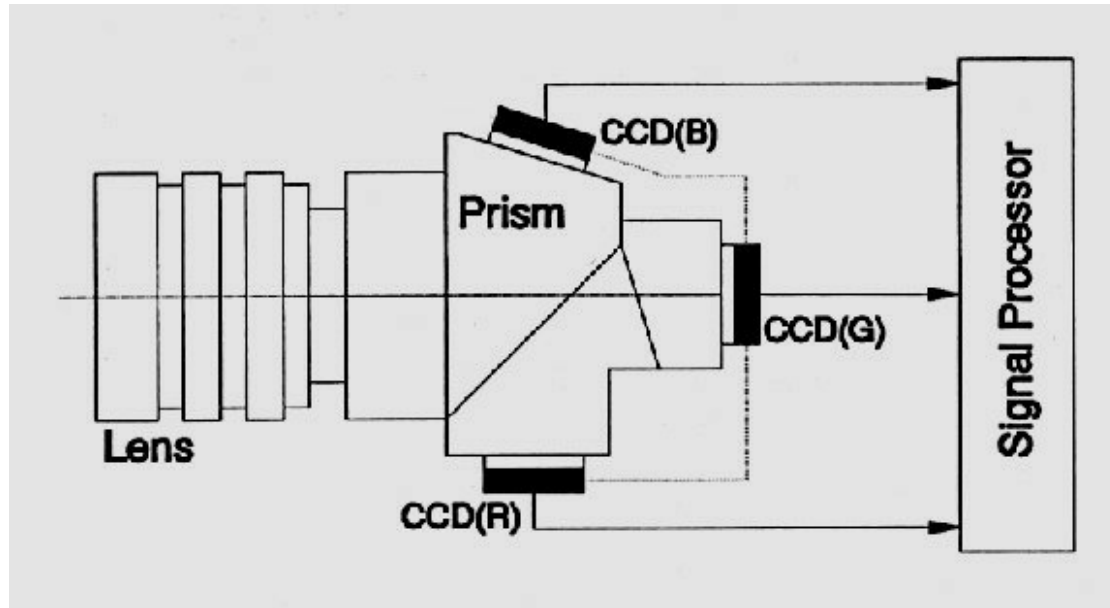
Carte d'irradiances relatives



Attention, valeurs à mettre à l'échelle pour des mesures radiométriques !!!

Attention à la couleur

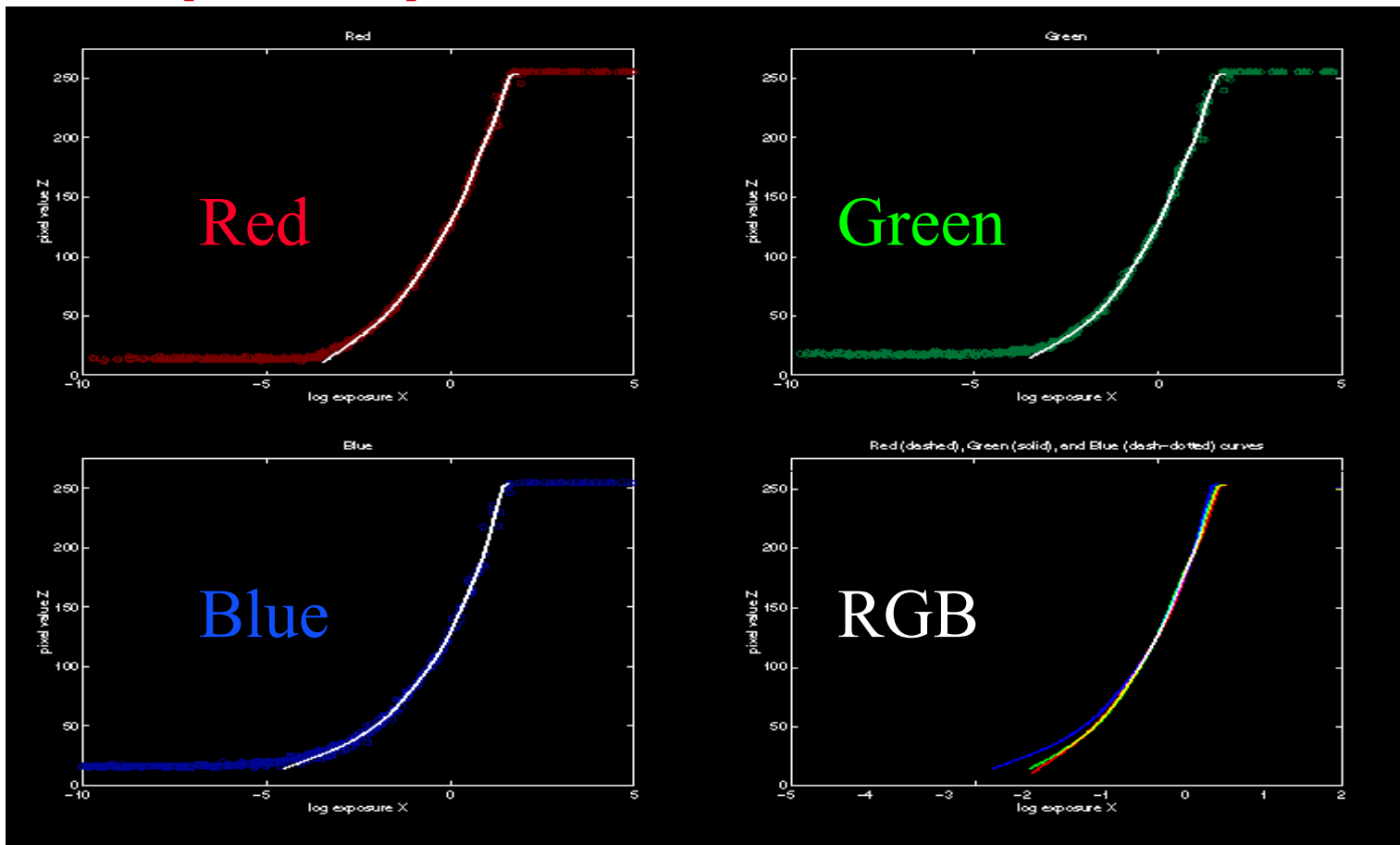
3 capteurs vs. 1 capteur : qualité vs. coût



Ruff Works

<http://www.cooldictionary.com/words/Bayer-filter.wikipedia>

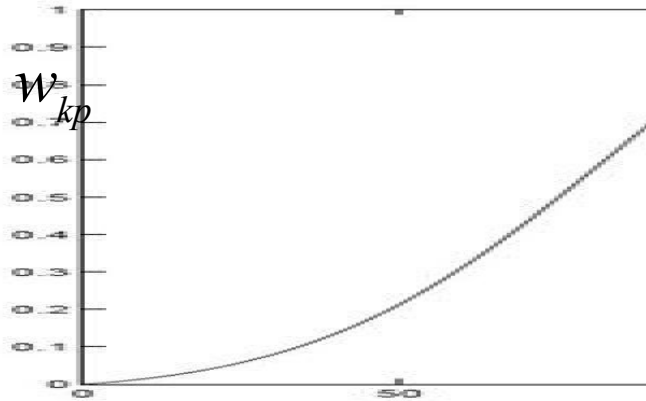
Courbe de réponse par couleur



Extension : Robertson et al. 2003

- Même principe, mais
 - Prise en compte du bruit par pixel
 - Utilisation d'une fonction d'objectif pondérée

$$\sum_k \sum_p w_{kp} \left| E_p \Delta t_k - f^{-1}(Z_{pk}) \right|^2 + \lambda \sum_{z=Z_{\min}-1}^{Z_{\max}+1} \partial_{zz}^2 f^{-1}(z)^2$$



Autre approche : Mitsunaga 1999

Images: $k = 1, 2, \dots, K$, Pixels: $p = 1, 2, \dots, P$

Rapport d'expositions

$$R_{k, k+1} = \frac{\Delta t_k}{\Delta t_{k+1}} = \frac{E_p \Delta t_k}{E_p \Delta t_{k+1}} = \frac{f^{-1}(Z_{p, k})}{f^{-1}(Z_{p, k+1})}$$

Base polynomiale

$$R_{k, k+1} = \frac{\sum_{n=0}^N c_n Z_{p, k}^n}{\sum_{n=0}^N c_n Z_{p, k+1}^n}$$

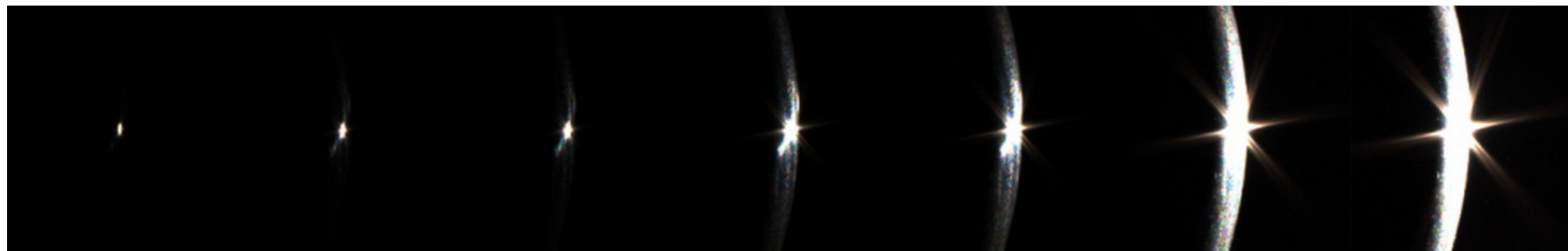
Problème à résoudre

Fonction d'objectif

$$\epsilon = \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{p=1}^P \left| \sum_{n=0}^N c_n Z_{p, k}^n - R_{k, k+1} \sum_{n=0}^N c_n Z_{p, k+1}^n \right|^2$$

Impact de la diffraction

Temps d'exposition →



MAM 2017

Dynamique ↗



Diffraction ↗

Reconstruction HDR

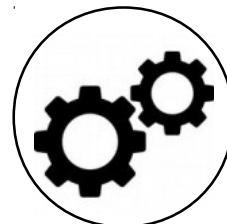


Image HDR

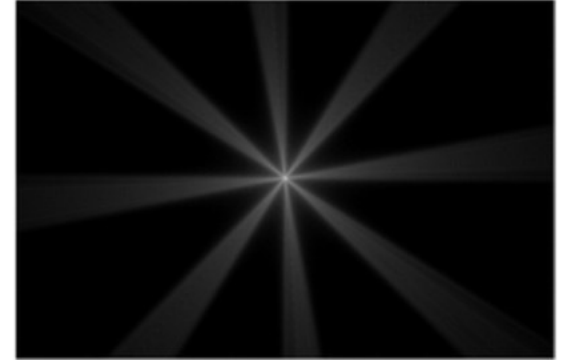


Algorithme en 2 étapes

1) Estimer la PSF due au diaphragme

$$PSF \propto \left| \mathcal{F} \left[\begin{array}{c} \text{diaphragm} \end{array} \right] \right|^2$$

$$PSF =$$



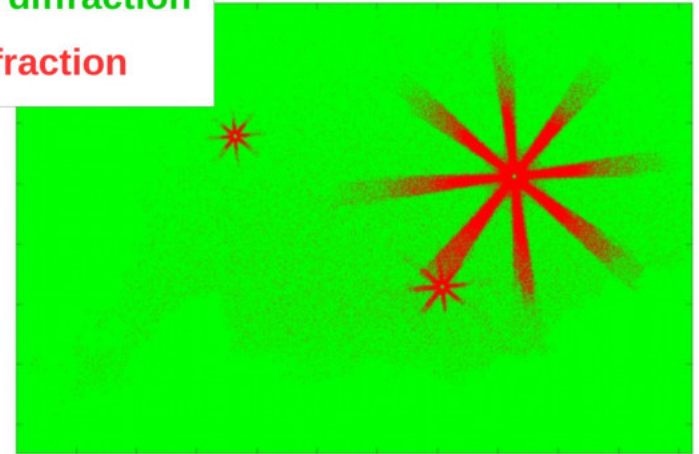
2) Classifier les pixels



Image en entrée

Pas de diffraction

Diffraction



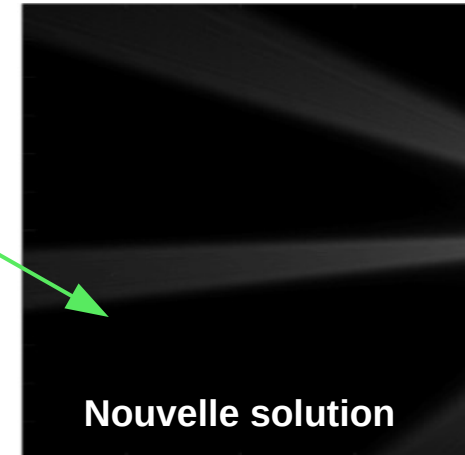
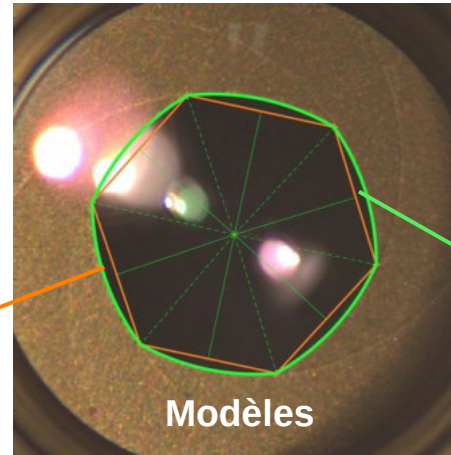
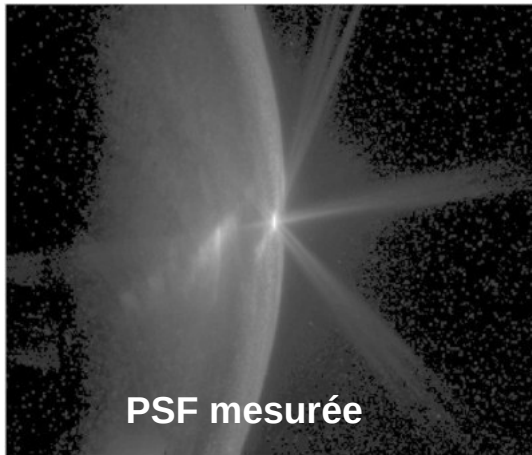
Estimer la PSF

- L'image finale est une convolution
- Modèle du diaphragme
 - Polygone à arêtes courbes
- Solution exacte

$$I = I^* \otimes PSF + \mathcal{B}$$

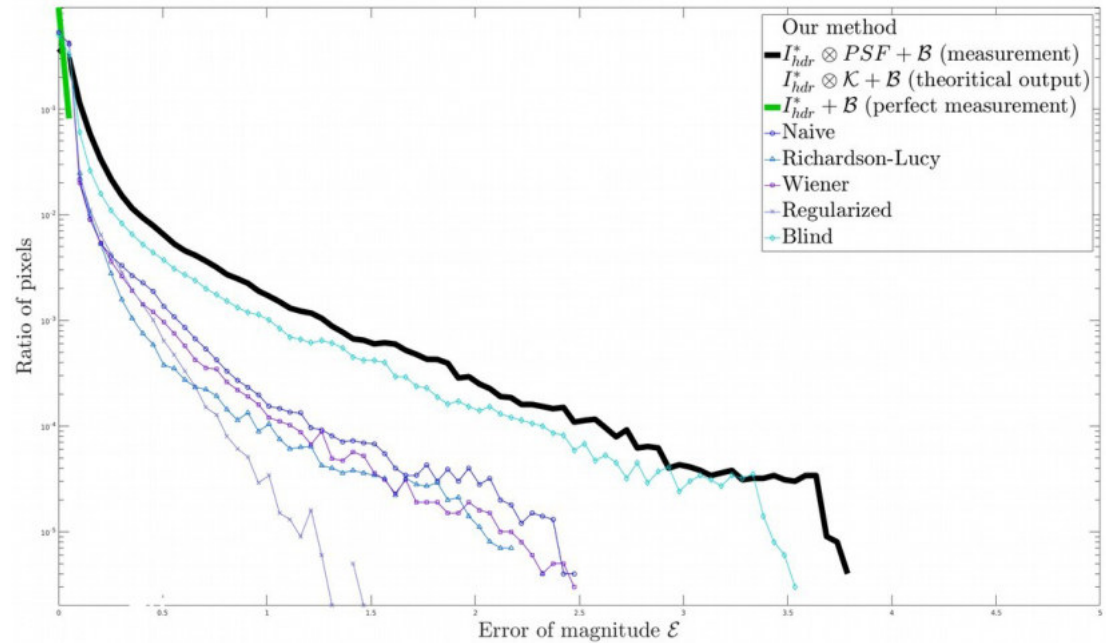
$$PSF \propto |\mathcal{F}[\text{diaphragm}]|^2$$

MAM 2017



Classification des pixels

- Déconvolution ?
 - Erreur difficile à estimer
 - Perte de résolution
- Solution proposée
 - Élimination des pixels dans une tache de diffraction
 - Principe : double diffraction (physique puis simulée)
 - Si aucun changement → en dehors de la tâche
 - ~Ajustement des poids

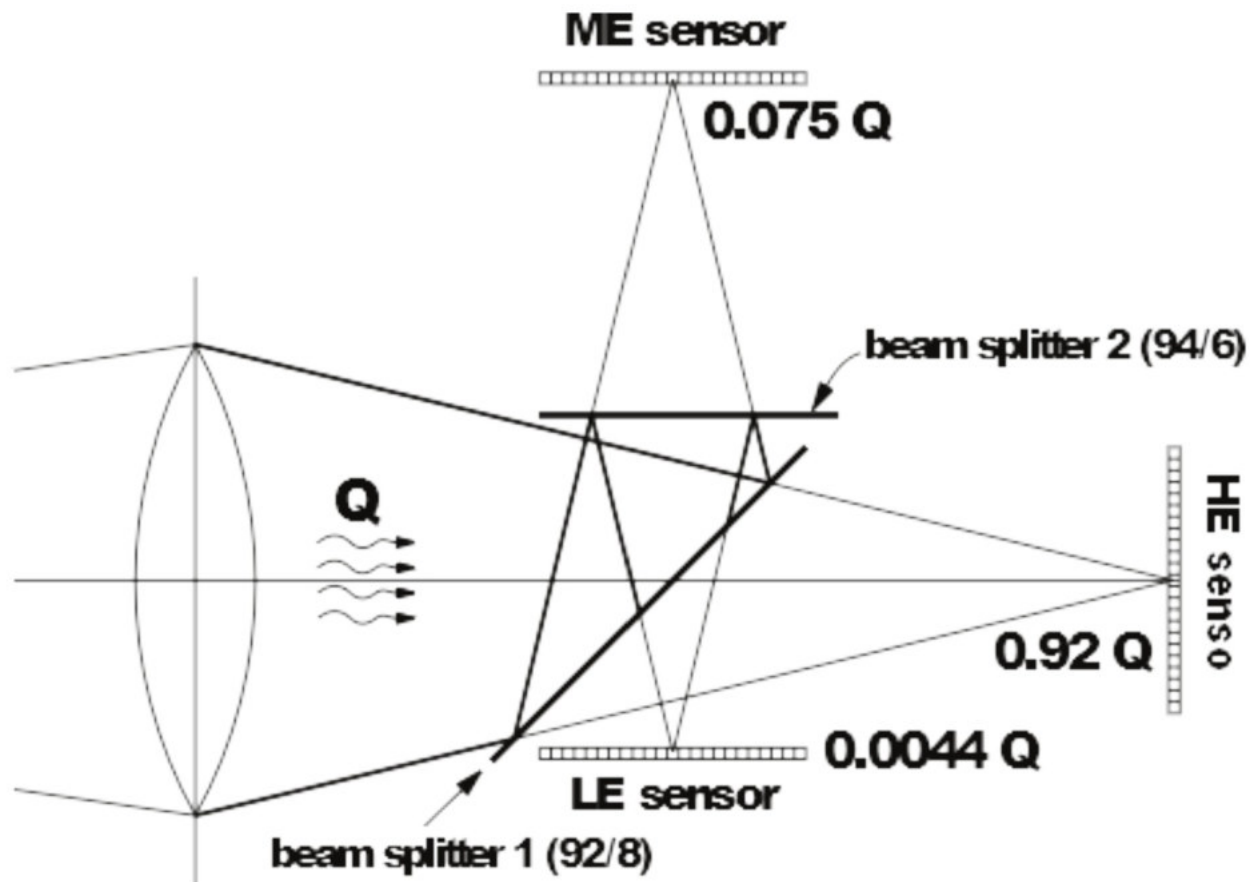


MAM 2017

Limitations

- Variation des temps d'exposition
 - Scènes dynamiques → correspondance manquantes entre pixels
 - Besoin d'un système stable → pas de mouvement entre les captures
- Finalisation de la calibration
 - Valeurs relatives :
 - Avoir une valeur de référence
 - Bruit d'acquisition
 - Comment assurer une fonction bijective ?
 - ...

Vers une caméra HDR



Toward HDR video camera

A Versatile HDR Video Production System

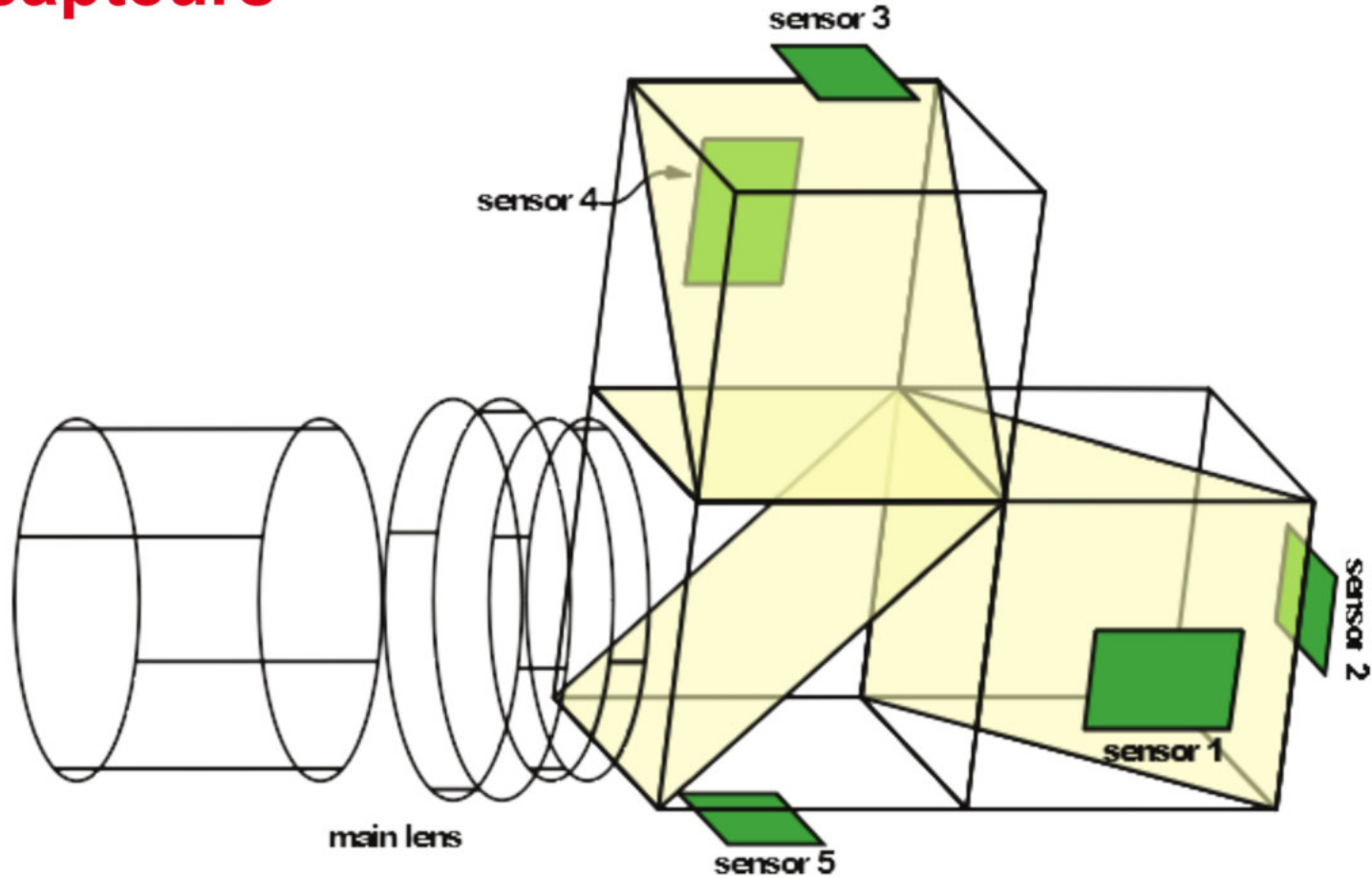
ACM SIGGRAPH 2011



www.ampHDR.com

agl.unm.edu

Avec 5 capteurs

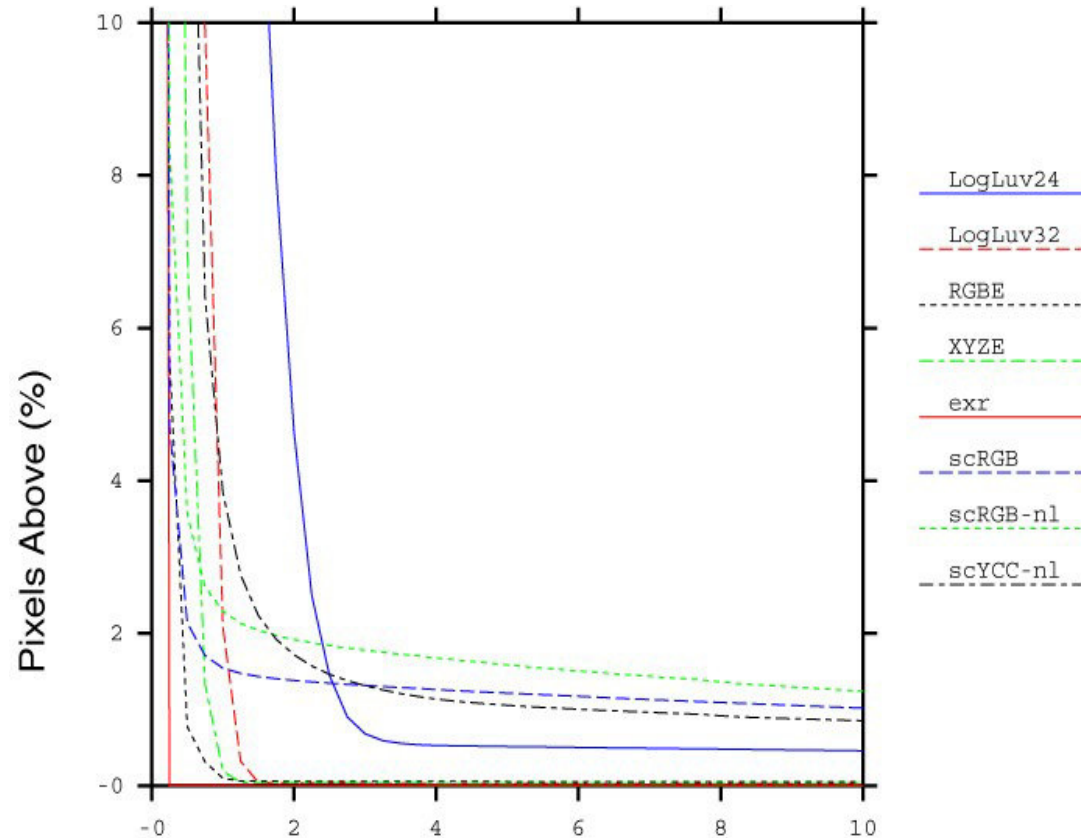


MAM 2017

Quelques mots sur les formats

| Encoding | Bits / pixel | Dynamic Range | Quant. Step |
|--------------|--------------|------------------------------|-------------|
| sRGB | 24 | 1.6 (1.0:0.025) | Variable |
| Pixar Log | 33 | 3.8 (25.0:0.004) | 0.4% |
| RGBE XYZE | 32 | 76 (1038:10 ⁻³⁸) | 1% |
| LogLuv 24 | 24 | 4.8 (15.9:0.00025) | 1.1% |
| LogLuv 32 | 32 | 38 (1019:10 ⁻²⁰) | 0.3% |
| EXR | 48 | 10.7 (65000:0.0000012) | 0.1% |
| scRGB | 48 | 3.5 (7.5:0.0023) | Variable |
| scRGB-nl | 36 | 3.2 (6.2:0.0039) | Variable |
| scYCC-nl | | | |

Qualité d'encodage (moyenne sur les images)

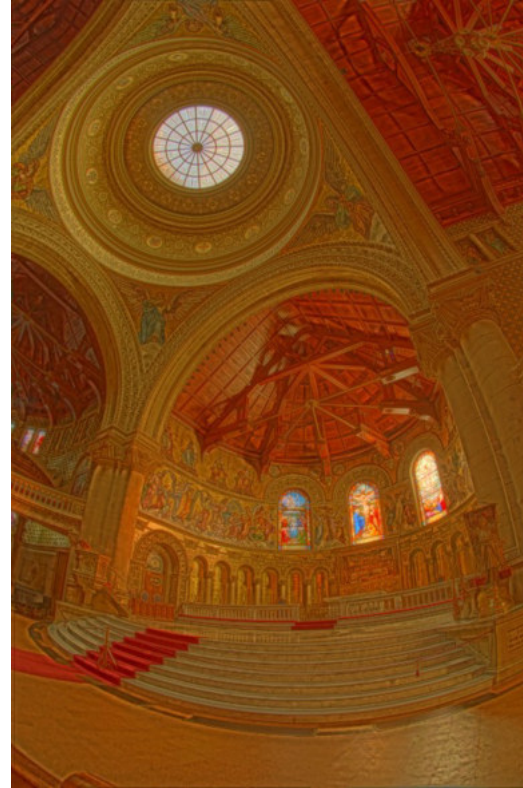


Corriger pour pouvoir afficher

Esthétique



Cognitif



Perceptuel



Perception Motivated Hybrid Approach to Tone Mapping,
Martin Čadík, cadikm@fel.cvut.cz
WSCG'07, Pilsen, Czech Republic, 31. 1.2007

Est-ce réaliste ?

Pour moi, cela ne me semble pas naturel. Cela ressemble plus à une peinture qu'une photographie

Réaction classique

Cela correspond exactement à ce que j'avais vu.

Le photographe

Conclusion : Les images corrigées par opérateur de correction de ton sont en général plus proche de la réalité perçue. Cependant, nous sommes toujours encore trop habitués à des images de basse dynamique et donc surpris par les résultats d'une telle approche.

Autres solutions, aller vers des écrans HDR

- 1 pixel = 3 LED ?
 - Existe
 - Coût
 - Énergie
 - Implantation
 - Maintenance

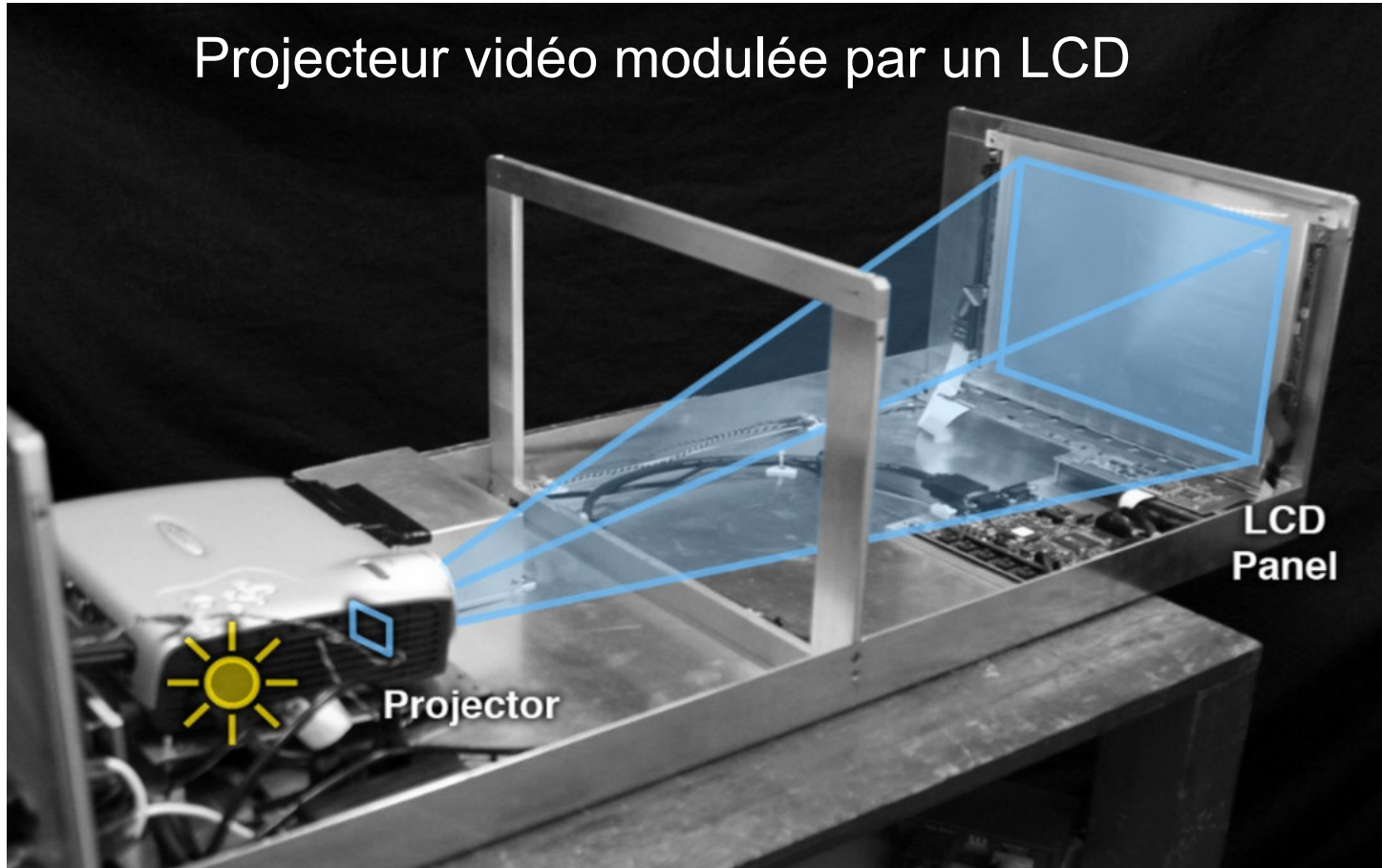


Autres solutions, aller vers des écrans HDR

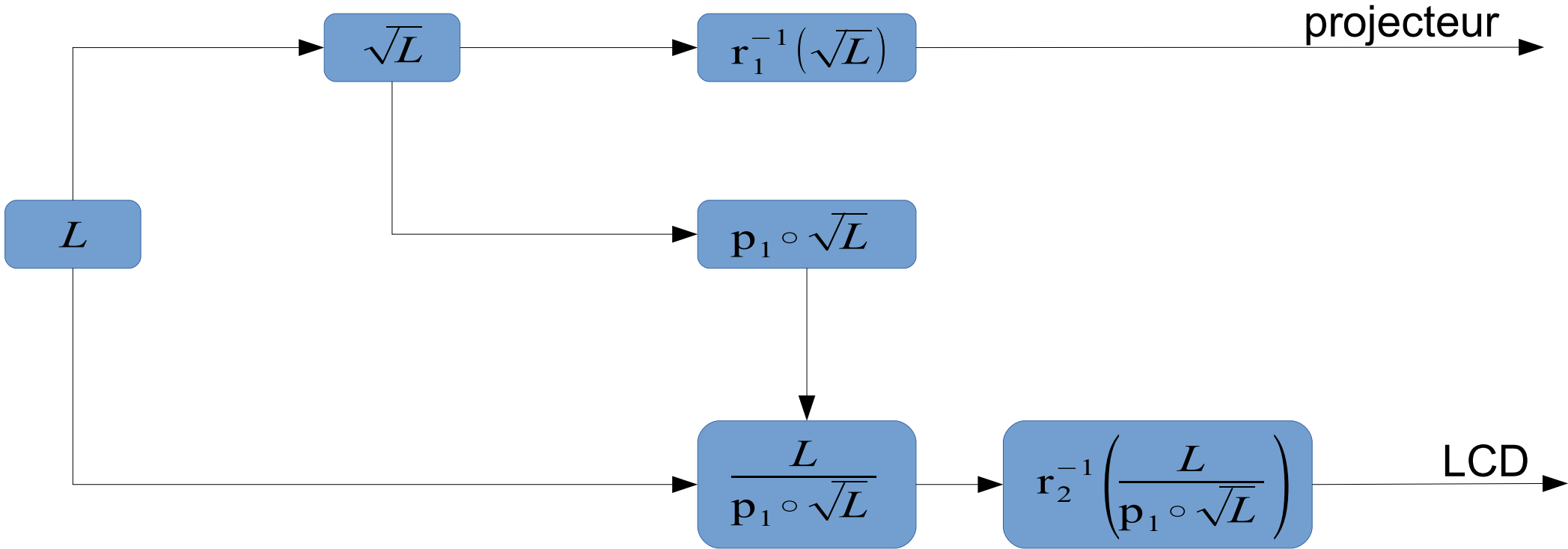
- Principe : augmenter le taux de contraste
 - Afficheurs en cascade
- Afficheur 1 : taux de contraste $c_1:1$
- Afficheur 2 : taux de contraste $c_2:1$
- Taux de contraste total $c_1 * c_2:1$

HDR Display : prototype 1 (2002)

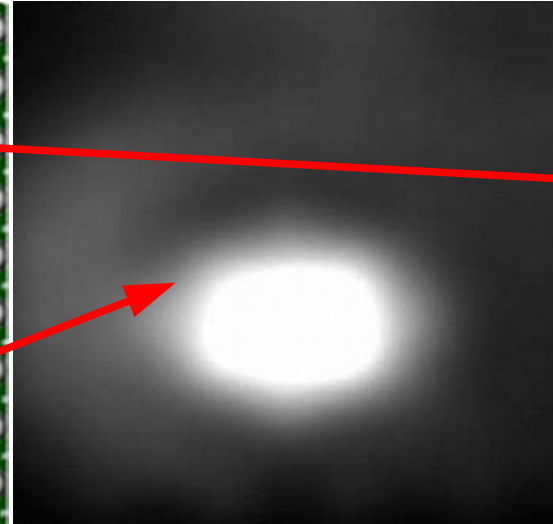
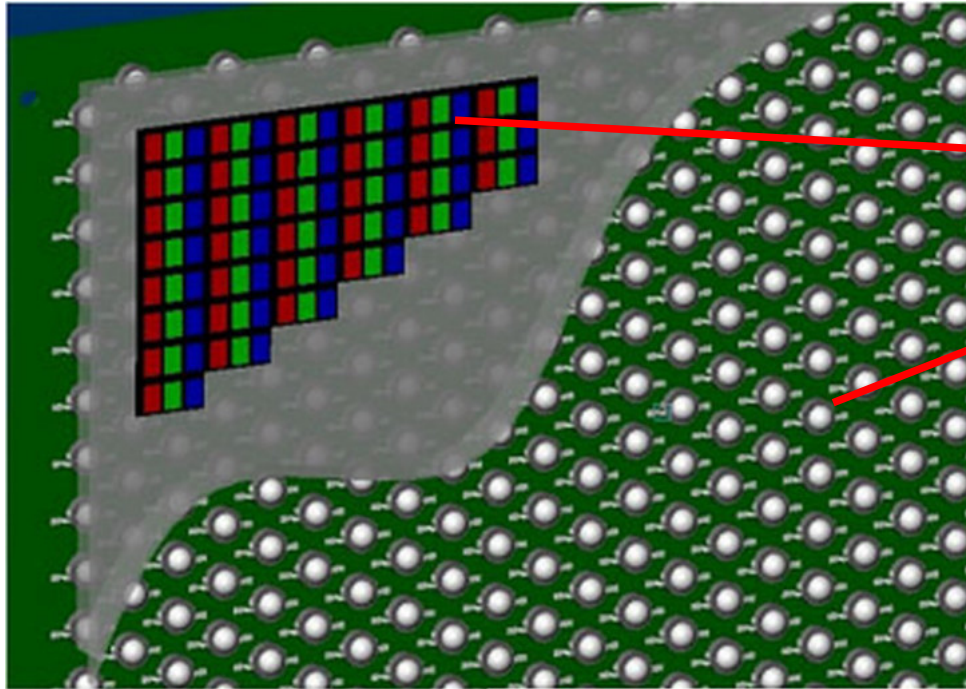
Projecteur vidéo modulée par un LCD



Écran HDR : prototype 1

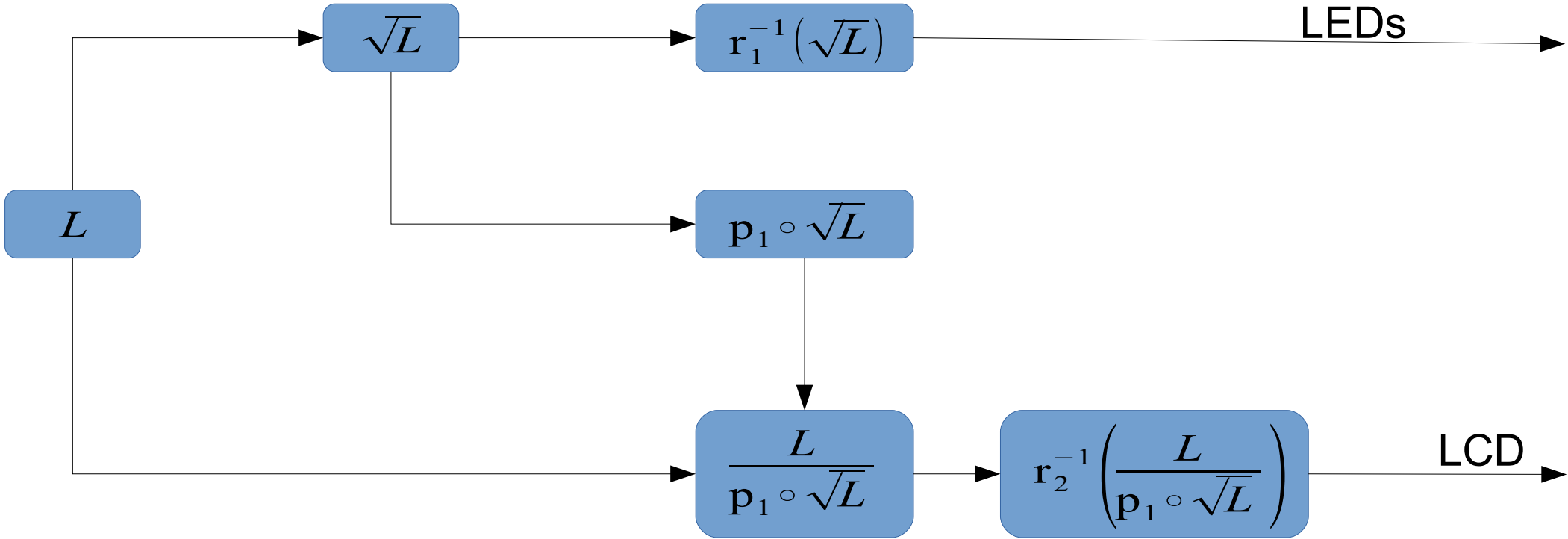


Écran HDR: prototype 2 (Dolby Digital - 2003)



©2005 Brightside Technologies Inc. Proprietary & Confidential

HDR Display: prototype 2



Recommandation ITU-R BT.2100

- Prochaine génération d'écran
 - Résolutions : 4K (3840 x 2160) ou 8K (7680 x 4320) en 16:9
 - Taux de rafraichissement : ce 23.976p à 120p
 - Précision : 10 ou 12 bits par canal
 - Pic de luminance à 1000 cd/m²
 - Noir à 0.005 cd/m²
 - Contraste 200000:1

4

Calibrer et optique non-conventionnelle

Bilan intermédiaire

- Importance de la calibration
 - Aller vers des problèmes inverses (ex : couleur \rightarrow luminance)
- Importance du modèle numérique
 - Modéliser précisément un système (ex : calcul de la PSF)
- Combinaison optique est numérique
 - Corriger les défauts intrinsèques d'un système optique
 - Réduire les coûts

Premier exemple : écran sphérique tactile

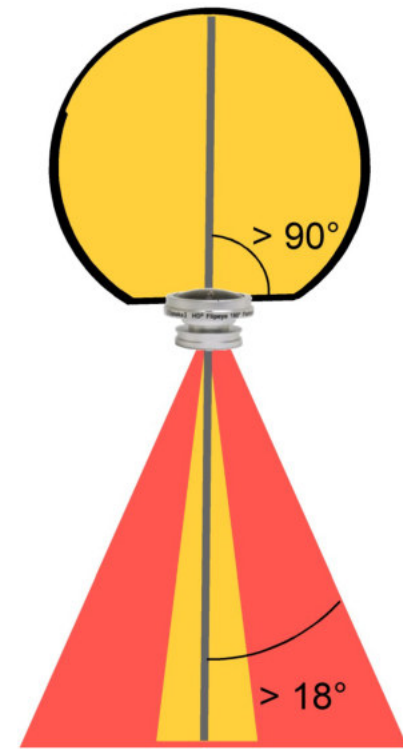


Display Week 2017

Matériel : système de projection

Sphère en verre dépoli

Lentille "fisheye"

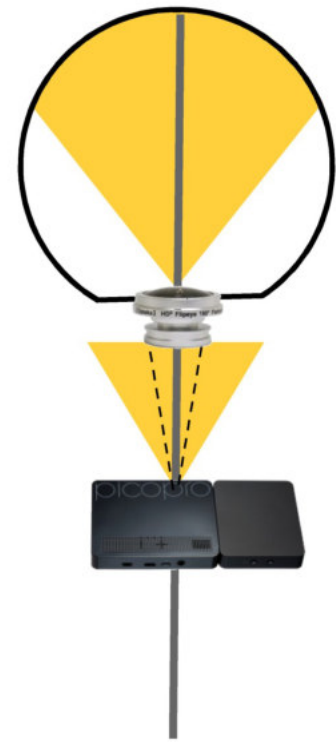


Matériel : vidéo-projection

Sphère en verre dépoli

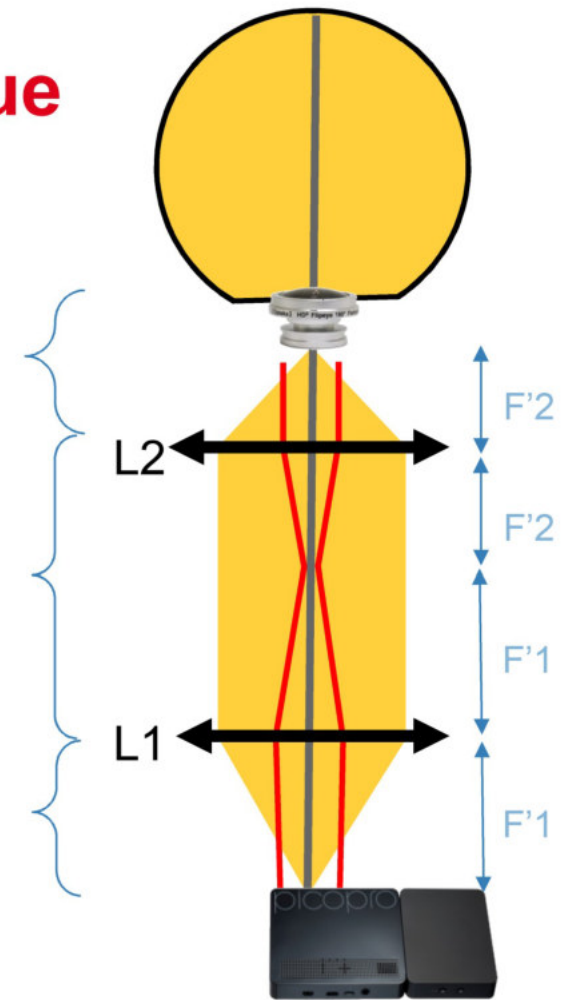
Lentille "fisheye"

Vidéo-projecteur laser "focus-free"



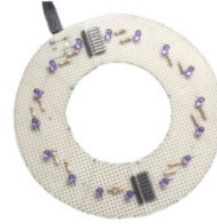
Matériel : un peu de conception optique

- Buts
 - Ajouter de la distance
 - Adapter l'ouverture de la lentille
 - Maintenir une image nette
- Solution
 - Séquence de 2 lentilles convexes



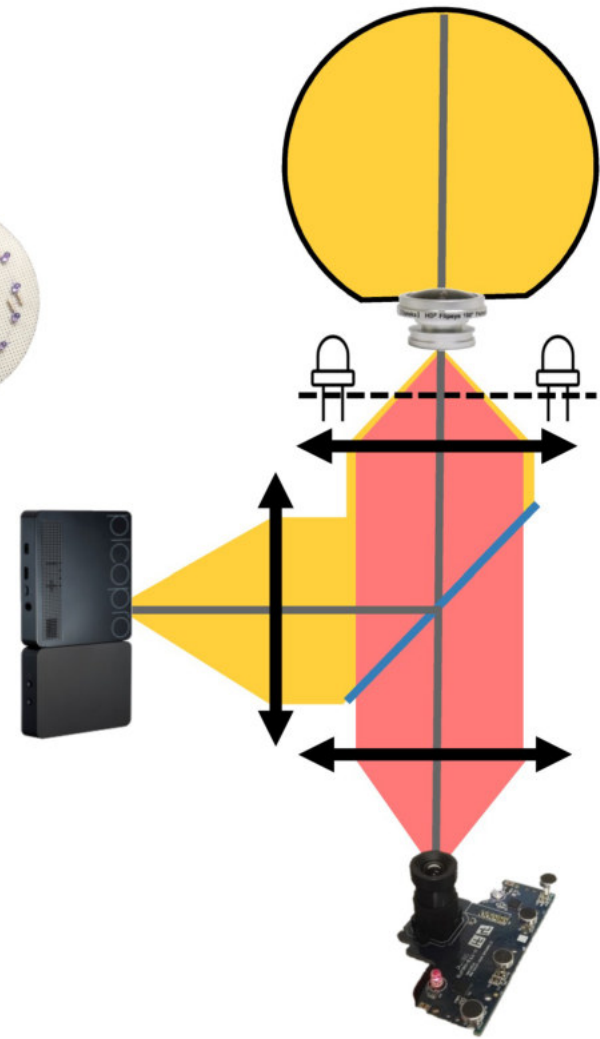
Matériel : suivi optique des doigts

Anneau de LED infrarouge

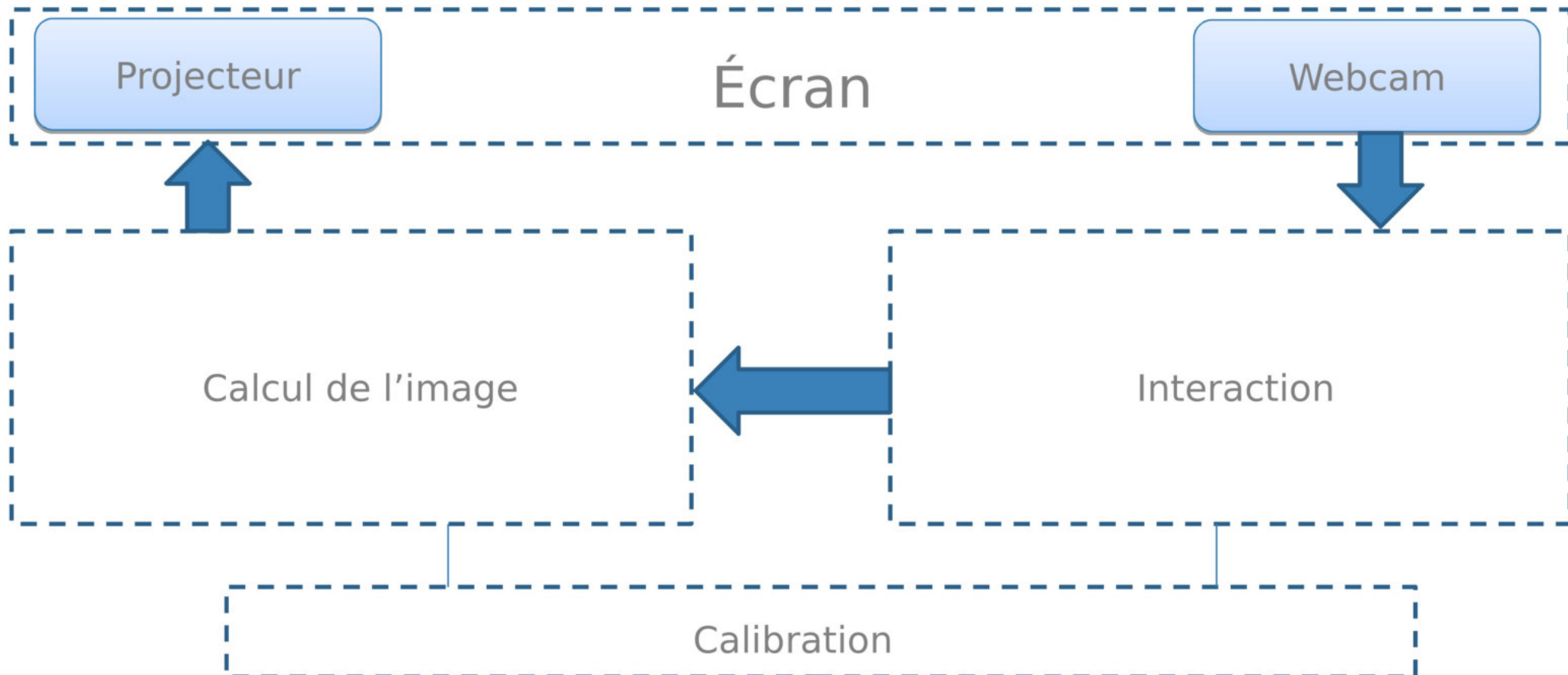


Miroir semi-transparent

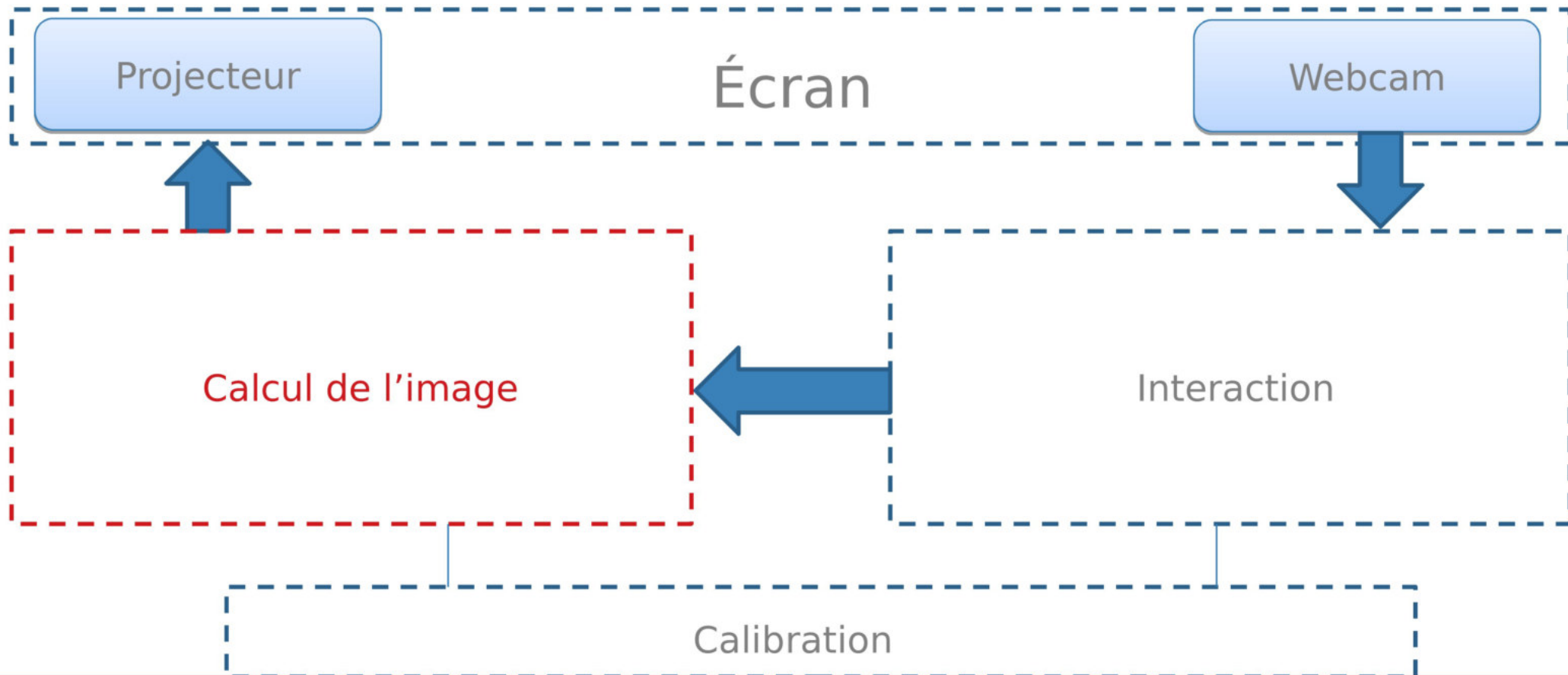
Caméra infrarouge
○ PSEye modifiée



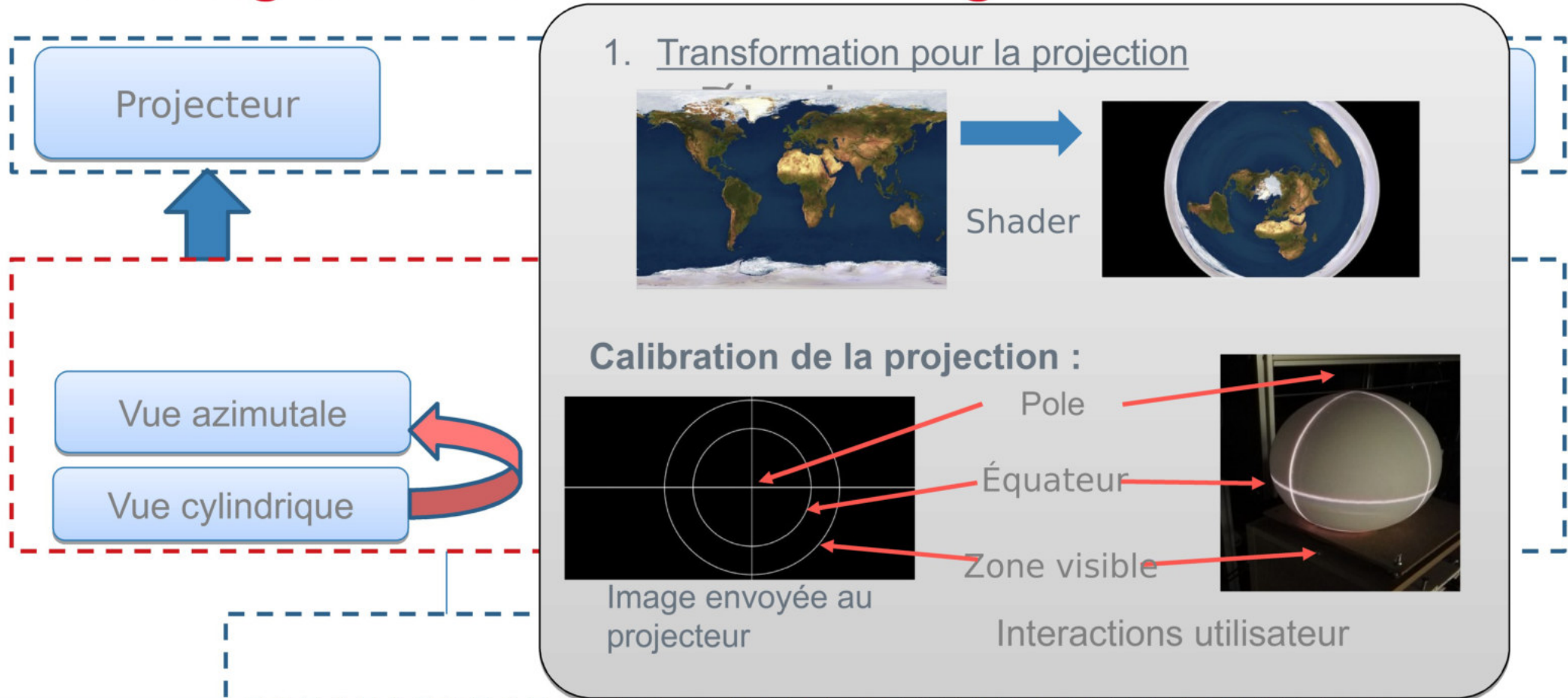
Partie logiciel



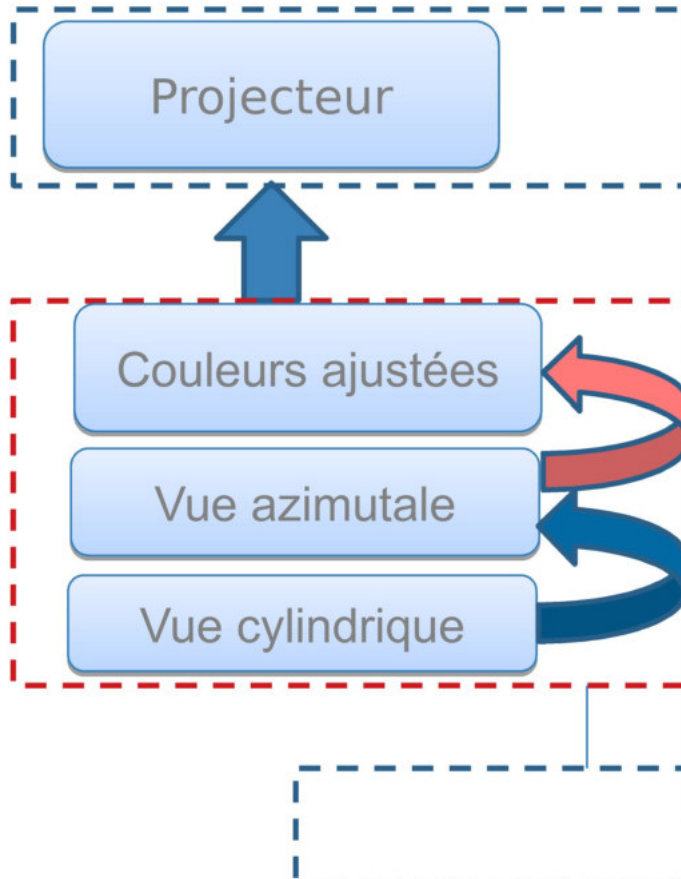
Partie logiciel – correction des images



Partie logiciel – correction des images

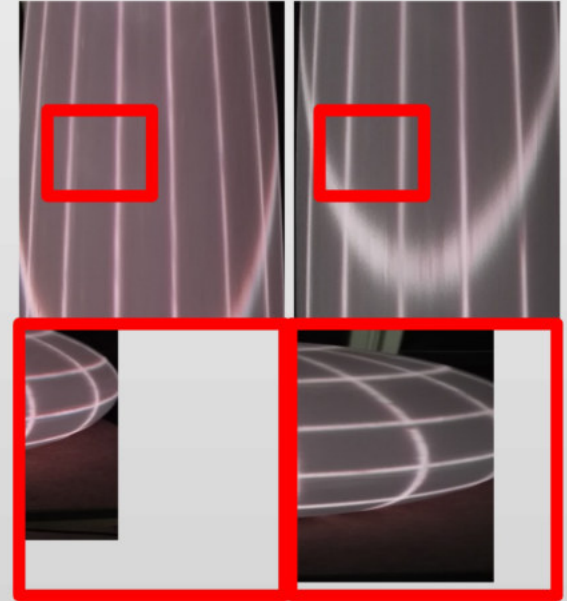


Partie logiciel – co



1. Transformation pour la projection
2. Correction des aberrations chromatiques

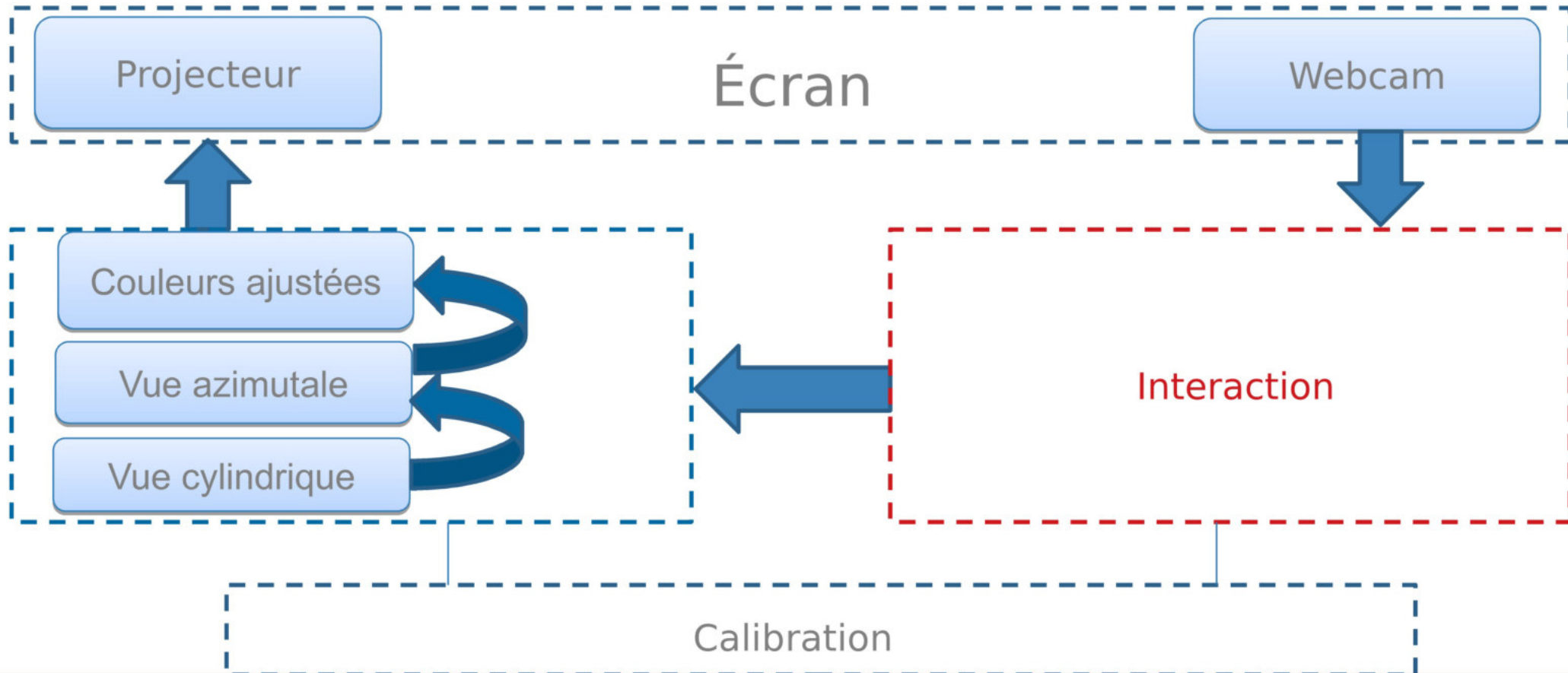
- Aberrations non-uniformes
- Spectre discret
- Décalage entre les canaux



Calibration

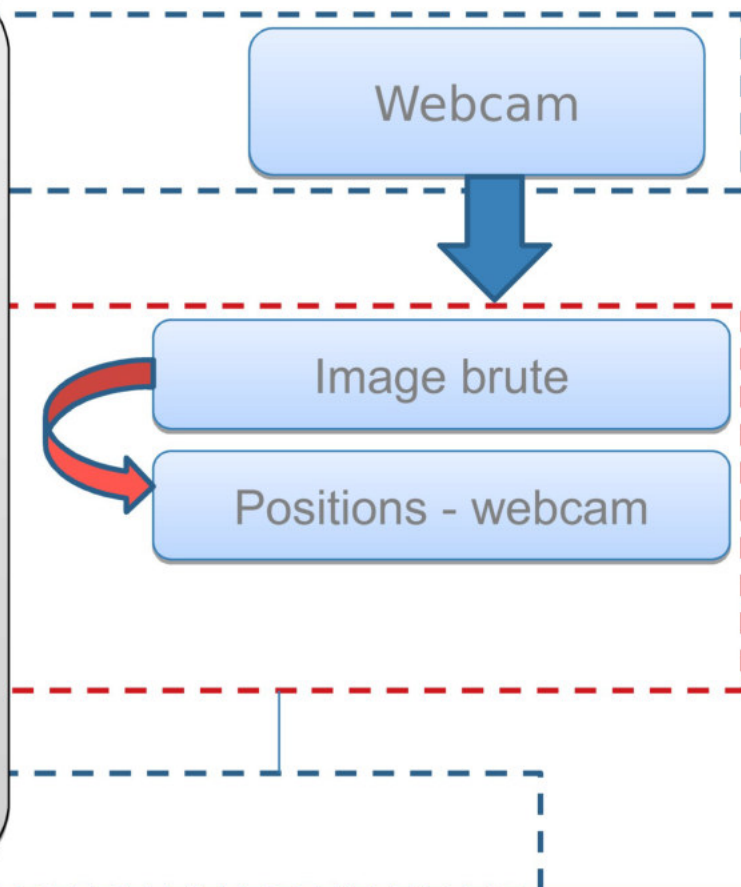
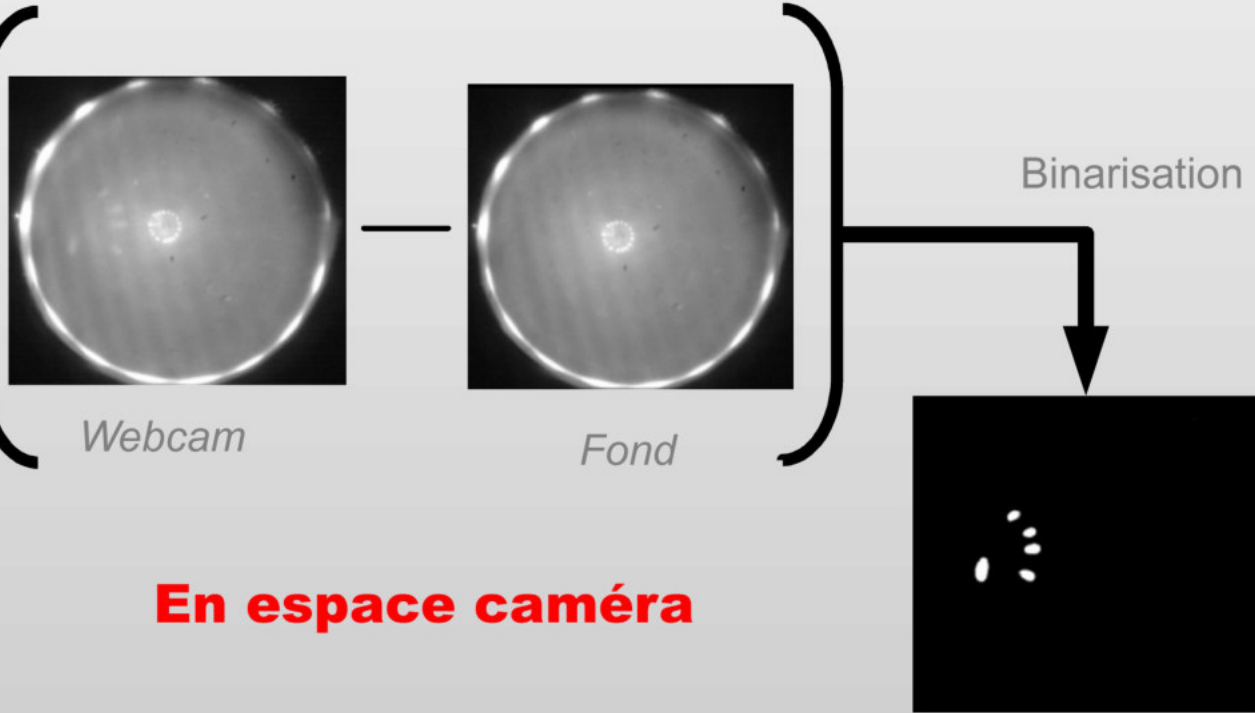
- Correction manuelle sur une série de points
- Interpolation avec reconstruction bi-laplacienne
- Carte de correction de couleurs
 - Pour chaque pixel, stoker ΔR et ΔB

Partie logiciel – interactions utilisateur



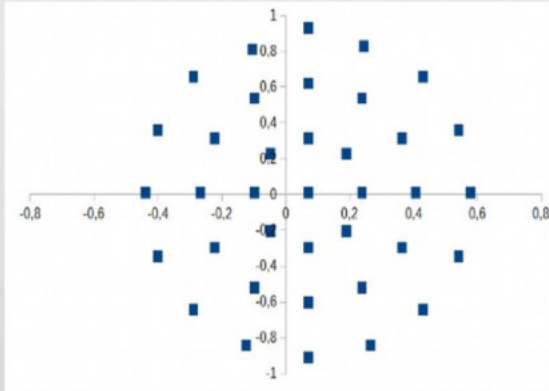
Partie logiciel – interactions utilisateur

1. Suivi des doigts : vision par ordinateur

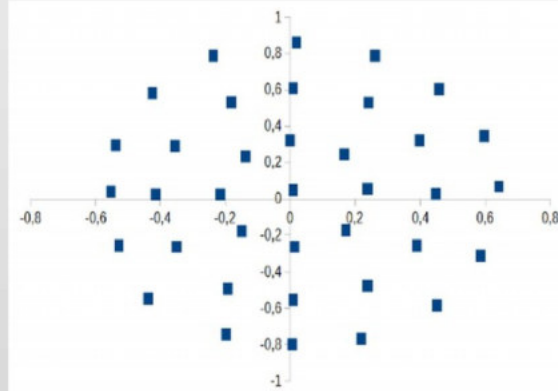


Partie logiciel – interactions utilisateur

1. Suivi des doigts : vision par ordinateur
2. Reprojection dans l'espace écran



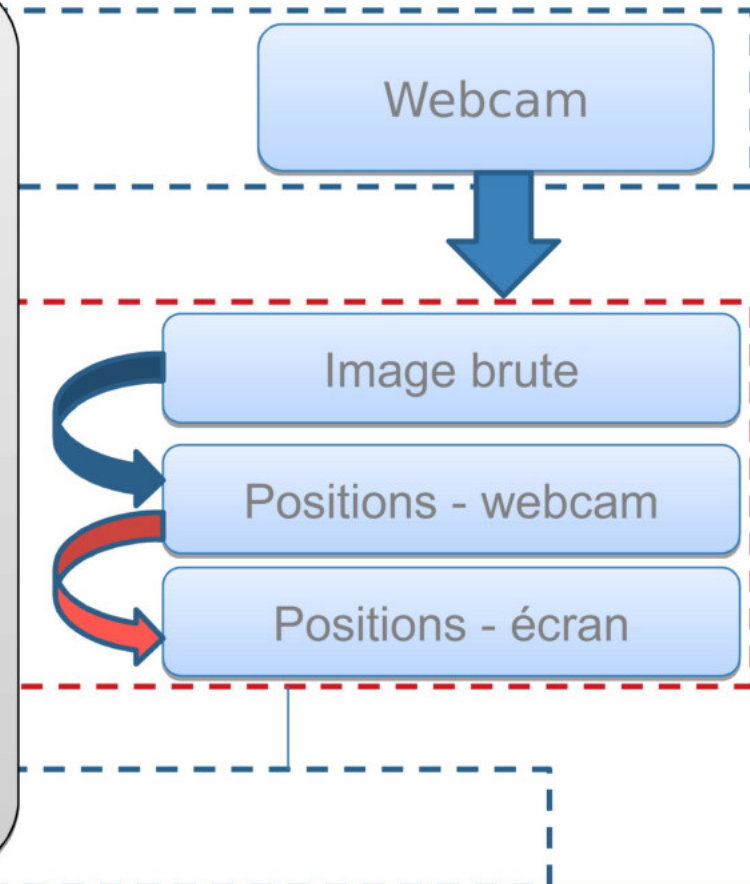
Points projetés



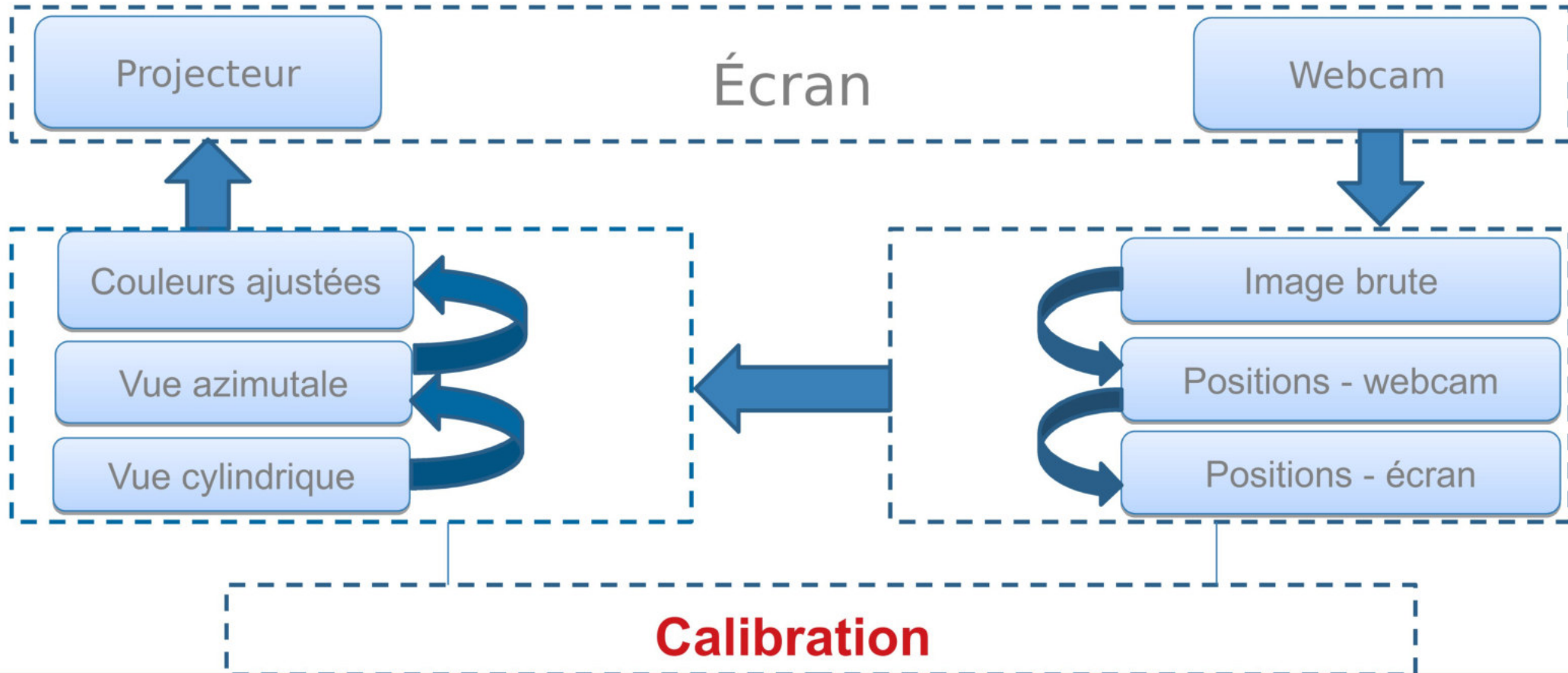
Point détectés

Calibration

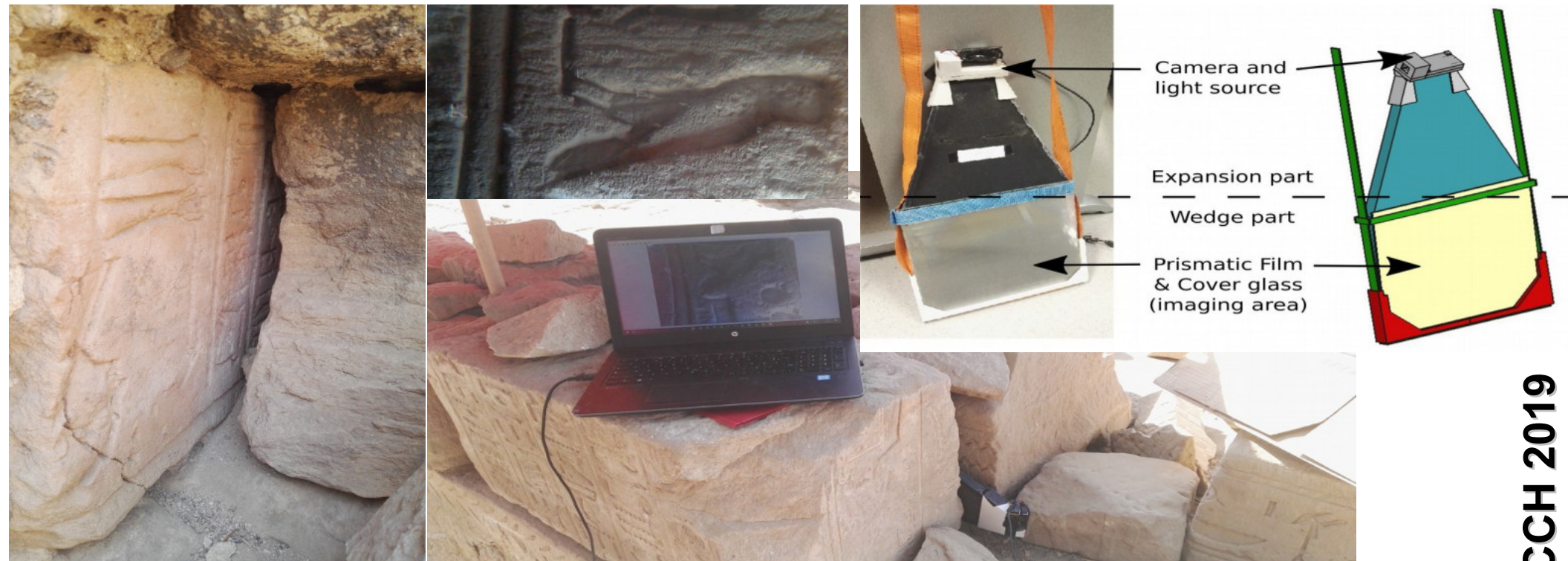
- L'utilisateur touche une série de points projetés
- Reconstruction bilaplacienne



Partie logiciel



« Wedge Camera » – Caméra pour espace confinée



JOCCH 2019

Avec l'IFAO – temple de Medamoud – Egypte

Concept

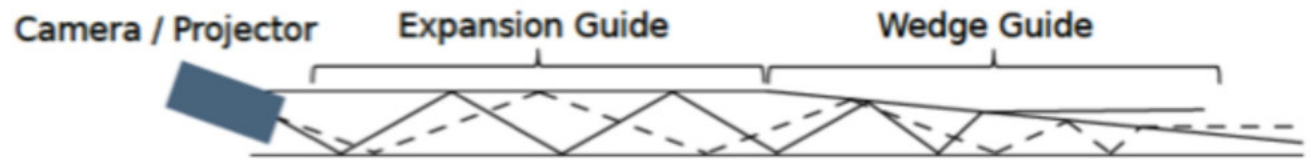
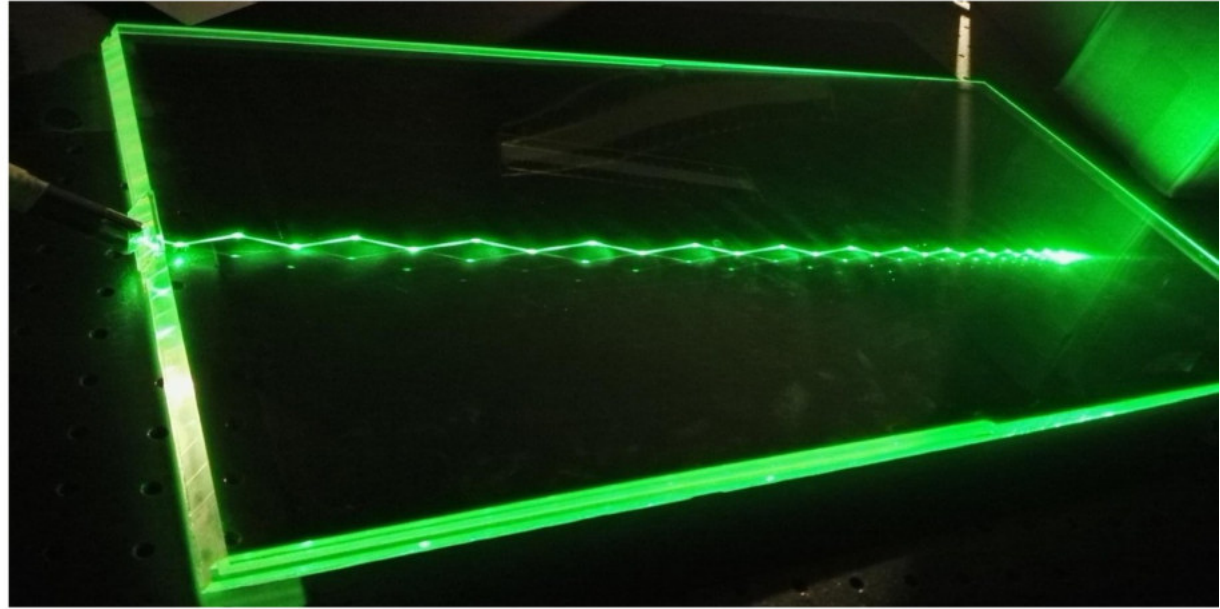
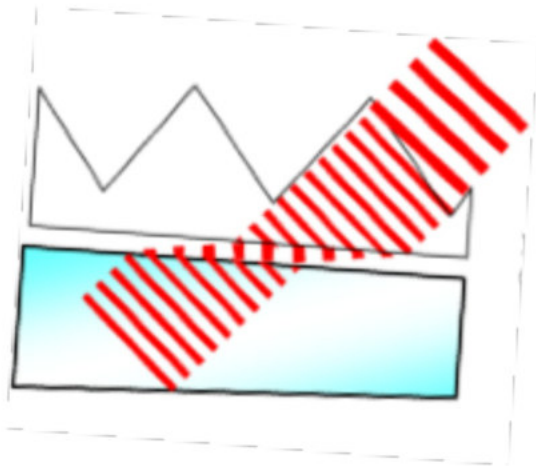
Challenge:

Acquisition en espace confiné

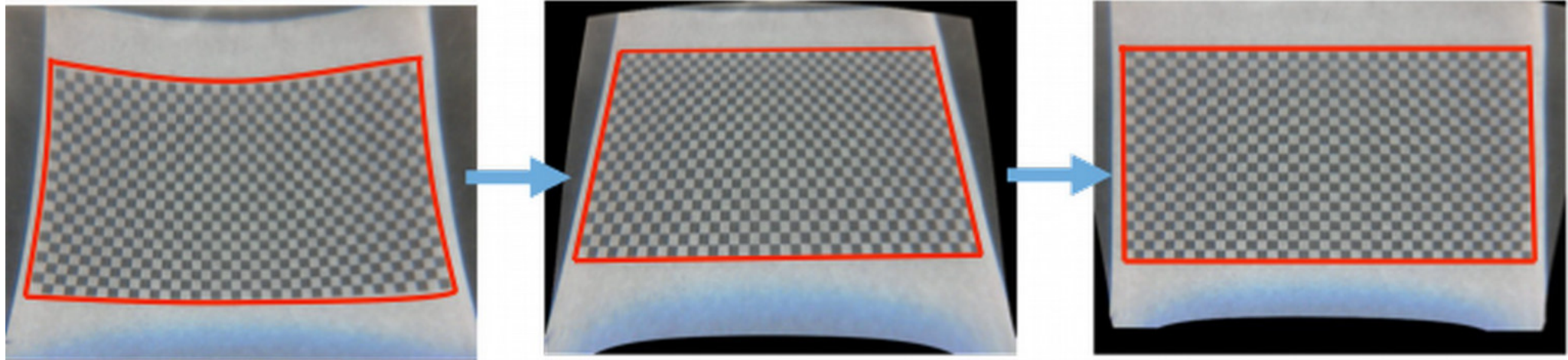
Idée :

Un guide de lumière « wedge » ...

... et des microprismes pour redresser



Calibration et correction logicielle



Aberrations

Perspective

~

Caméra linéaire mobile

Corrections en-ligne



Par défaut



Corrigé

5

Vers le plénoptique

Systeme d'imagerie classique

Luminance polarisee
 $J.s^{-1}.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$

Flux
 $J.s^{-1}$

Energie
 J

Filtrage

Objectif

Ouverture

Capteur

Exposition

Δt

Traitement d'images

010010100

V

Convertisseurs

Perte d'information par transformation

Luminance polarisée
 $J.s^{-1}.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$

Flux
 $J.s^{-1}$

Energie
 J

Filtrage

Objectif

Ouverture

Capteur

Exposition

Δt

Traitement d'images

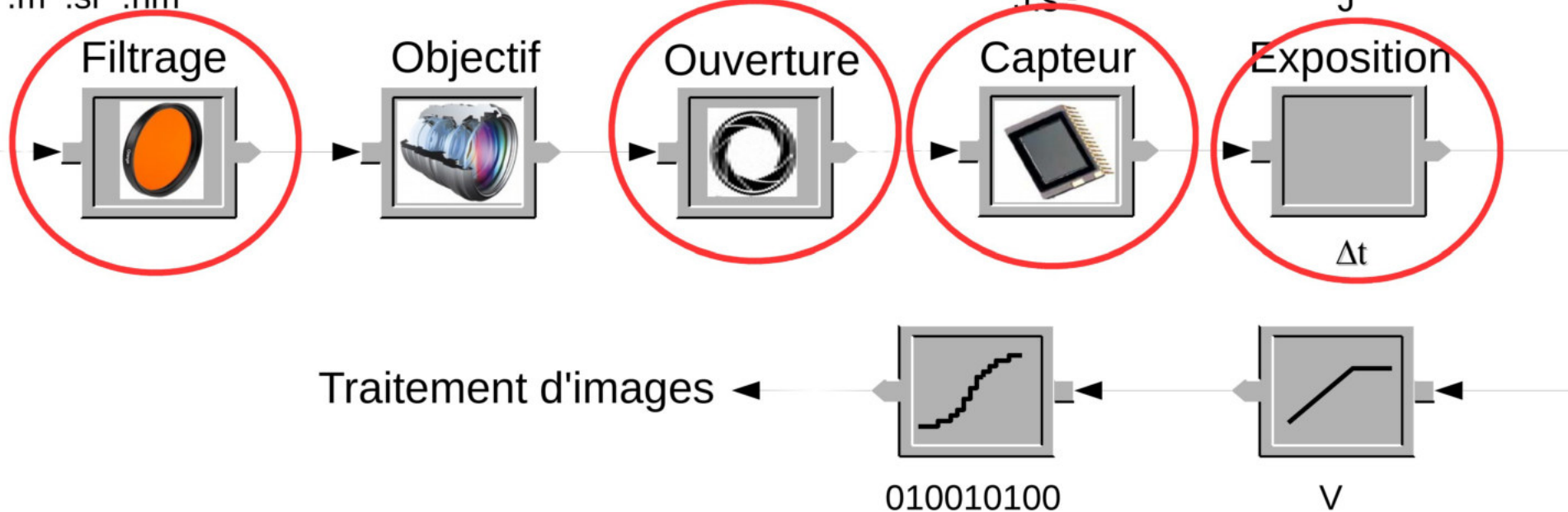
010010100

V

Convertisseurs

Perte d'information par intégration

Luminance polarisée
 $J.s^{-1}.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$



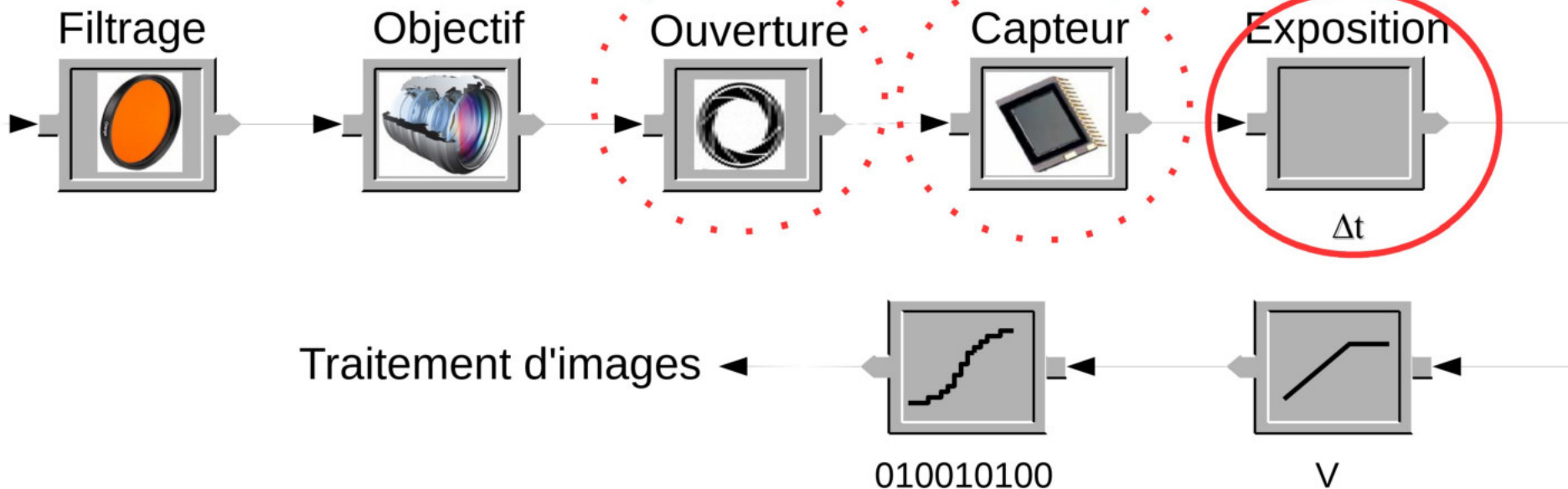
$$I_{ij} = \int L(x, y, z, l, \lambda, \psi, t, dx dy dz dl d\lambda d\psi$$

Imagerie HDR

Luminance polarisée
 $J.s^{-1}.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$

Flux
 $J.s^{-1}$

Energie
 J



$$I_{ij} = \int L(x, y, z, l, \lambda, \psi, t) dx dy dz dl d\lambda d\psi$$

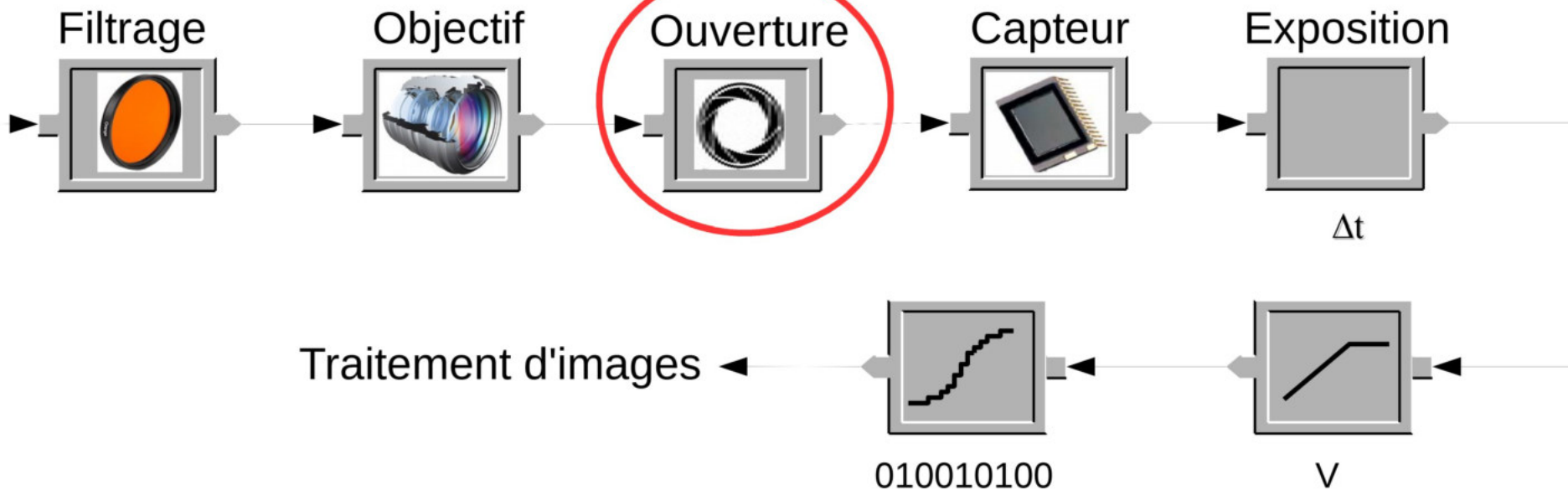
Convertisseurs

Imagerie à ouverture codée

Luminance polarisée
 $J.s^{-1}.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$

Flux
 $J.s^{-1}$

Energie
 J



$$I_{ij} = \int L(x, y, z, \lambda, \psi, t) dx dy dz d\lambda d\psi$$

Convertisseurs

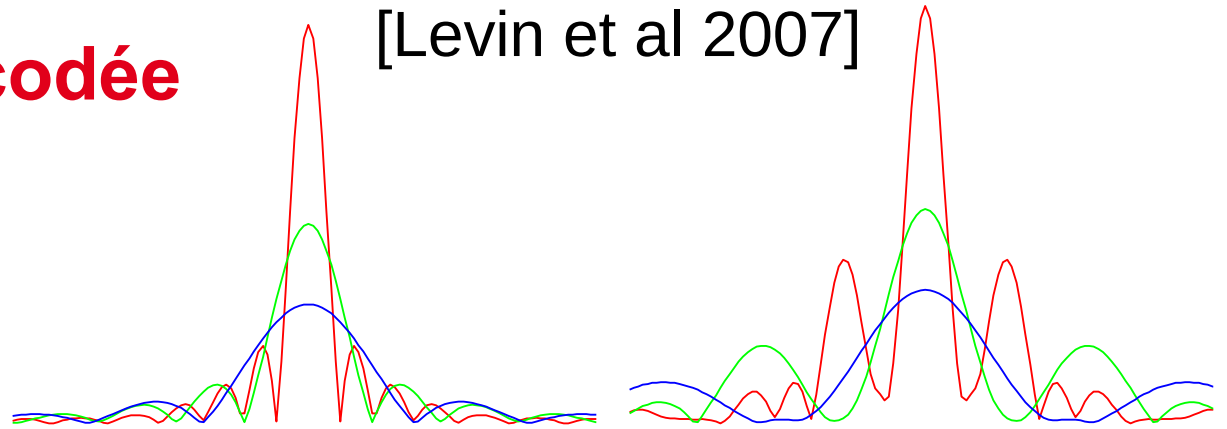
Imagerie à ouverture codée

[Levin et al 2007]

Objectif

- Control de la PSF
- Meilleure déconvolution

$$I = I^* \otimes PSF$$



Point hors focus

[Levin et al 2007]

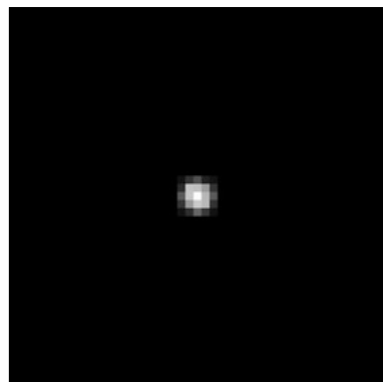
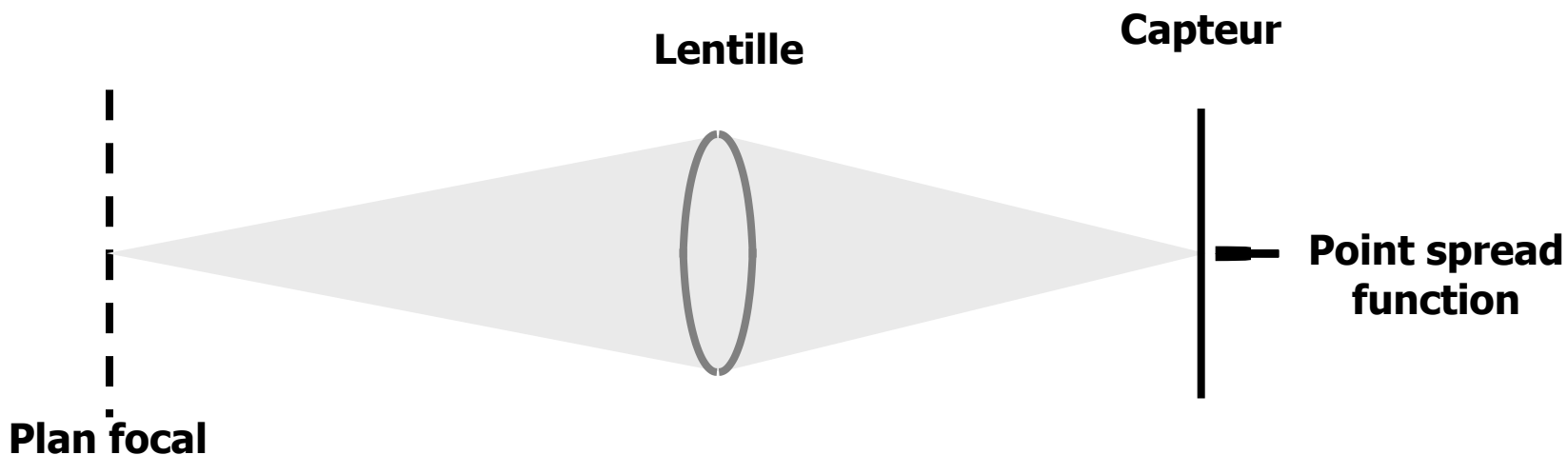


Image d'une source
ponctuelle



Point hors focus

[Levin et al 2007]

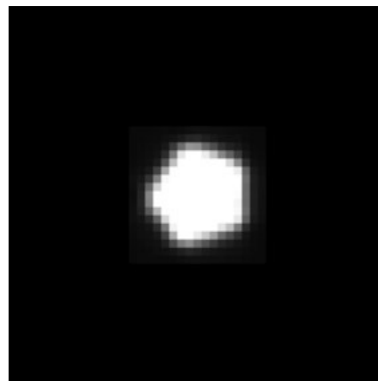
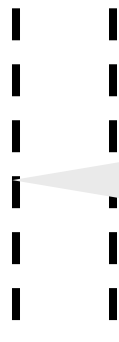


Image d'une source
ponctuelle

Objet



Plan focal

Lentille



Capteur



Point spread
function

Utilisation d'une ouverture codée

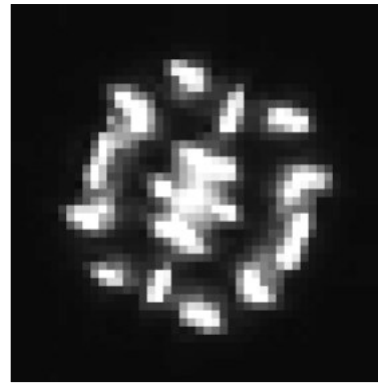
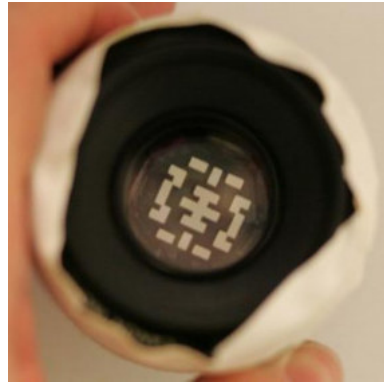
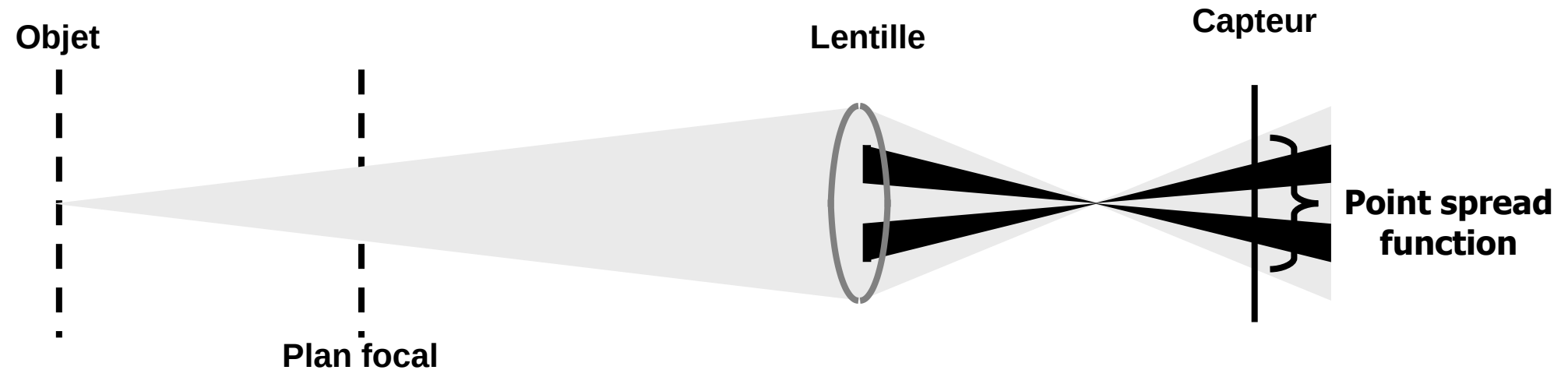


Image d'une source ponctuelle



Entrée



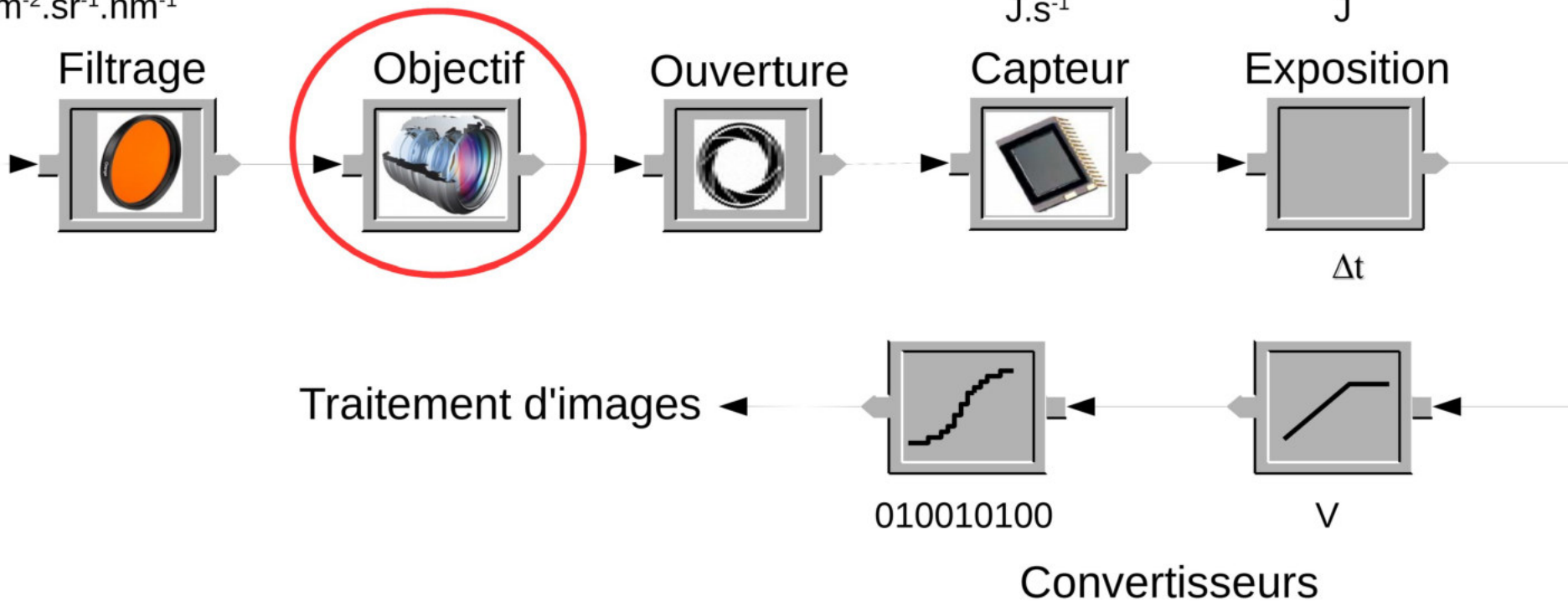


Plénoptique et champ lumineux

Luminance polarisée
 $J.s^{-1}.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$

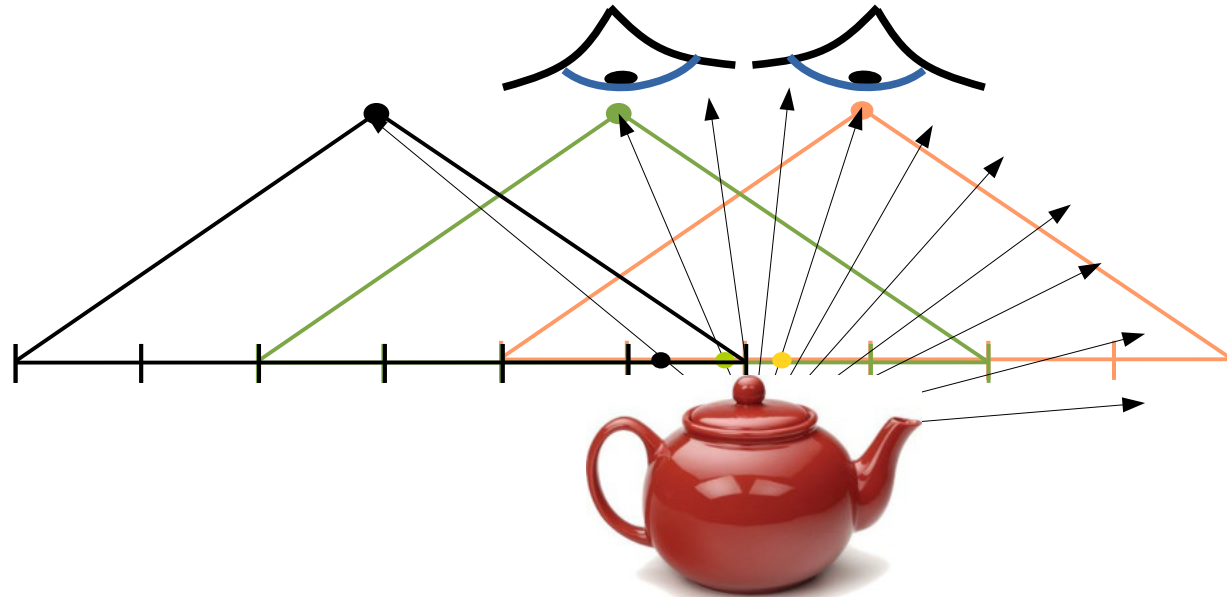
Flux
 $J.s^{-1}$

Energie
 J



Champ lumineux / Light-Field - définitions

- Tous les rayons lumineux
 - Émis par tout point d'une surface
 - Émis dans toutes les directions



Notion de champ lumineux

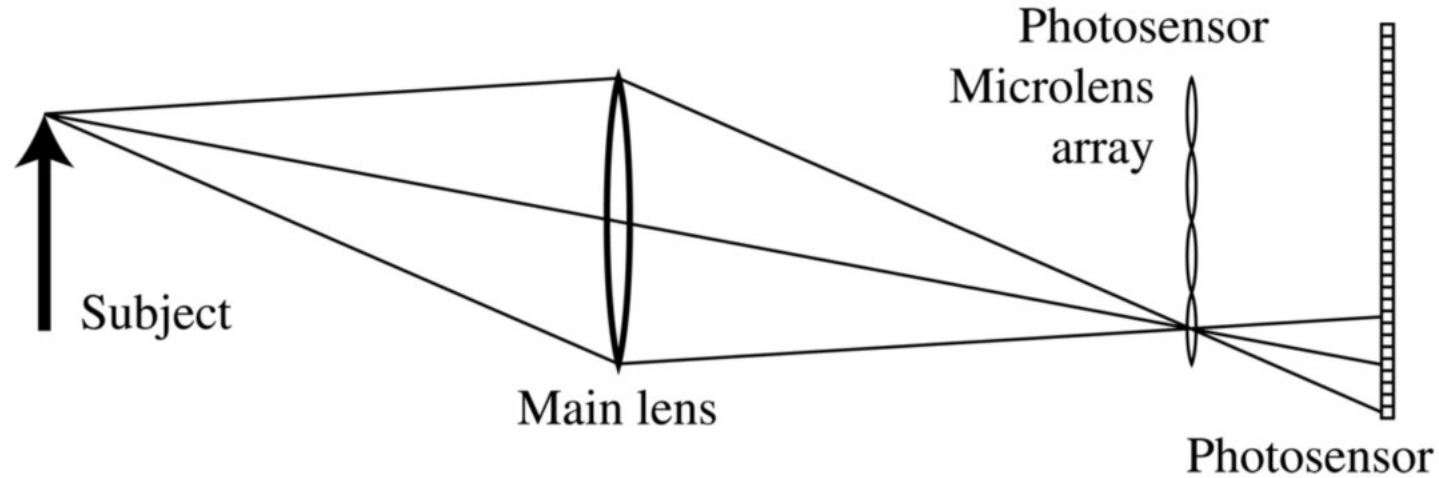
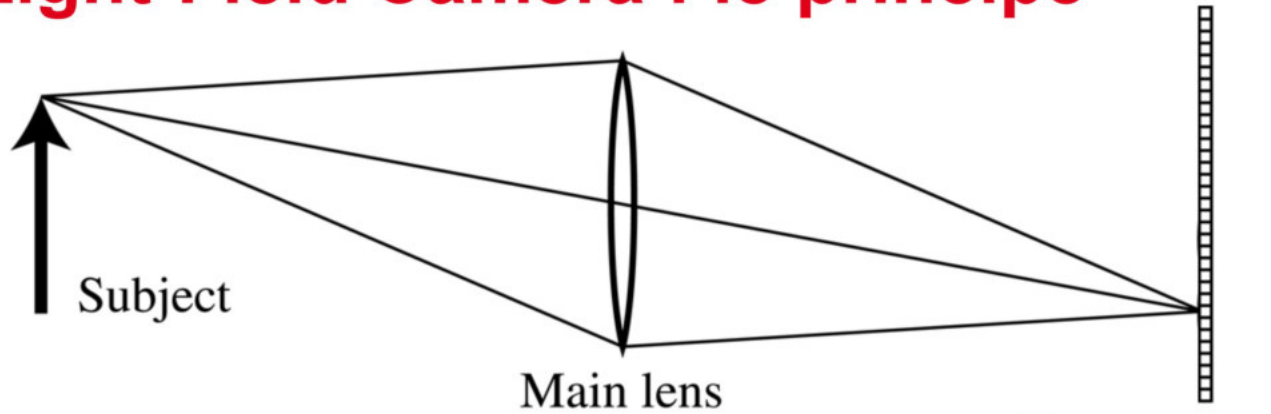
- **Light-Field**

- Lumière émise de toutes les positions et toutes les directions
- Dimensions :
 - **4D** pour des surfaces (2D x 2D pour les directions)
 - En général, pour chaque point de la scène : **5D**

Fonction plénoptique

- Applications :
 - Extension de la stéréographie (TV 3D & Co)
 - Microscopie
 - ...

Light-Field Camera : le principe



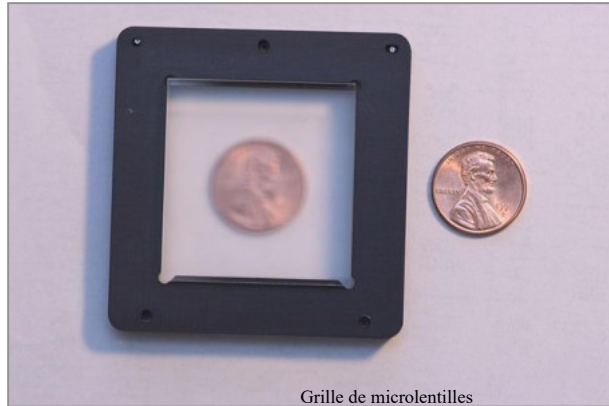
Grille de
microlentilles

SIGGRAPH 2005 & TR 2005-02: Ng, Levoy, Brédif, Duval, Horowitz & Hanrahan

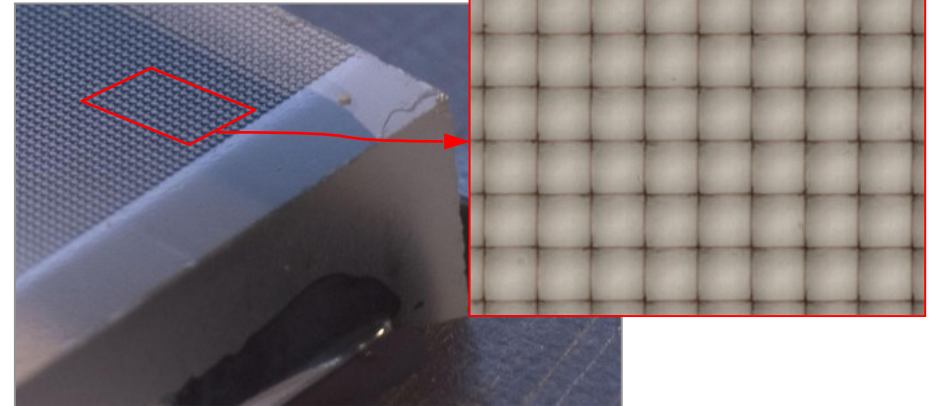
Prototype



Kodak 16-megapixel sensor

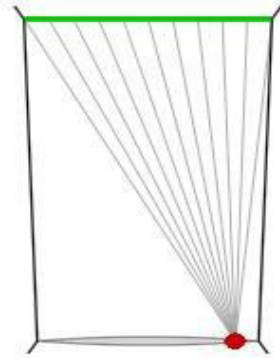
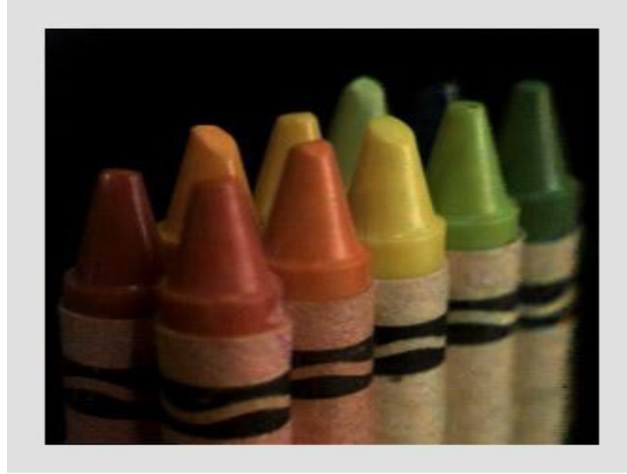


Grille de microlentilles

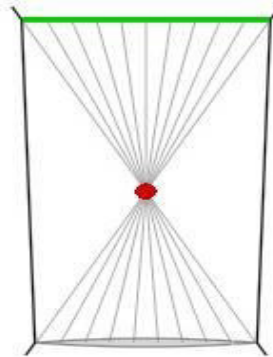




Changing view-point

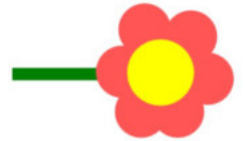


Changing view-point



Comment générer plusieurs points de vue

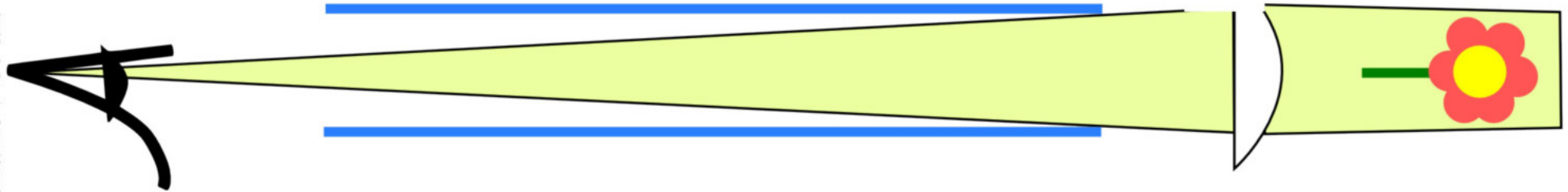
Manakov et al. – SIGGRAPH 2013





Comment générer plusieurs points de vue

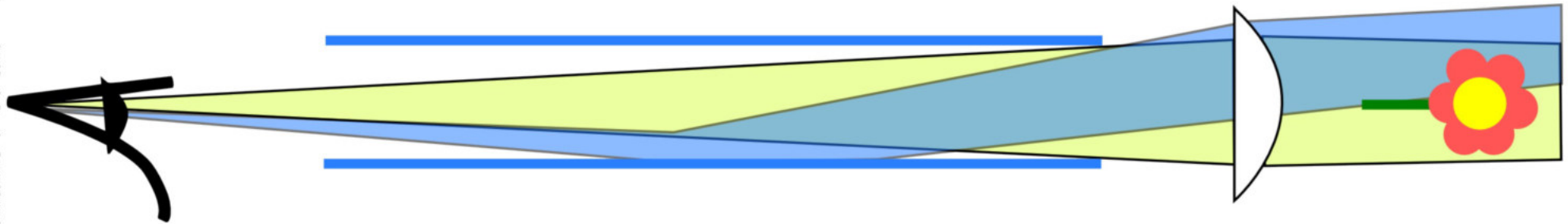
- On peut voir la scène directement ...





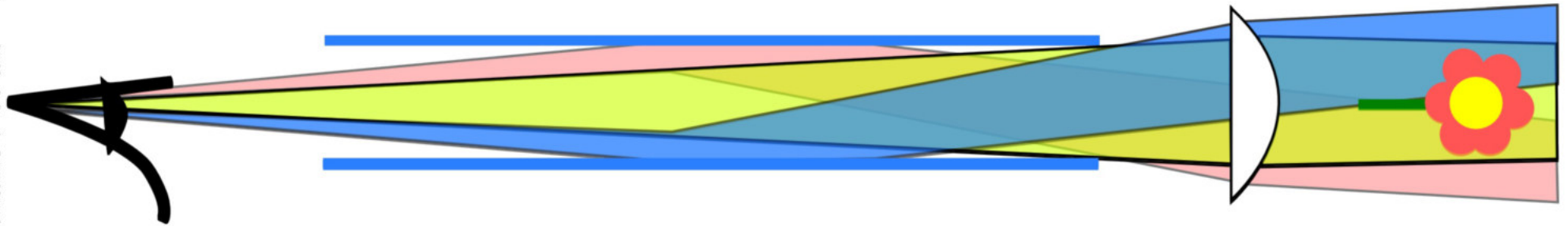
Comment générer plusieurs points de vue

- ... ou après une réflexion



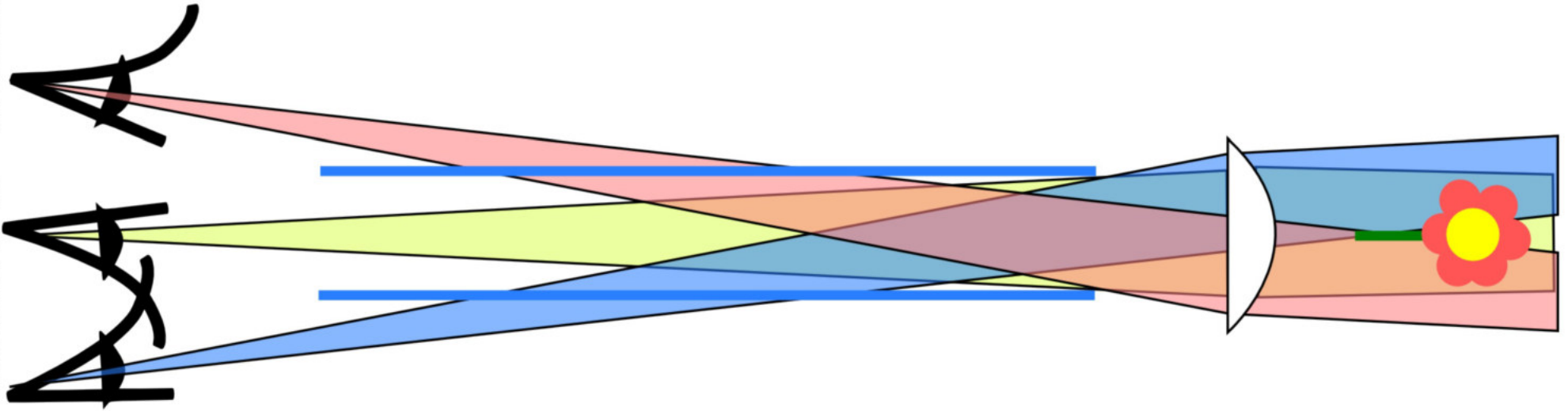
Comment générer plusieurs points de vue

- ... ou encore une autre



Comment générer plusieurs points de vue

- Points de vue virtuels



Manakov et al. – SIGGRAPH 2013



Image obtenue



Manakov et al. – SIGGRAPH 2013

Application 3: Light field

Manakov et al. – SIGGRAPH 2013



Prototype actuel

Manakov et al. – SIGGRAPH 2013

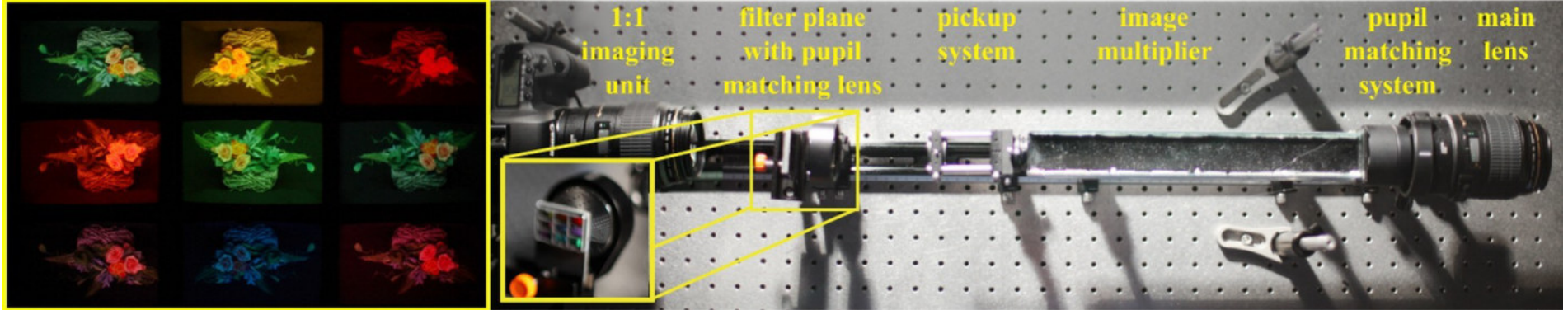
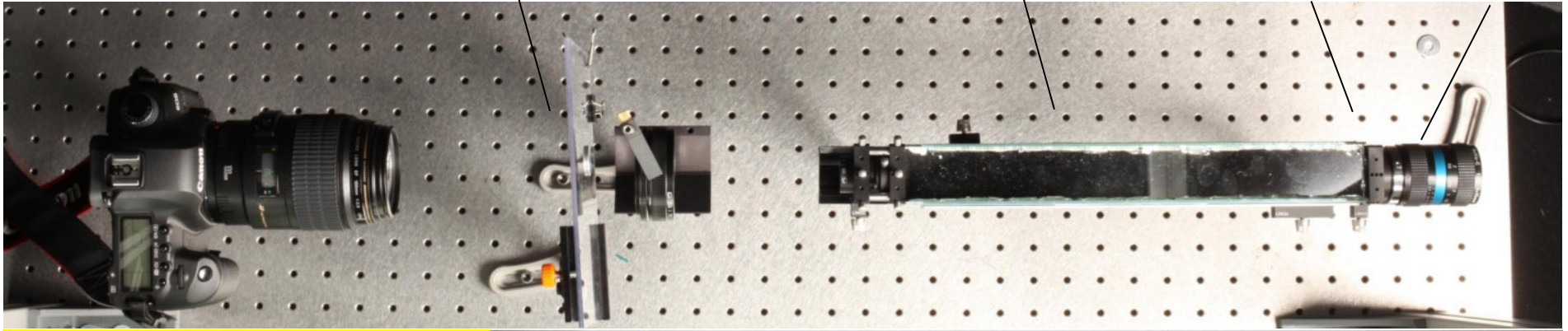
Camera

Filtres

Kaleidoscope

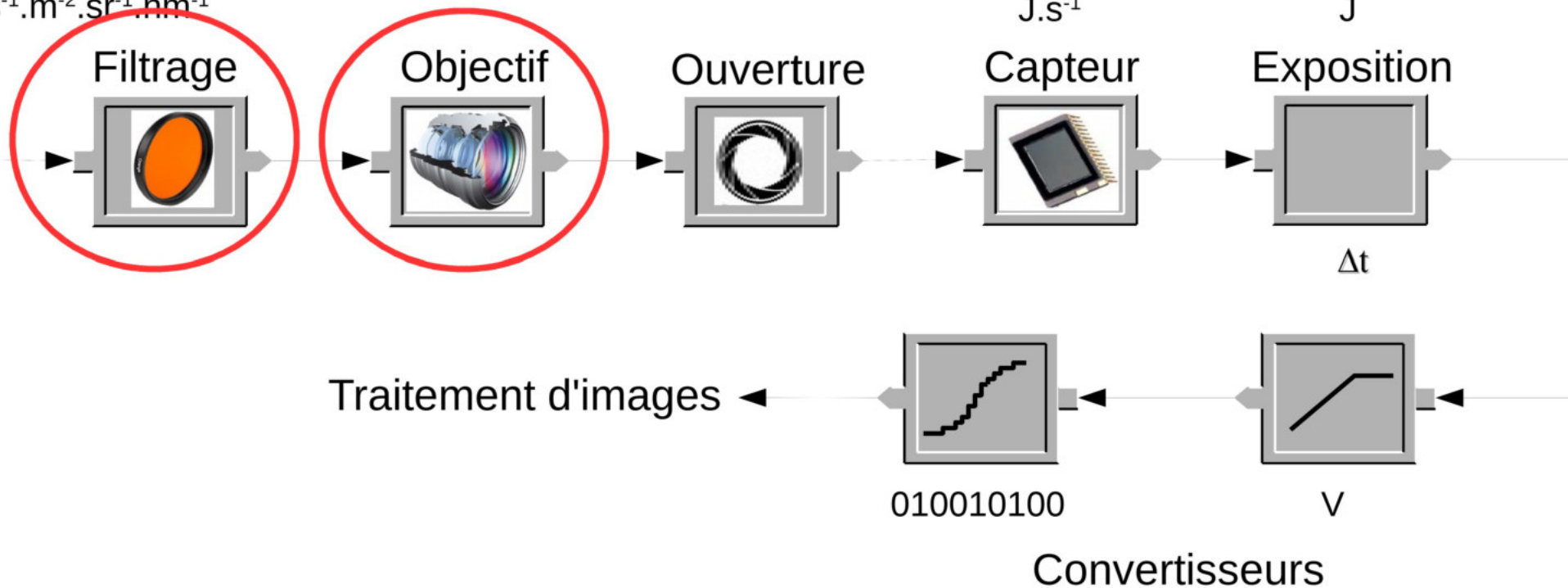
Diffuseur

Objectif



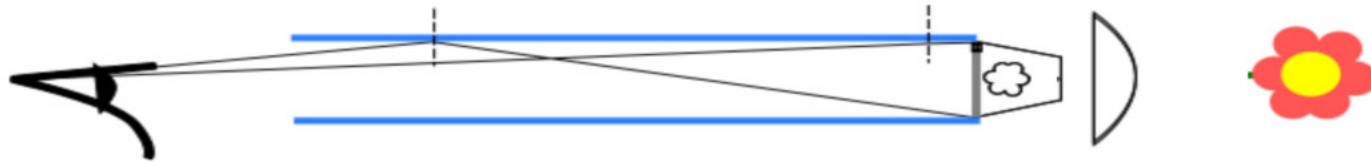
Plénoptique et champ lumineux

Luminance polarisée
 $J.s^{-1}.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$



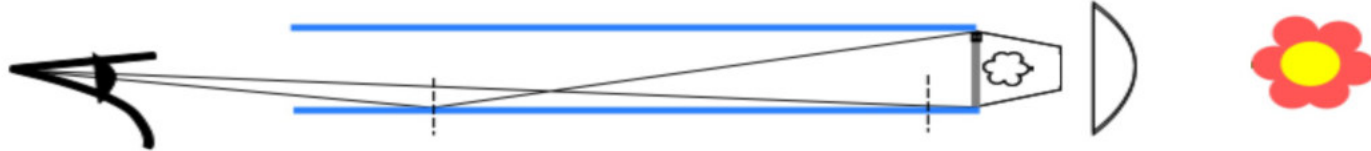
Comment faire plusieurs copies

- ... et aussi après une réflexion



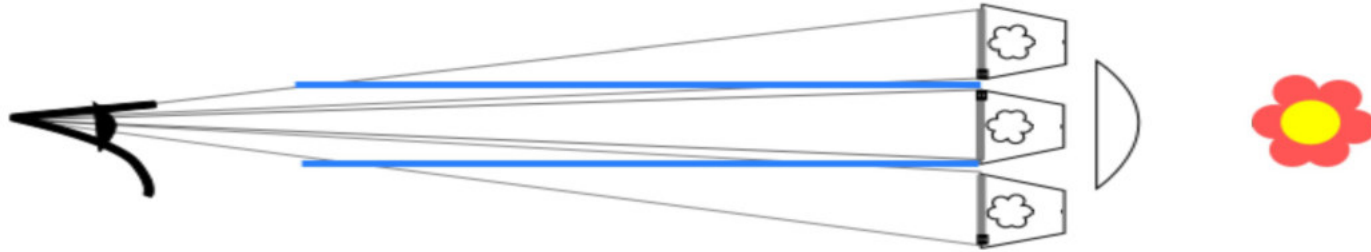
Comment faire plusieurs copies

- ... et une autre



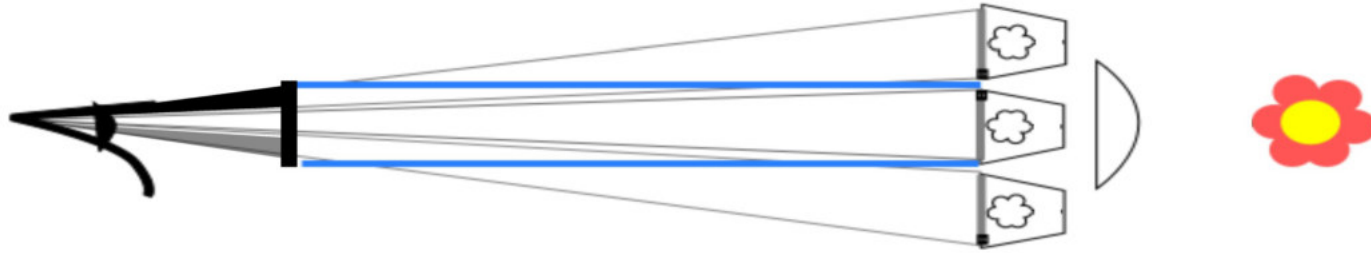
Comment faire plusieurs copies

- Cela correspond aux images de diffuseurs virtuels



Application 1: Imagerie HDR

Manakov et al. – SIGGRAPH 2013



Filtres
neutres

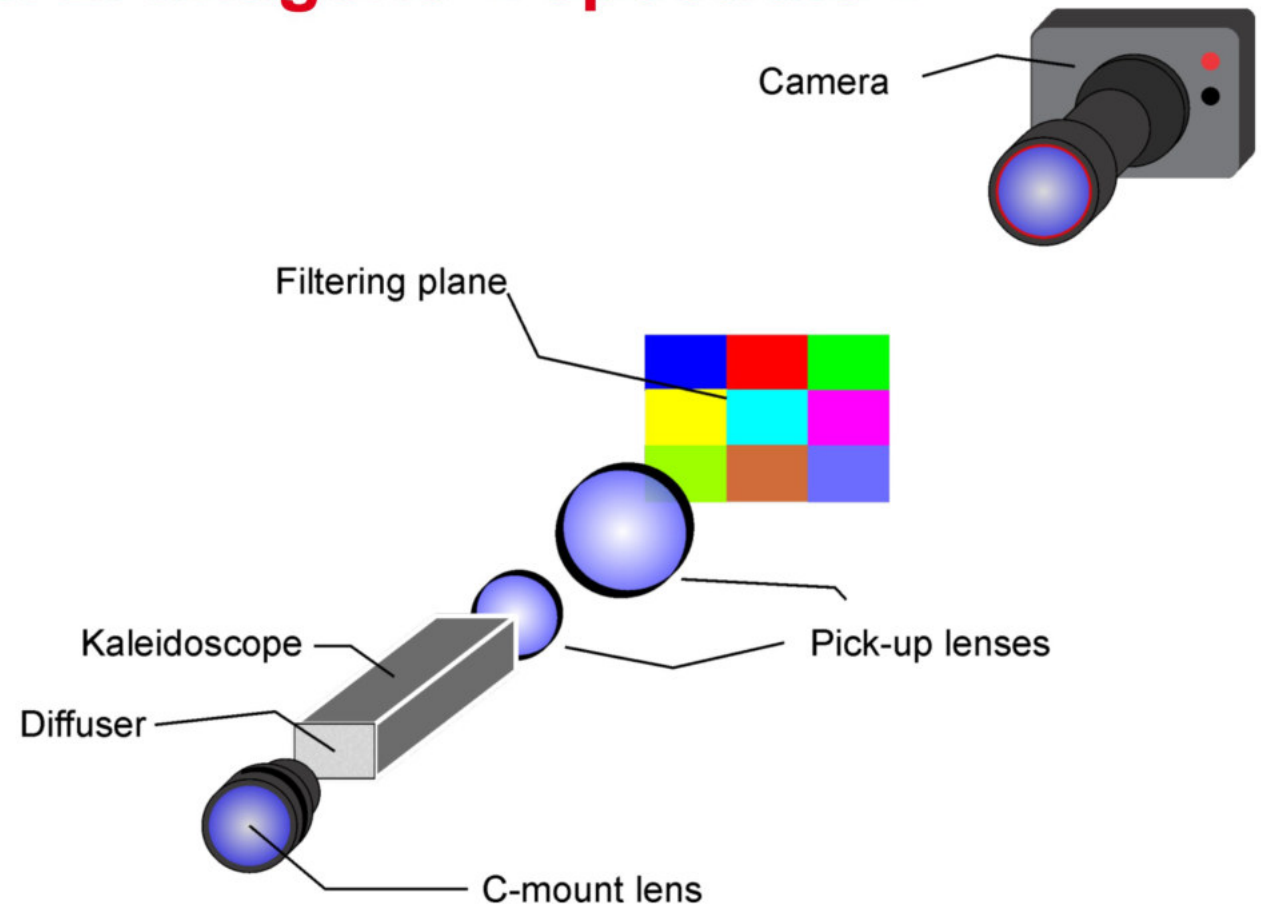
Application 1: Imagerie HDR

Manakov et al. – SIGGRAPH 2013



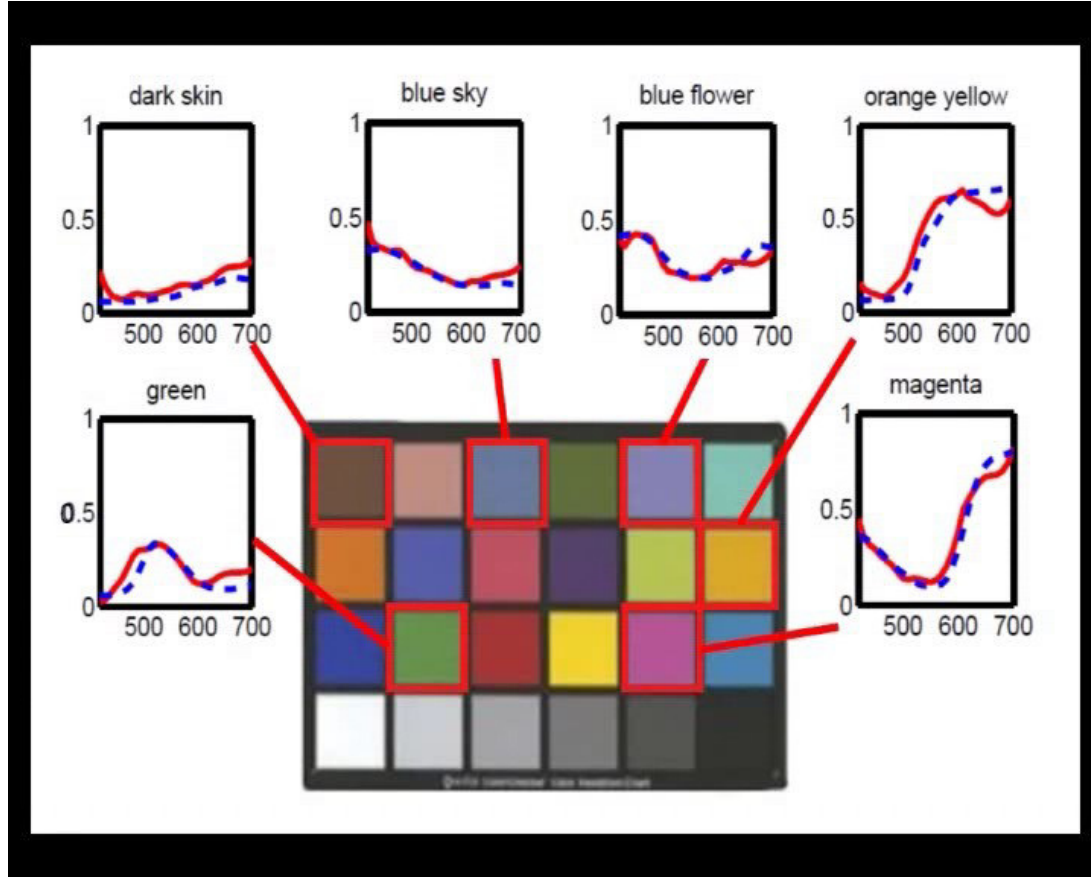
Application 2: Imagerie « spectrale »

Manakov et al. – SIGGRAPH 2013



Application 2: Imagerie « spectrale »

Manakov et al. – SIGGRAPH 2013



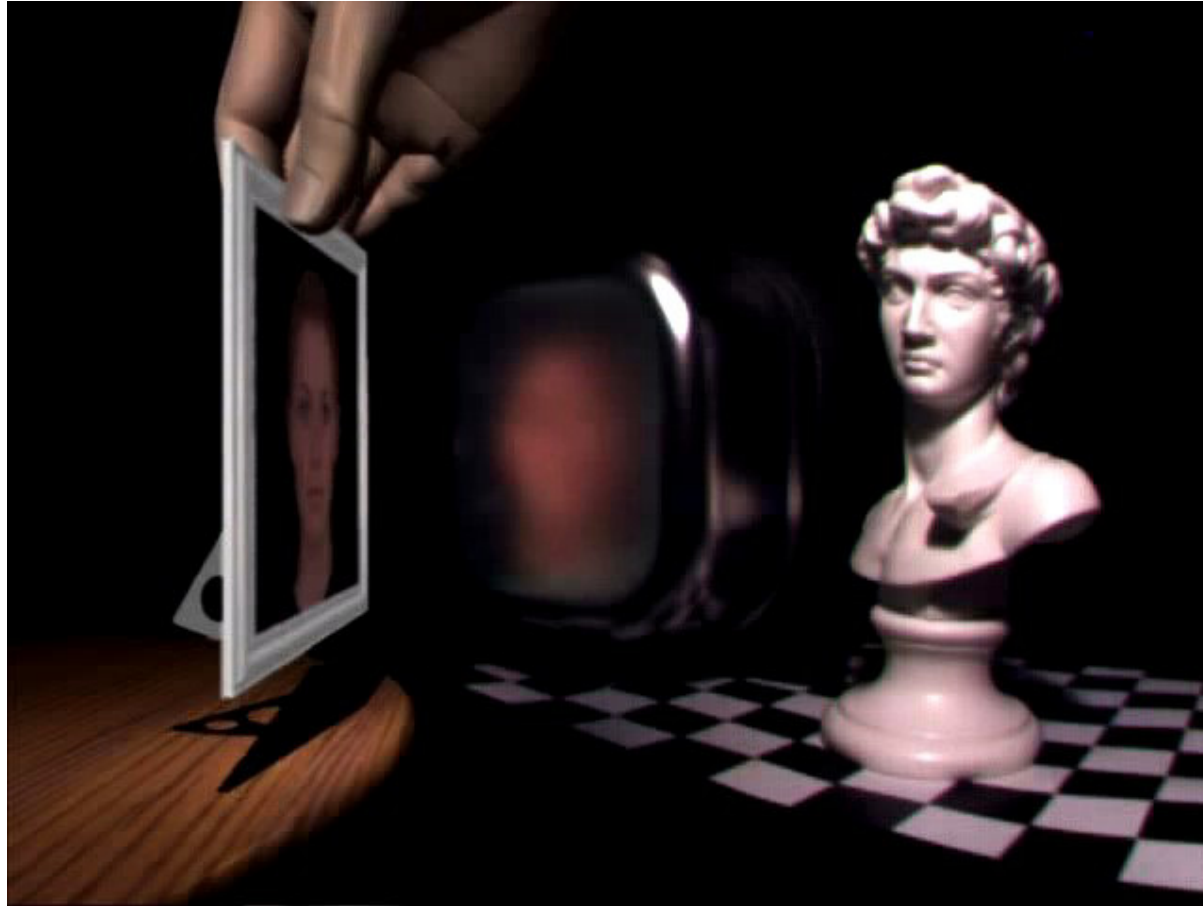
6

Conclusion

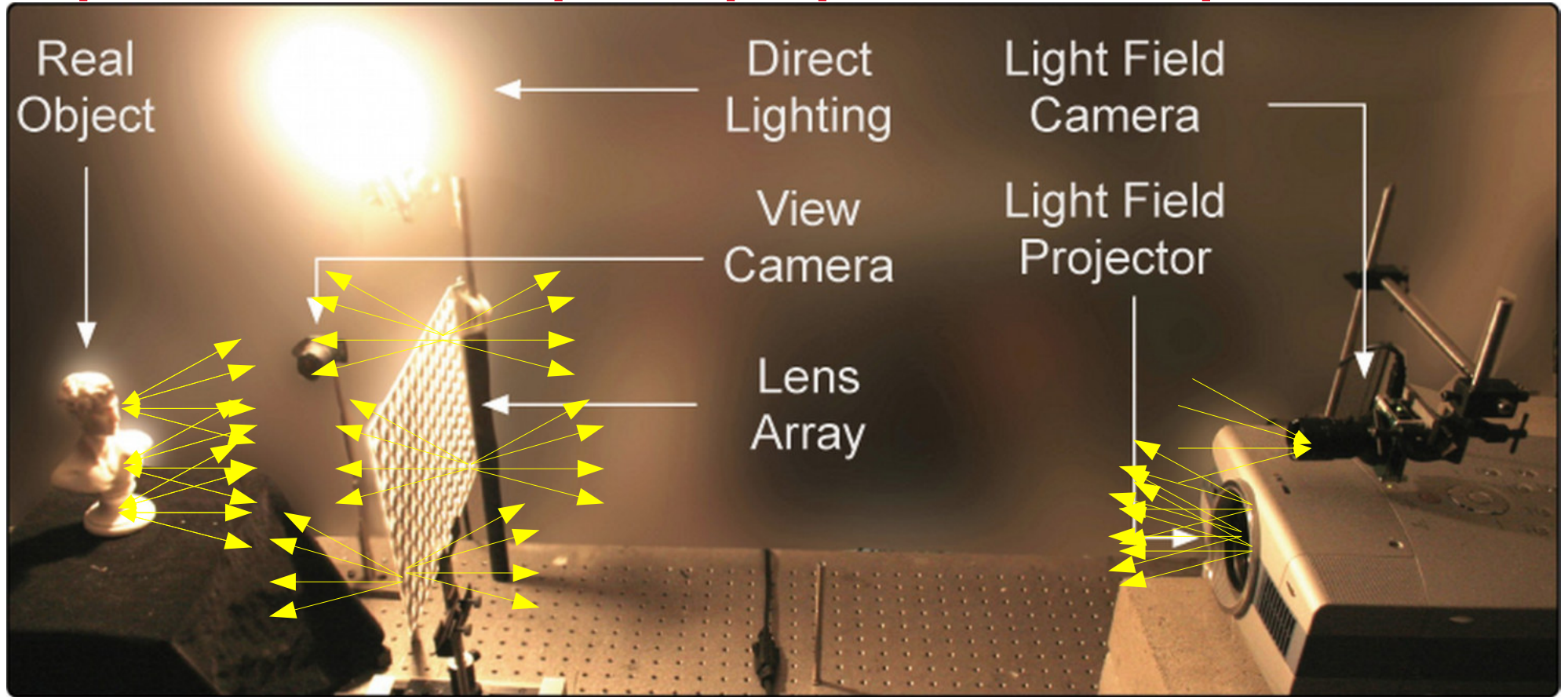
Résumé : les principaux concepts

- Plus qu'une simple couleur dans pixel
 - Luminance le long de rayons (champ lumineux)
 - Étendu avec la notion de phase, temps, polarisation, spectre, ...
- Principes généraux
 - Concevoir le système optique pour faciliter le problème inverse
 - Multiple images avec différents
 - filtres, point de vue, ouverture,
 - Reconstruction du champ de luminance
 - traitement et combinaison d'images

Convergence réel - virtuel



Représentation unique : optique et numérique



Cossairt – SIGGRAPH 2008

MERCI

<http://xgranier.free.fr>