

Au-delà de l'imagerie traditionnelle: Intégration optique et informatique

Xavier Granier

► **To cite this version:**

Xavier Granier. Au-delà de l'imagerie traditionnelle: Intégration optique et informatique. J-FIG 2018
- Journées Françaises d'Informatique Graphique, Nov 2018, Poitiers, France. pp.1-120. hal-01923098

HAL Id: hal-01923098

<https://hal.inria.fr/hal-01923098>

Submitted on 14 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

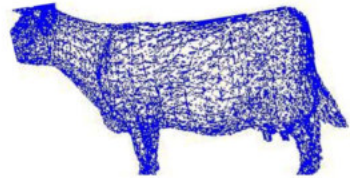
Introduction

Du monde réel au monde virtuel

Monde réel



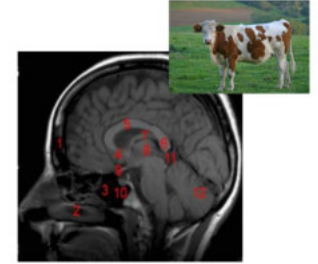
Modélisation
Acquisition



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



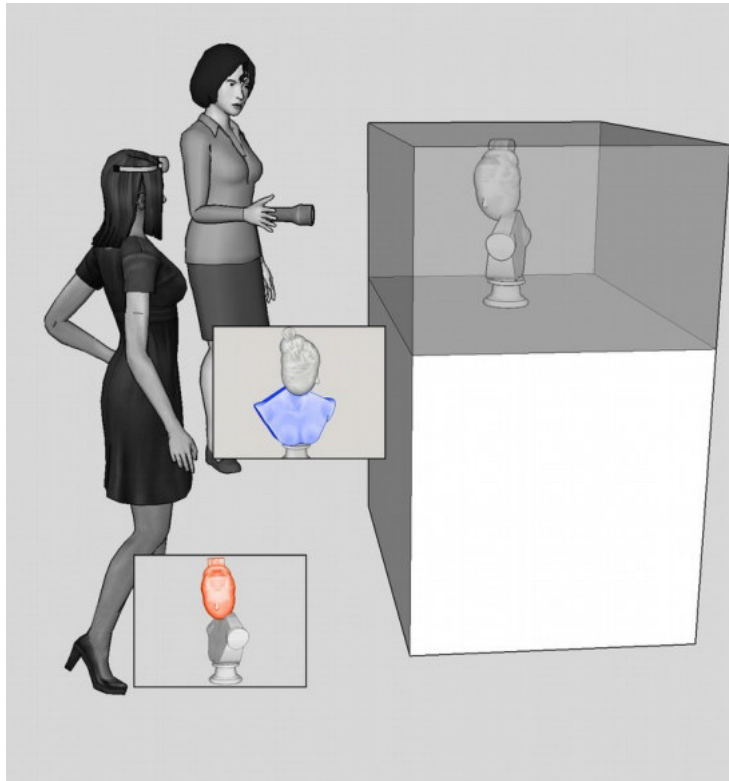
ACM JOCCH 2014

Limitations

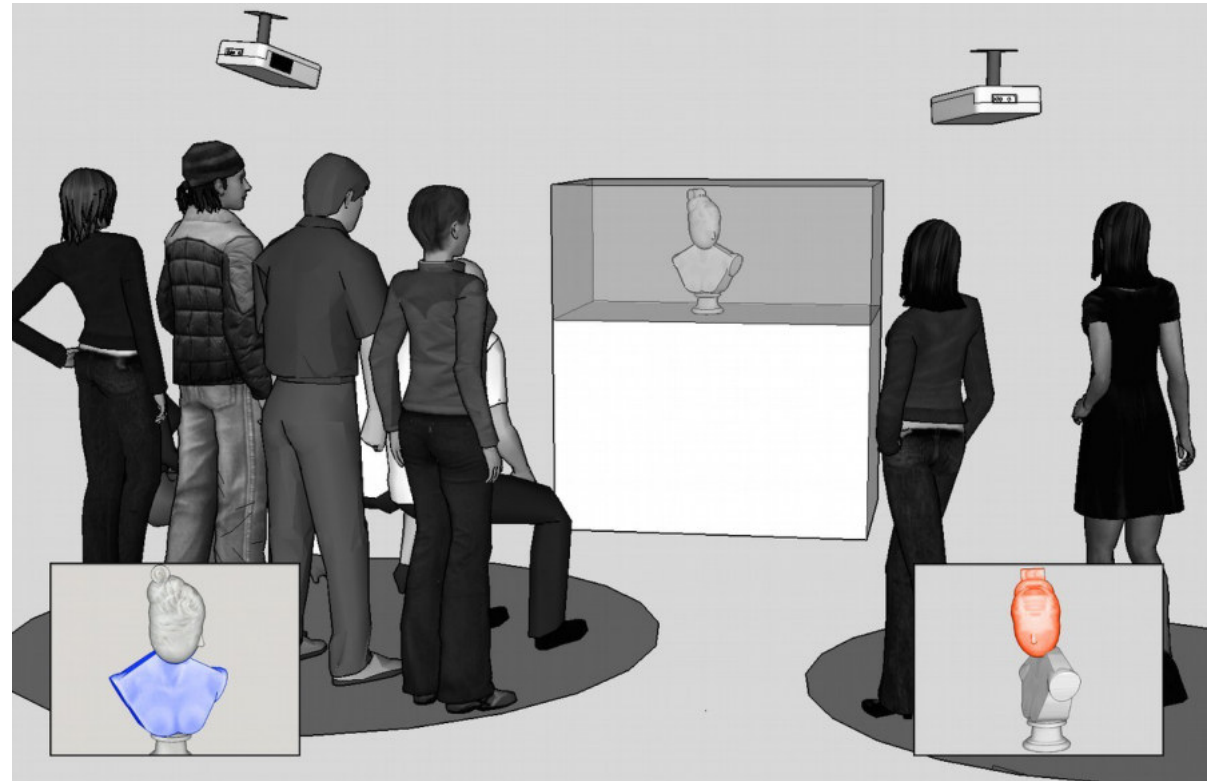
- Pas vraiment applicable pour de grandes installations
 - Une seule personne peut interagir
 - Même vue pour tous
- Les besoins
 - Plusieurs usagers
 - Des expériences visuelles différenciées

EgoSAR - Proposition de 2 scenarii

IEEE ISMAR 2016



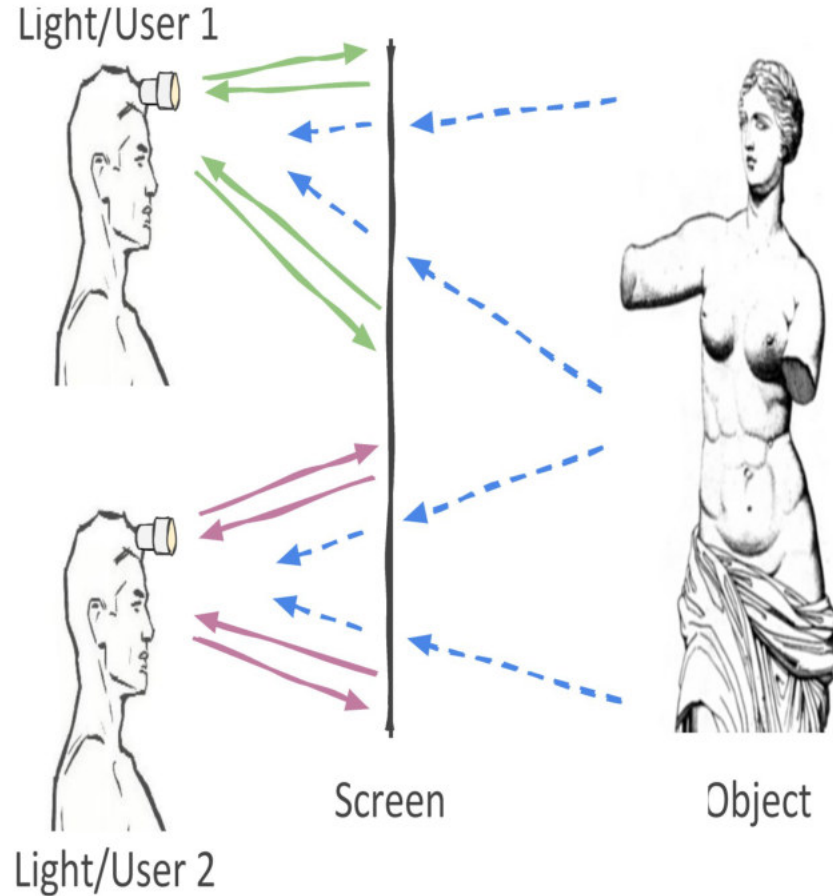
Usagers actifs



Usagers passifs

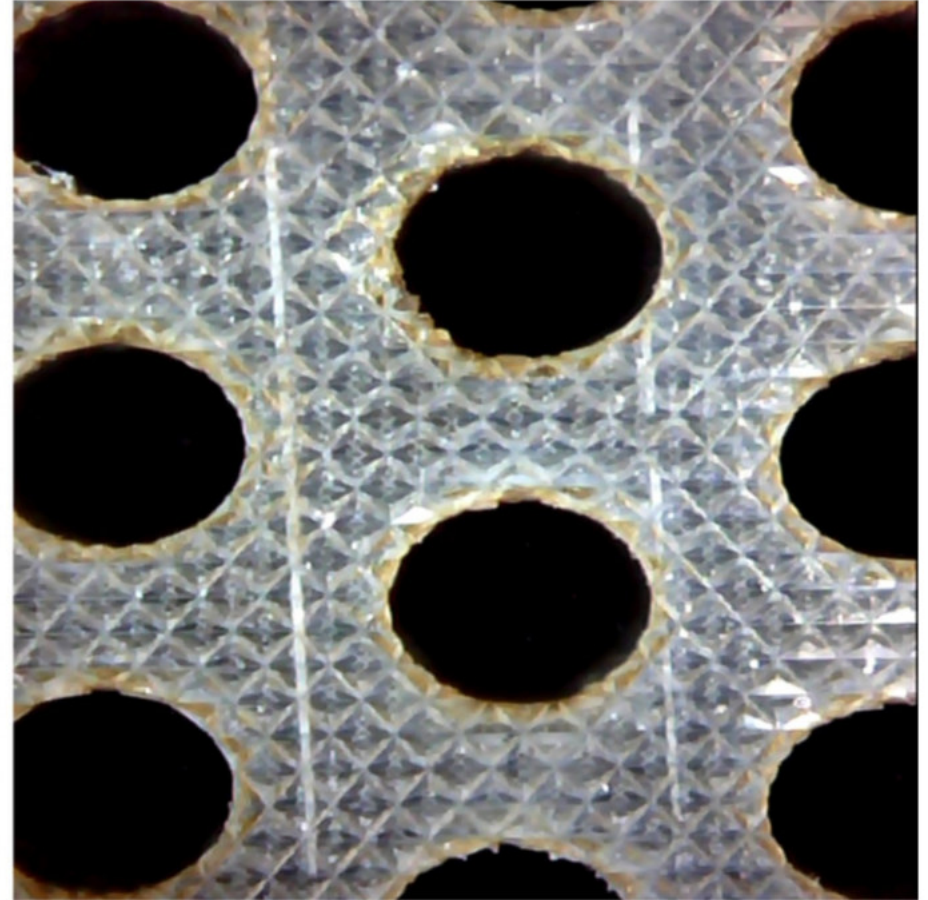
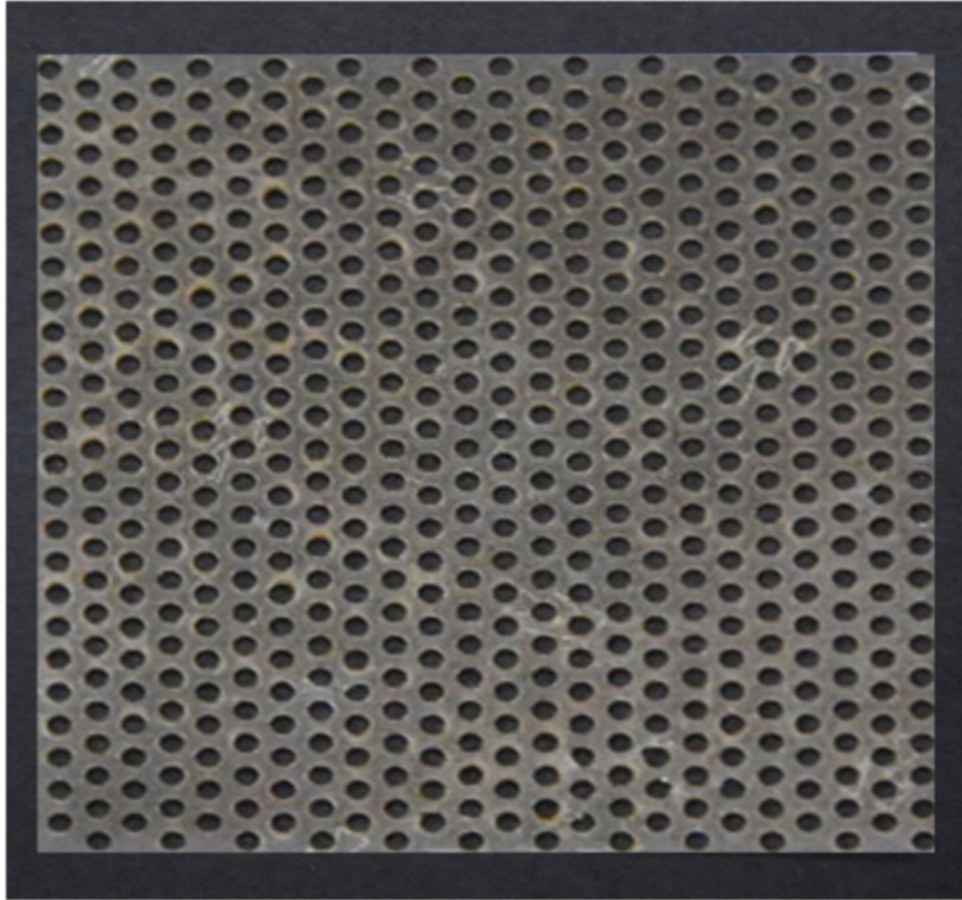
EgoSAR : une vitrine rétro-réfléchissante

IEEE ISMAR 2016



1^{er} prototype : film rétro réfléchissant perforé

IEEE ISMAR 2016



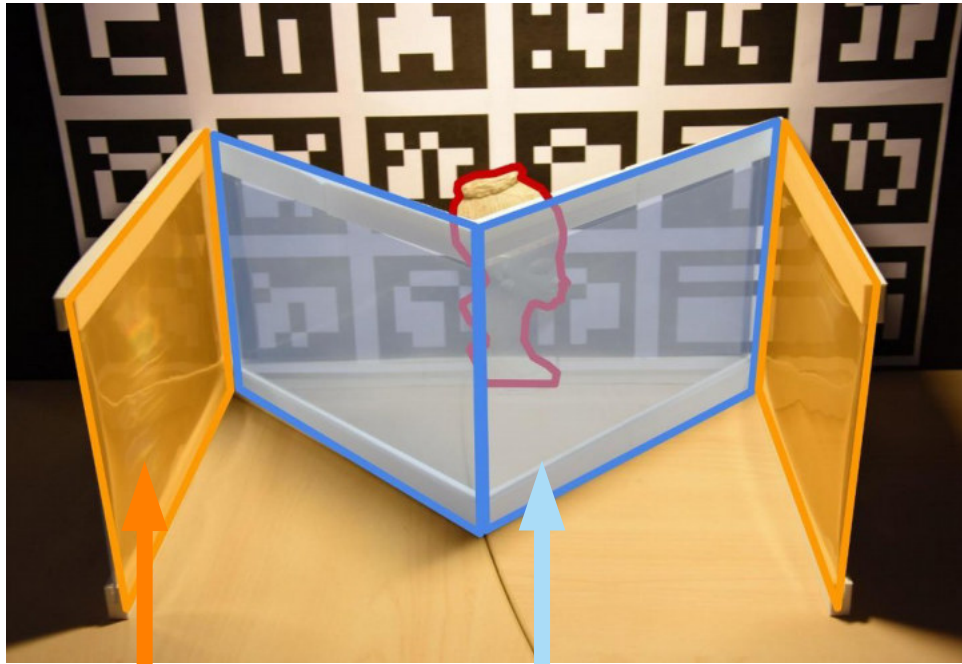
1^{er} prototype : film rétro réfléchissant perforé

IEEE ISMAR 2016



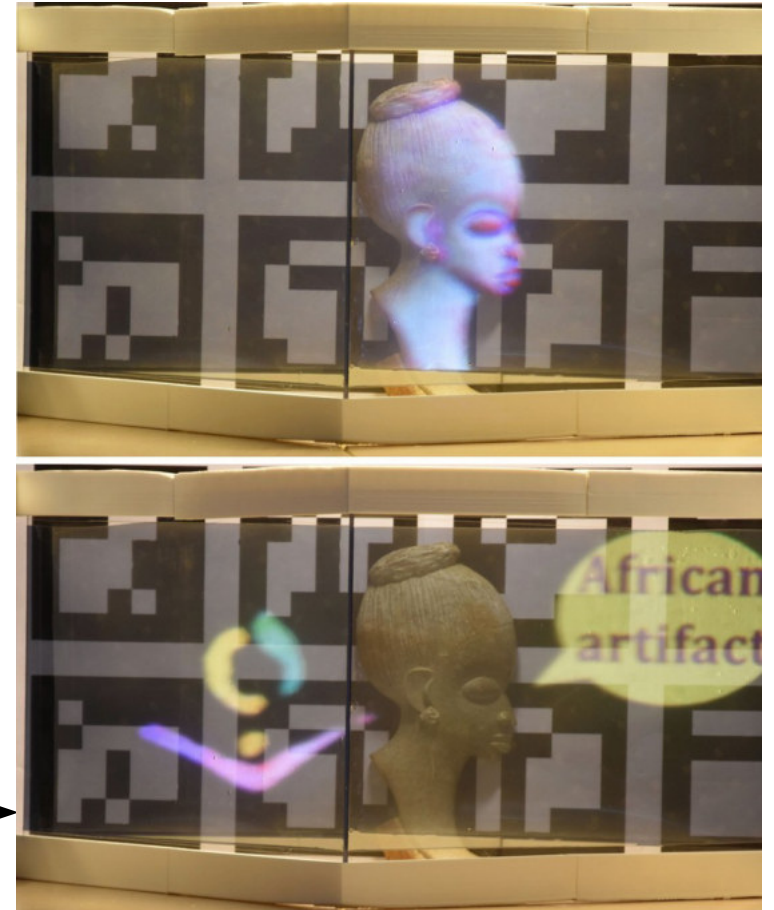
2nd prototype : rétro réflexion indirecte

IEEE ISMAR 2016

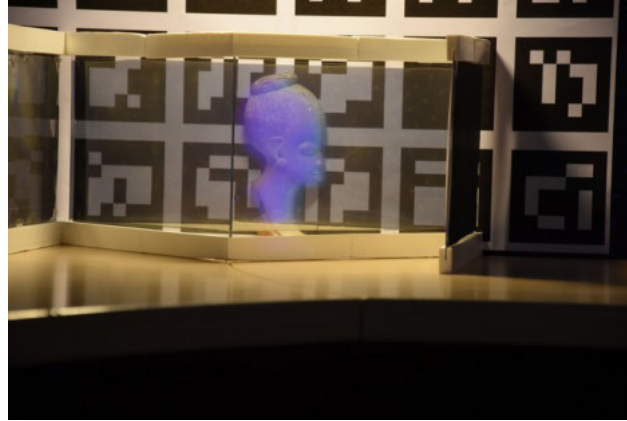
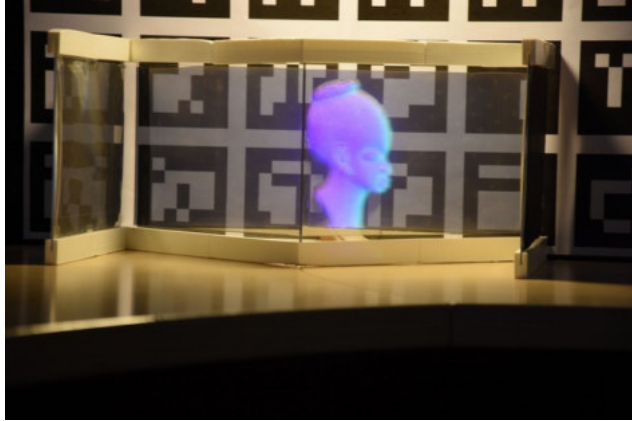


Rétro réflexion Lame semi-transparent

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

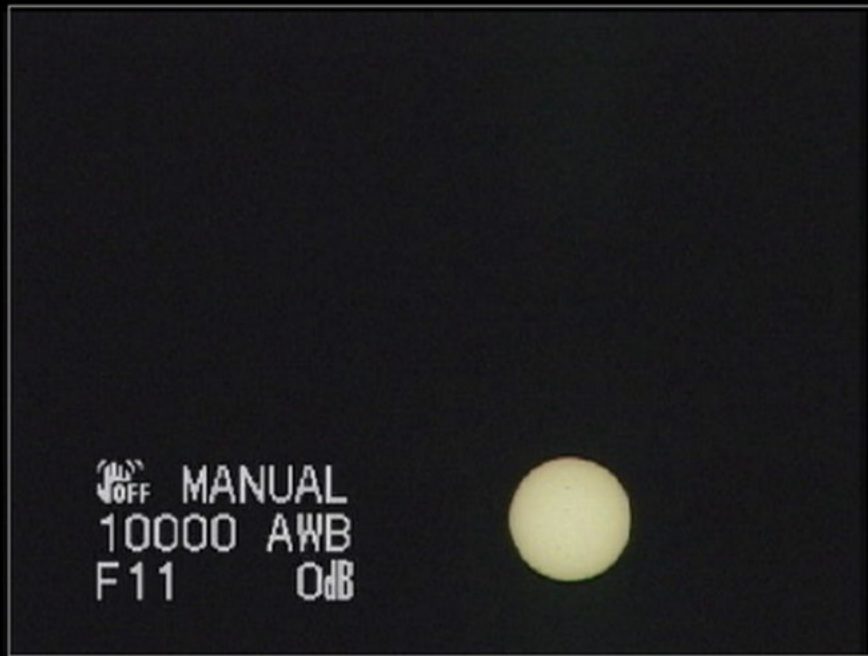
Dynamic Range in the Real World



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



1



1500



25,000



400,000



2,000,000,000

The real world is high dynamic range.

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

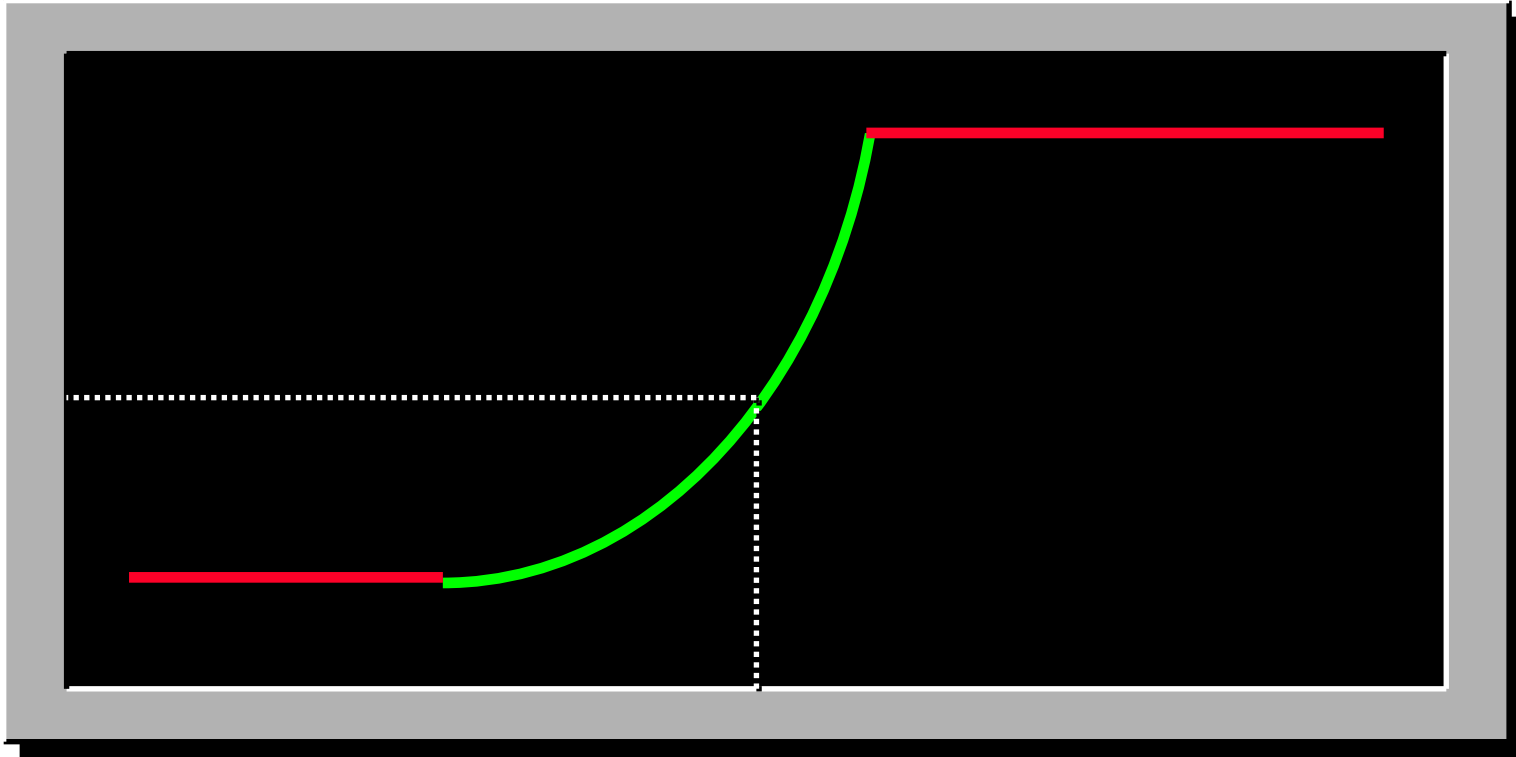
Capteur : processus physique

- 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



$\log \text{ exposition} = \log (\text{éclairage} * \Delta t)$
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

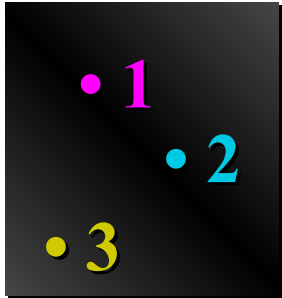
Comment obtenir une carte d'éclairement ?

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

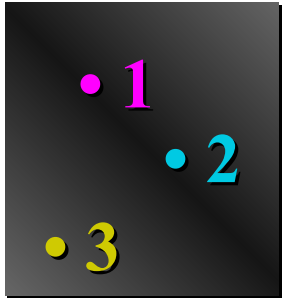
$$E_p \simeq \sum_k \frac{w(Z_{pk})}{\sum_k w(Z_{pk})} \frac{f^{-1}(Z_{pk})}{\Delta t_k}$$

Ex: Algorithme de Debevec et Malik (1997)

Un séquence d'images avec différent temps d'exposition



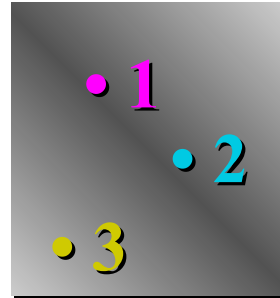
$\Delta t =$
1/64 sec



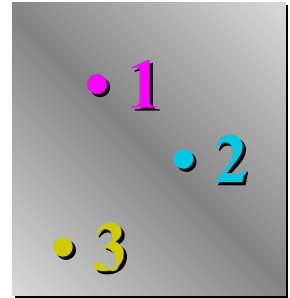
$\Delta t =$
1/16 sec



$\Delta t =$
1/4 sec



$\Delta t =$
1 sec



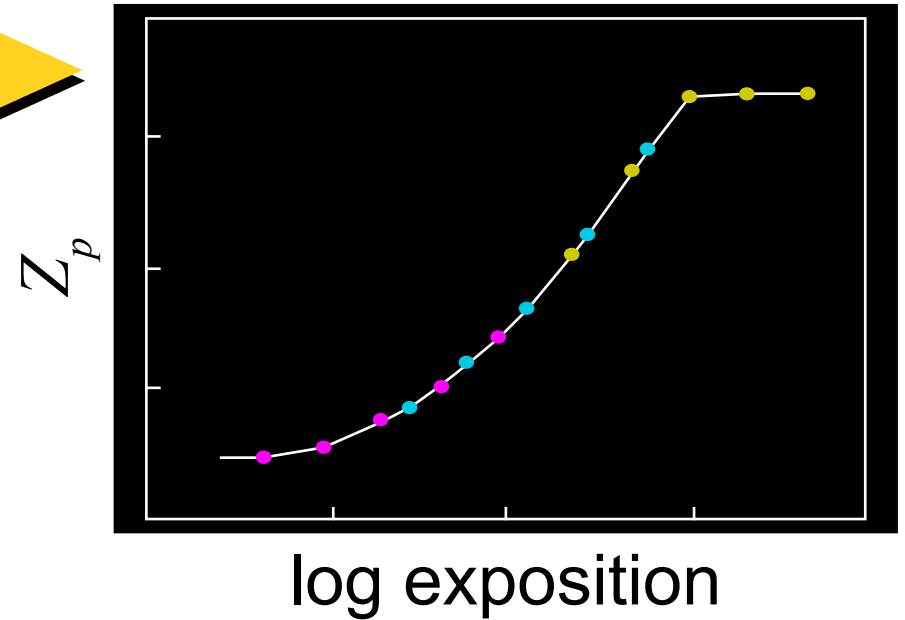
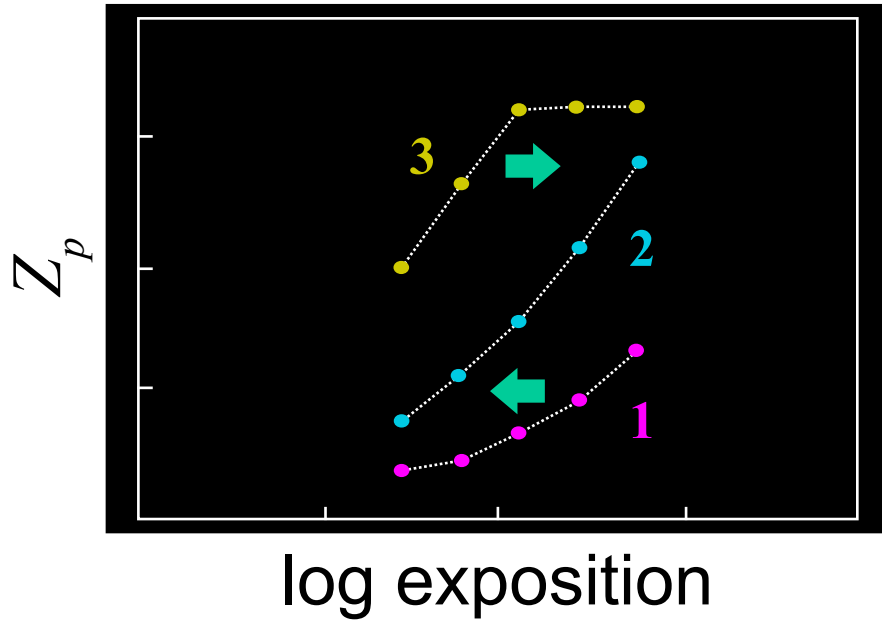
$\Delta t =$
4 sec

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

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

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)
- Mise en place du problème

$$g(Z_{pk}) = \log E_p + \log \Delta_k$$

Fonction d'objectif

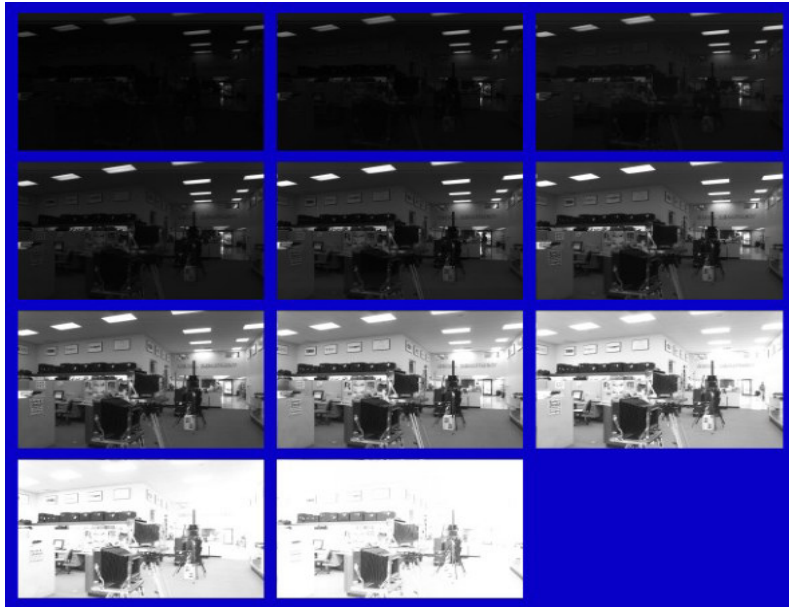
$$\underbrace{\sum_k \sum_p \left[\log E_p + \log \Delta t_k - g(Z_{pk}) \right]^2}_{\text{Erreur Quadratique}} + \lambda \underbrace{\sum_{z=Z_{\min}-1}^{Z_{\max}+1} \partial_{zz}^2 g(z)^2}_{\text{Lissage / régularisation}}$$

Erreur Quadratique

Lissage / régularisation

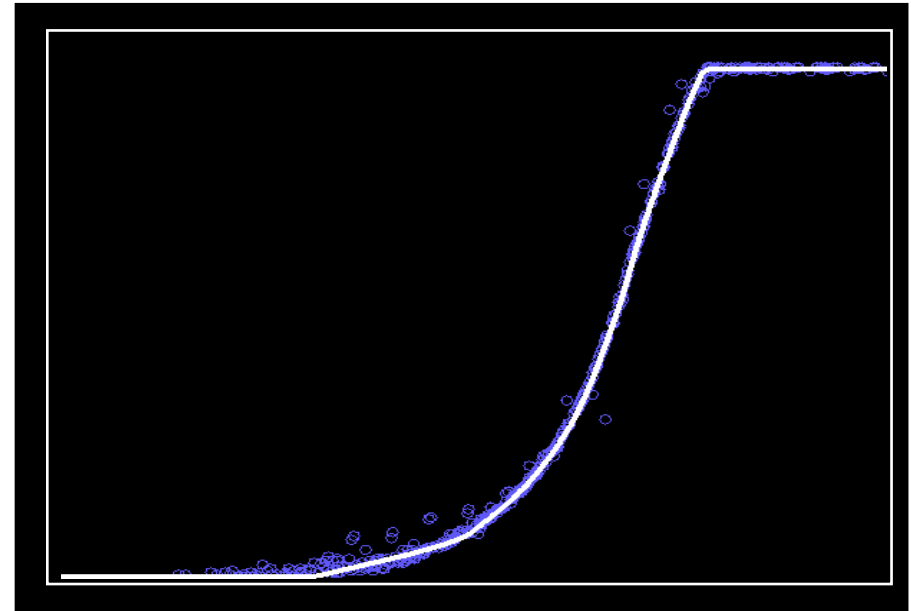
Résultat sur un Kodak DCS460

Temps d'exposition
de 1/30 à 30 sec



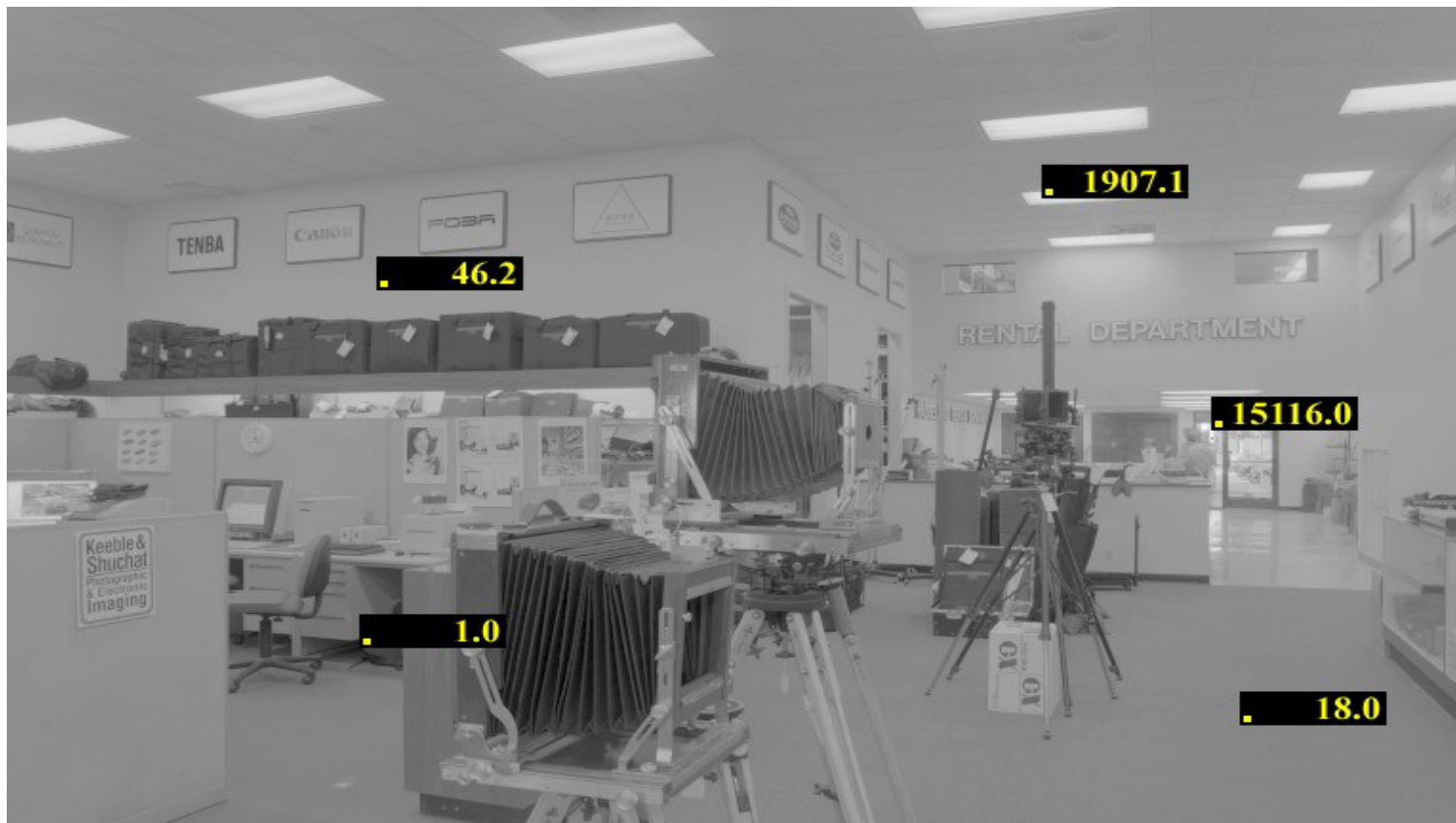
Courbe de réponse estimée

Z_p



log Exposition

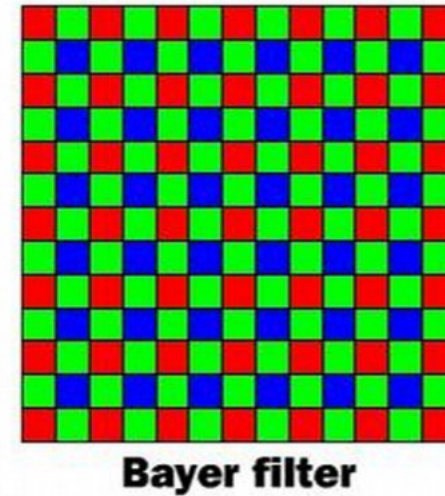
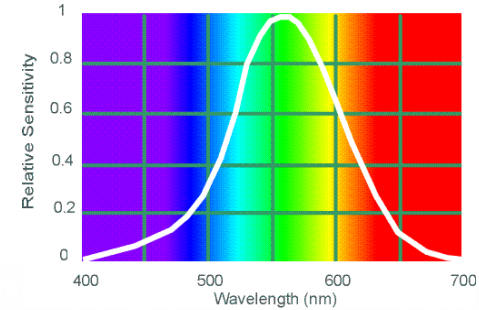
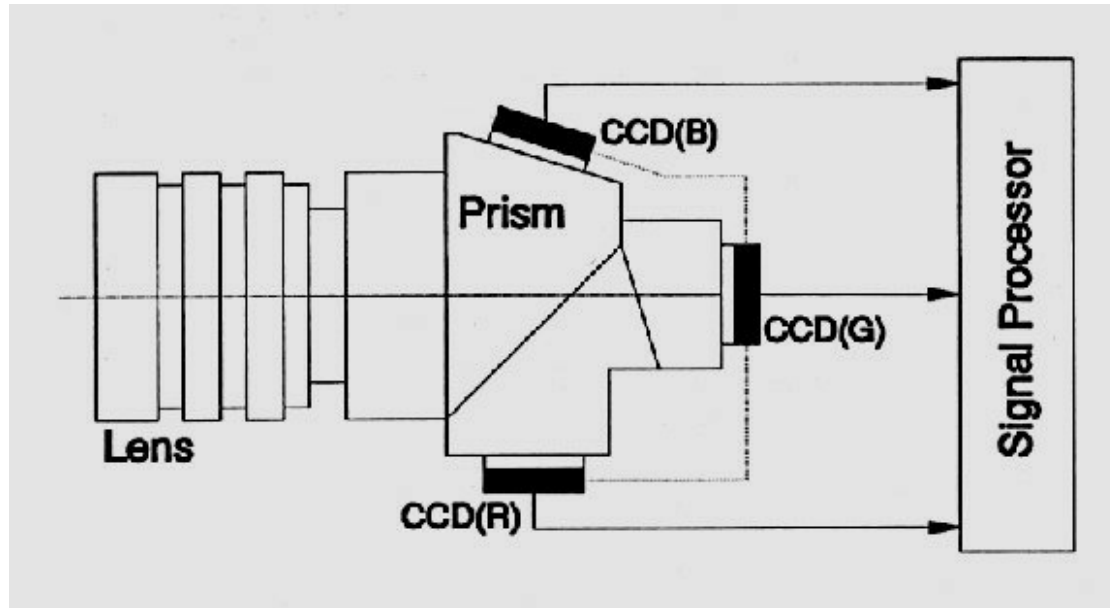
Carte d'irradiances relatives



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

Attention à la couleur

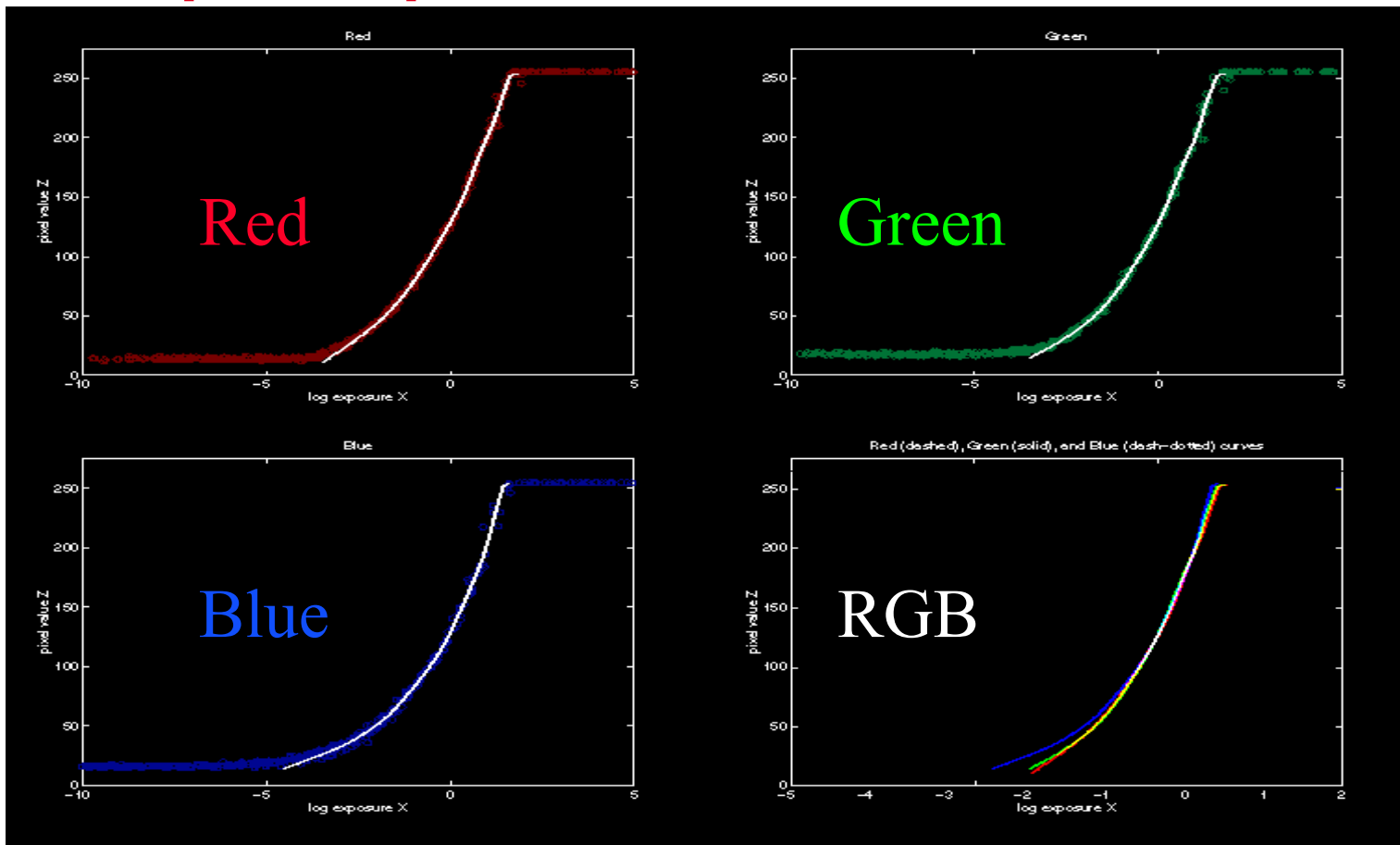
3 capteurs vs. 1 capteur : qualité vs. coût



Ruff Works

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

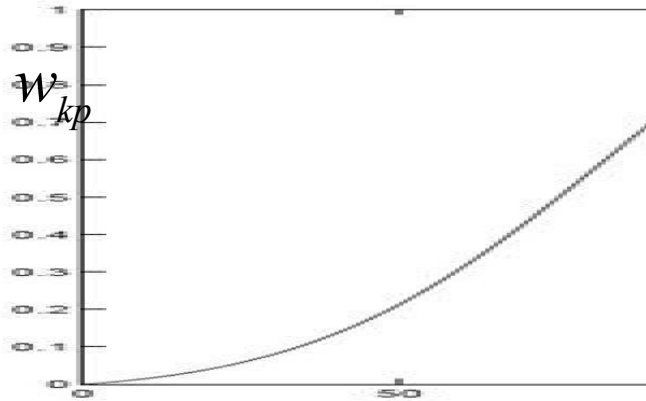
Courbe de réponse par couleur



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

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

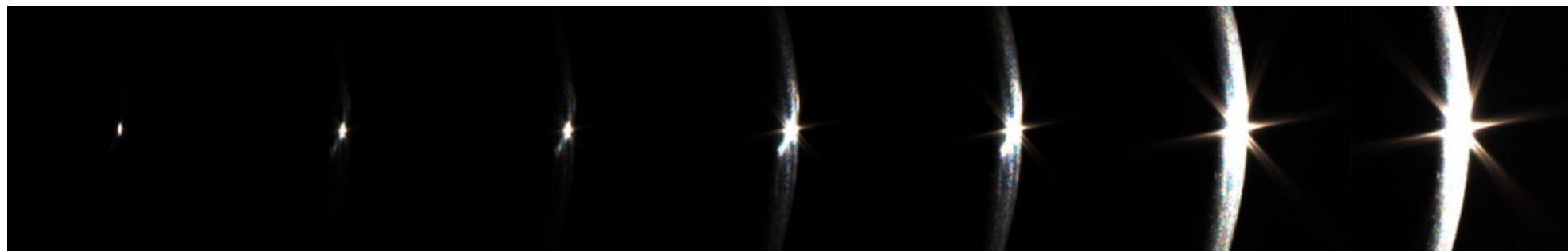
Problème à résoudre

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

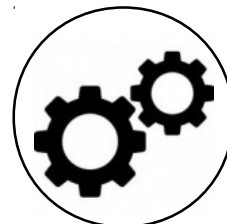


Image HDR

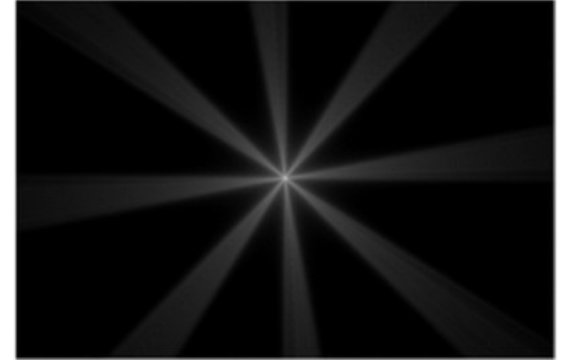


Algorithme en 2 étapes

1) Estimer la PSF due au diaphragme

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

$$PSF =$$

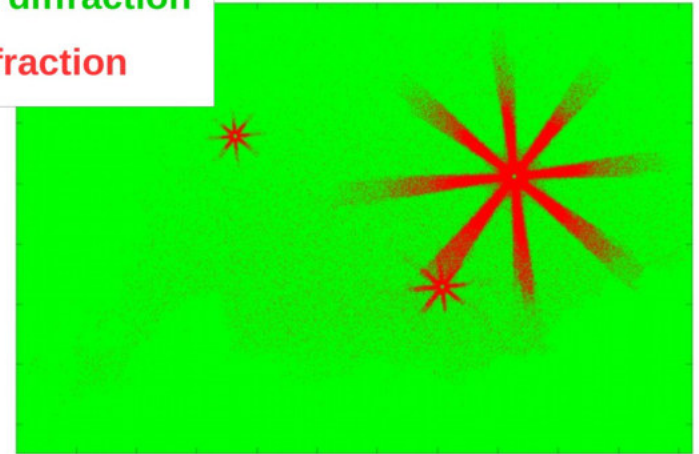


2) Classifier les pixels



Pas de diffraction

Diffraction



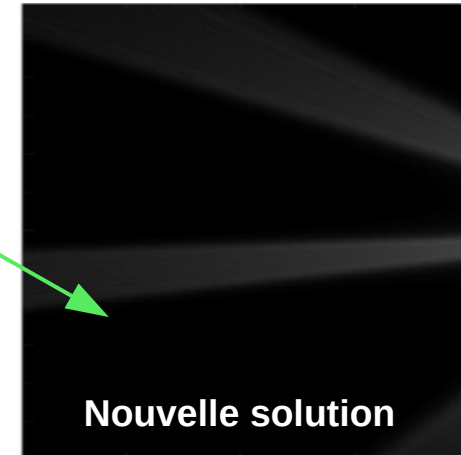
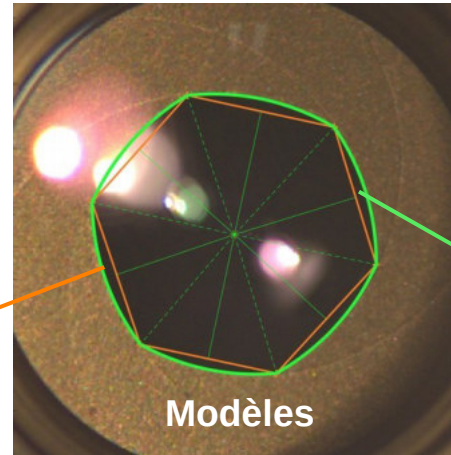
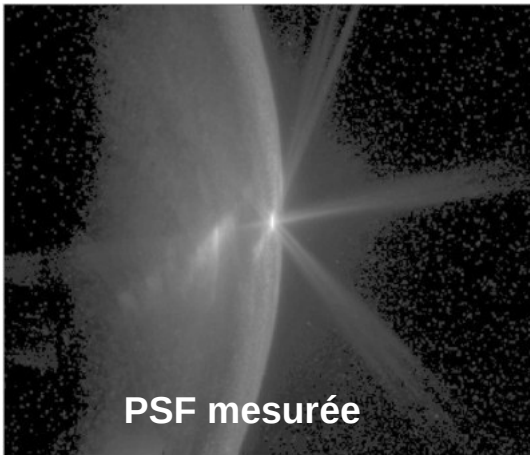
Estimer la PSF

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

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

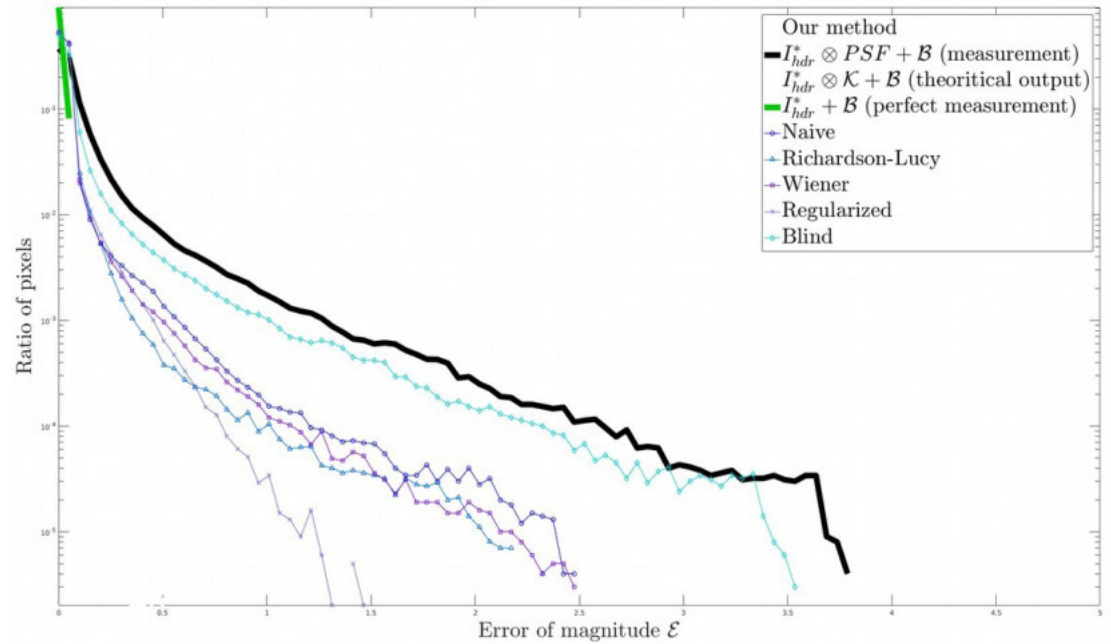
$$PSF \propto |\mathcal{F}[\text{diaphragm}]|^2$$

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

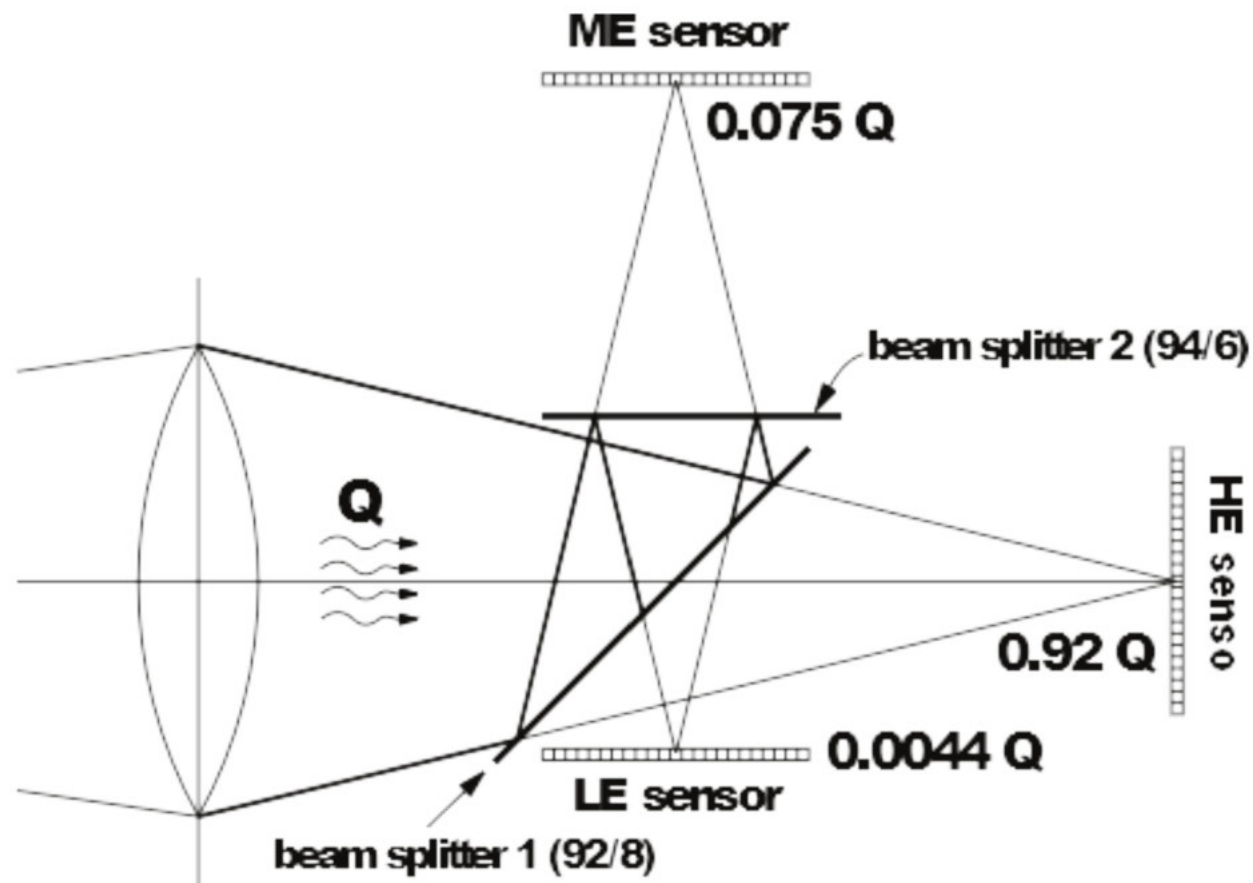


MAM 2017

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

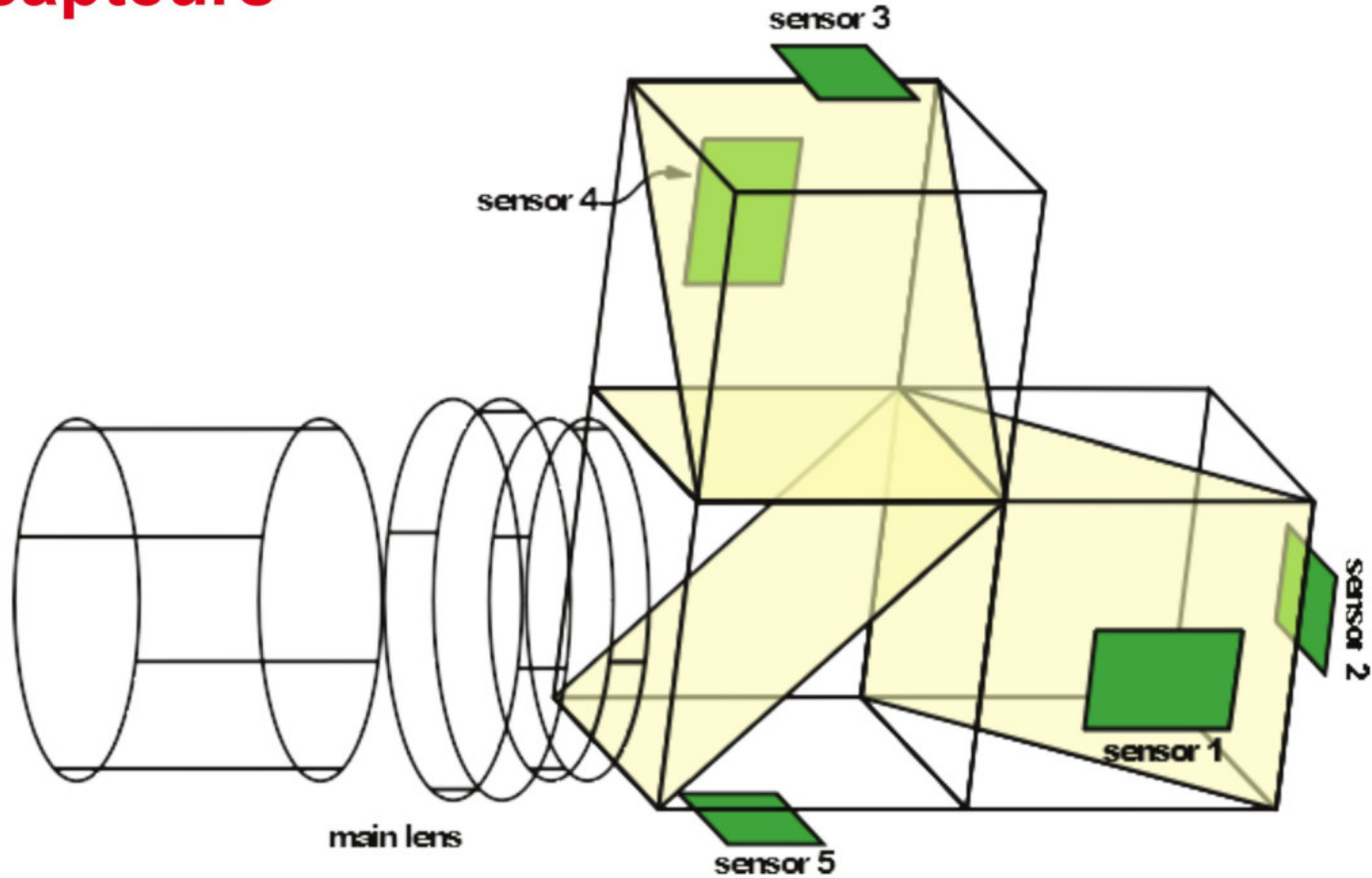
ACM SIGGRAPH 2011



www.ampHDR.com

agl.unm.edu

Avec 5 capteurs

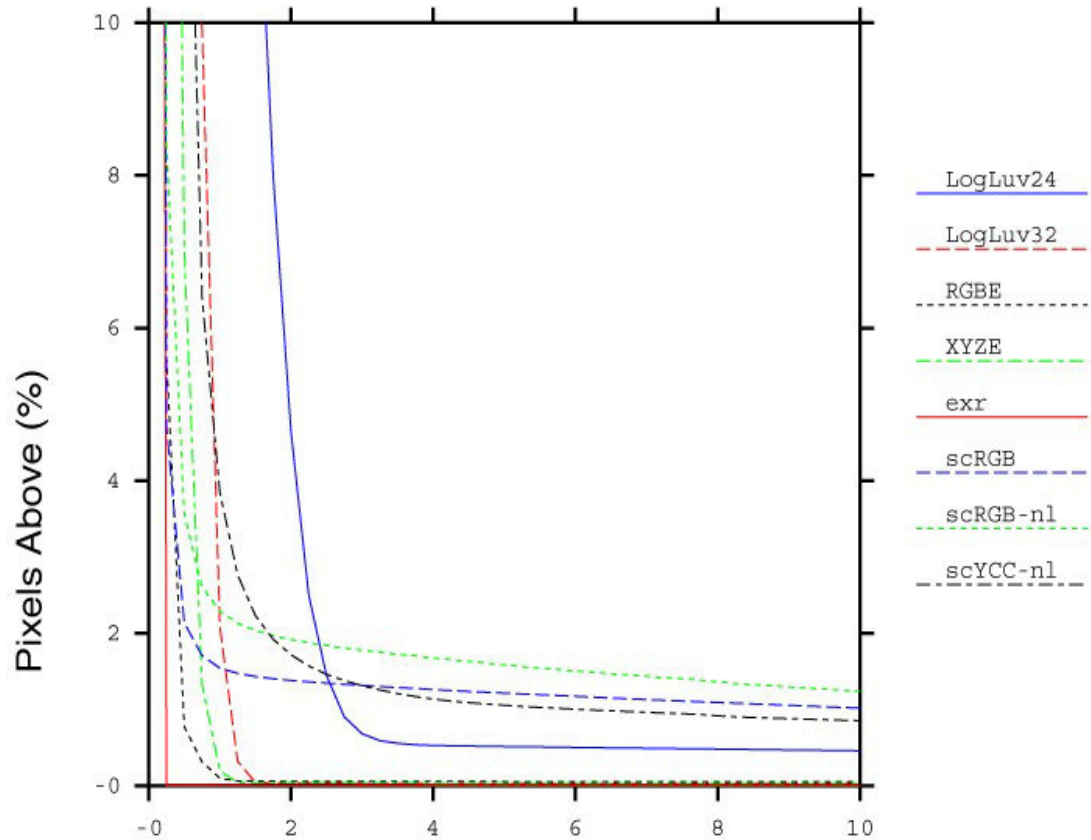


MAM 2017

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)

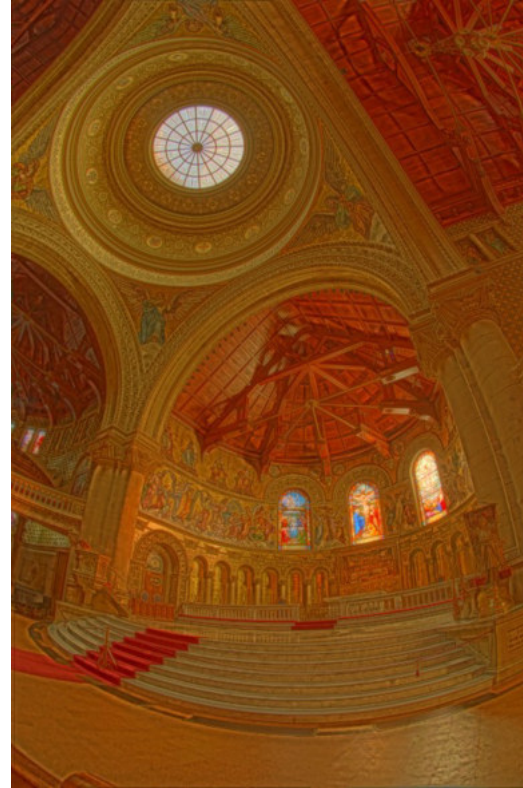


Corriger pour pouvoir afficher

Esthétique



Cognitif



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

Perceptuel



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

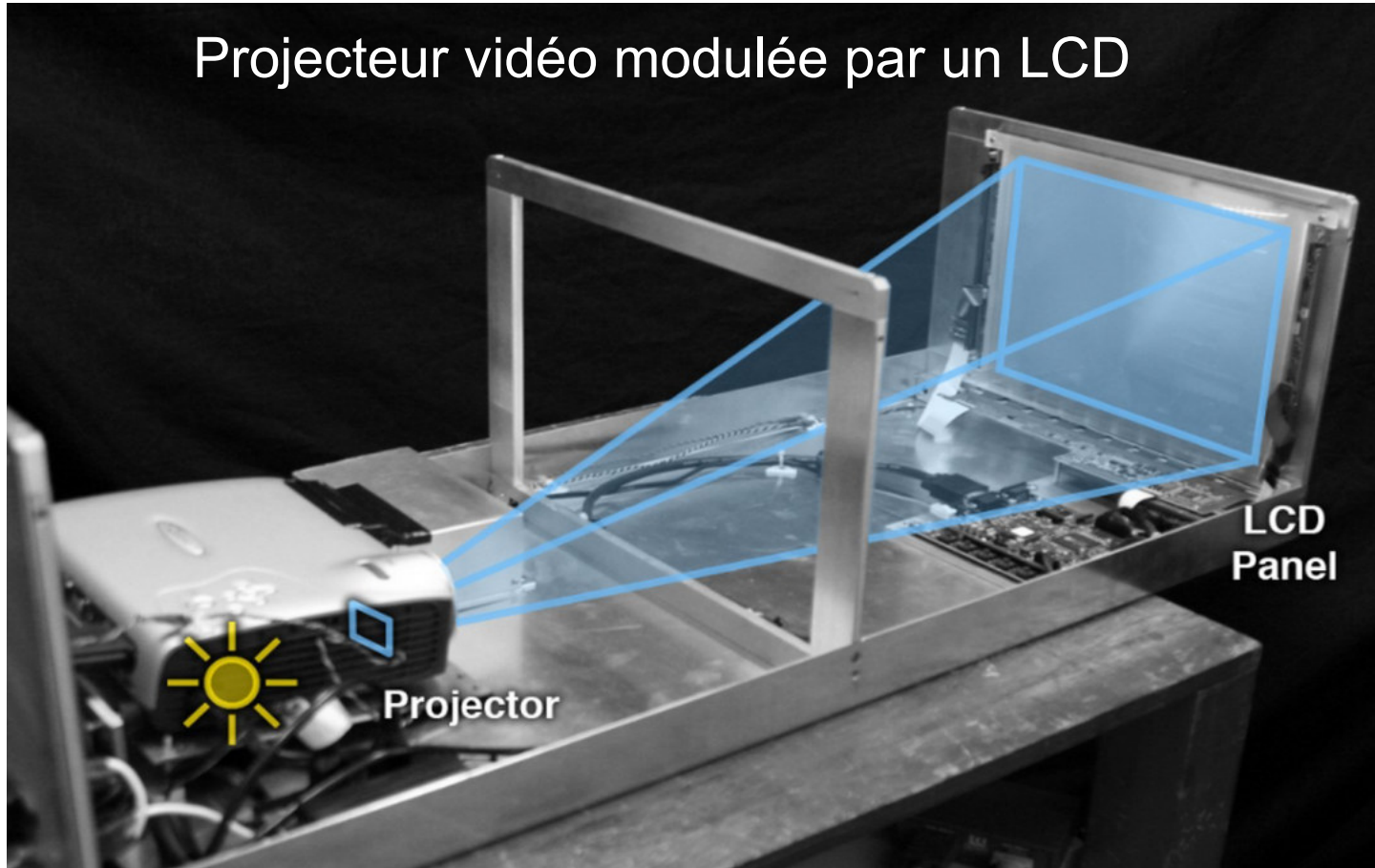


Autres solutions, aller vers des écrans HDR

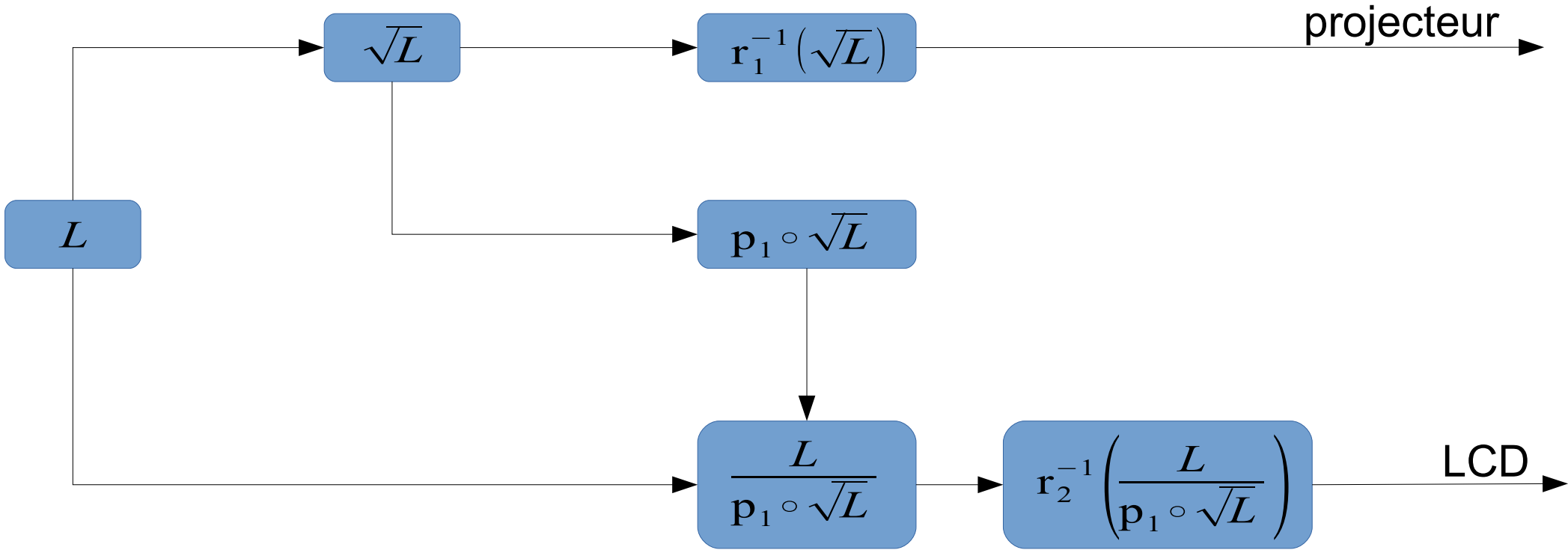
- Principe : augmenter le taux de contraste
 - Afficheurs en cascade
- Afficheur 1 : taux de contraste $c_1:1$
- Afficheur 2 : taux de contraste $c_2:1$
- Taux de contraste total $c_1 * c_2:1$

HDR Display : prototype 1 (2002)

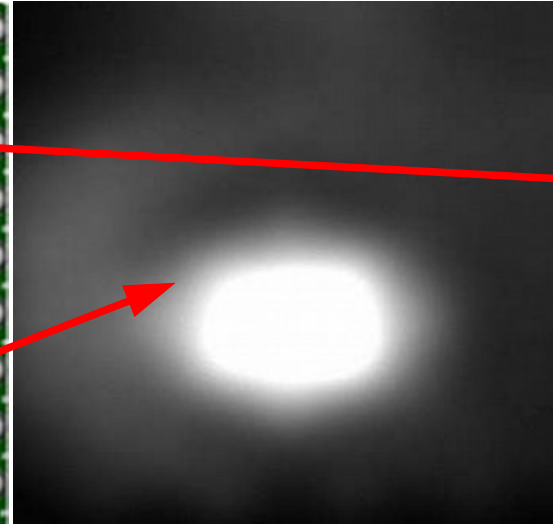
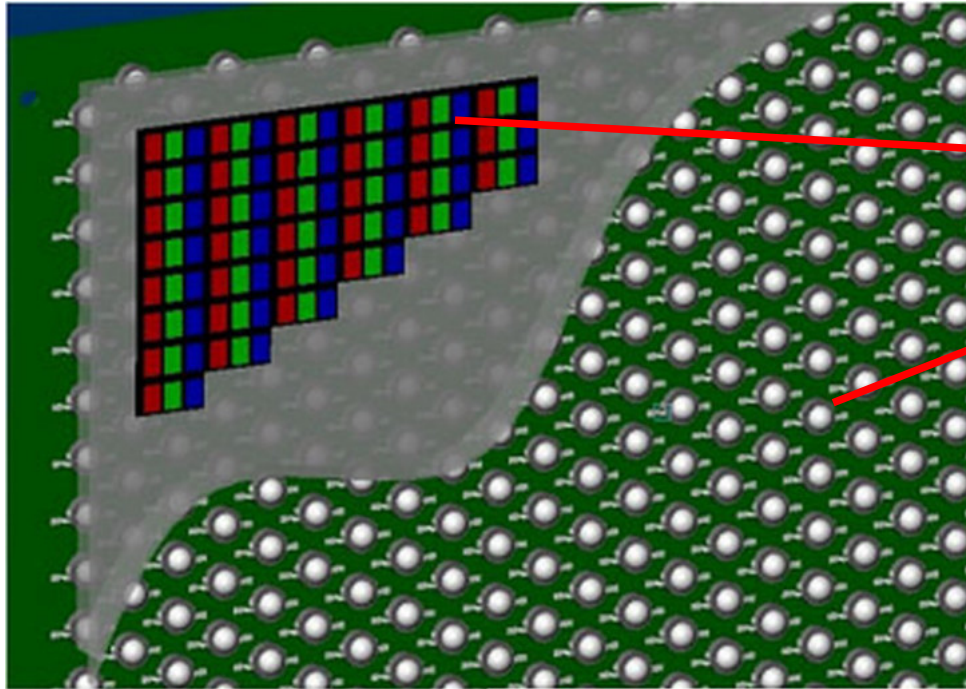
Projecteur vidéo modulée par un LCD



Écran HDR : prototype 1

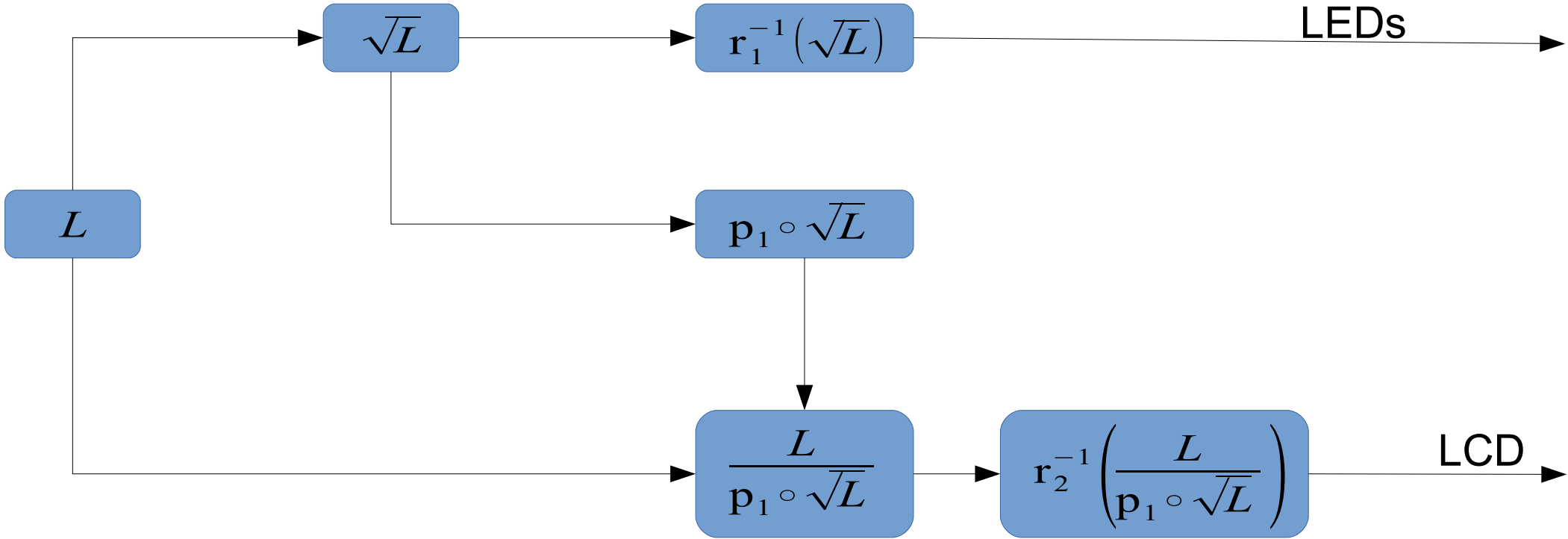


Écran HDR: prototype 2 (Dolby Digital - 2003)



©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

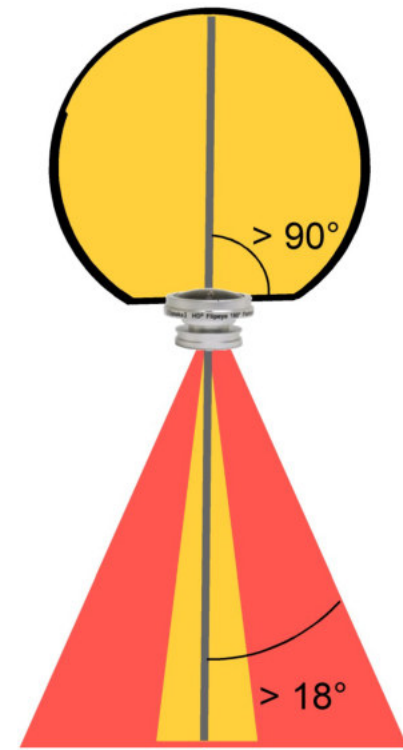


Display Week 2017

Matériel : système de projection

Sphère en verre dépoli

Lentille "fisheye"

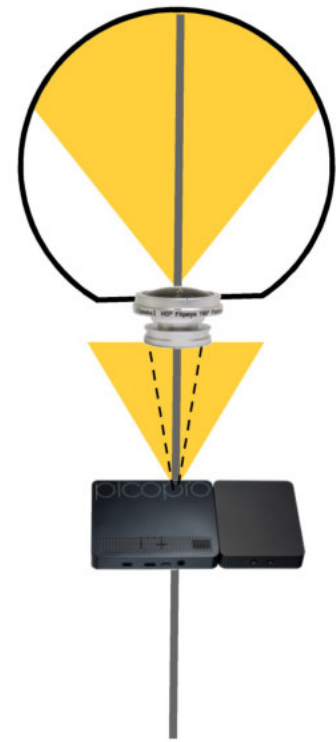


Matériel : vidéo-projection

Sphère en verre dépoli

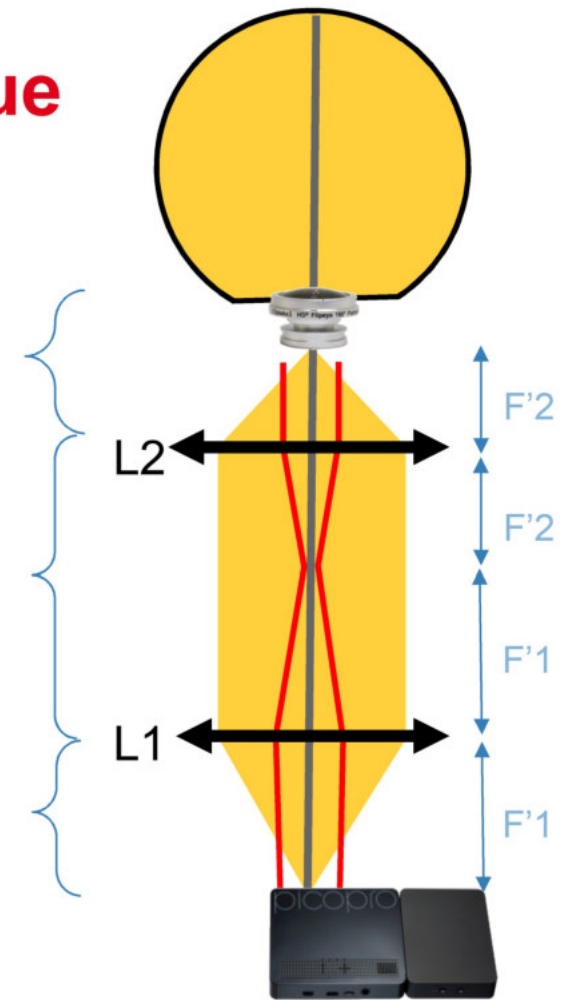
Lentille "fisheye"

Vidéo-projecteur laser "focus-free"



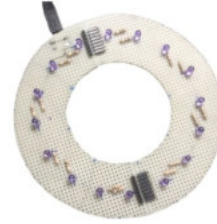
Matériel : un peu de conception optique

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



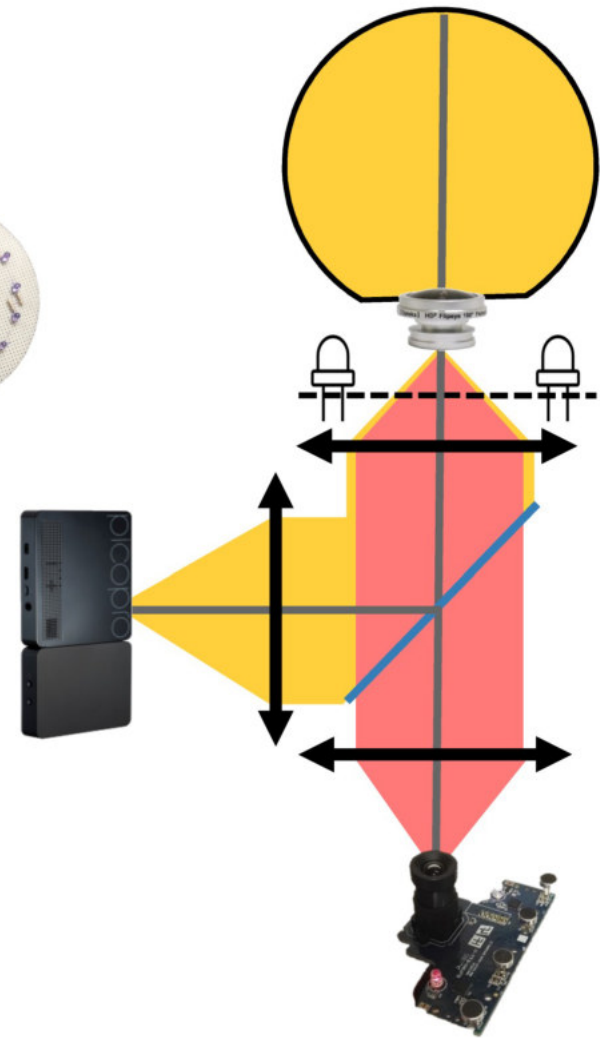
Matériel : suivi optique des doigts

Anneau de LED infrarouge

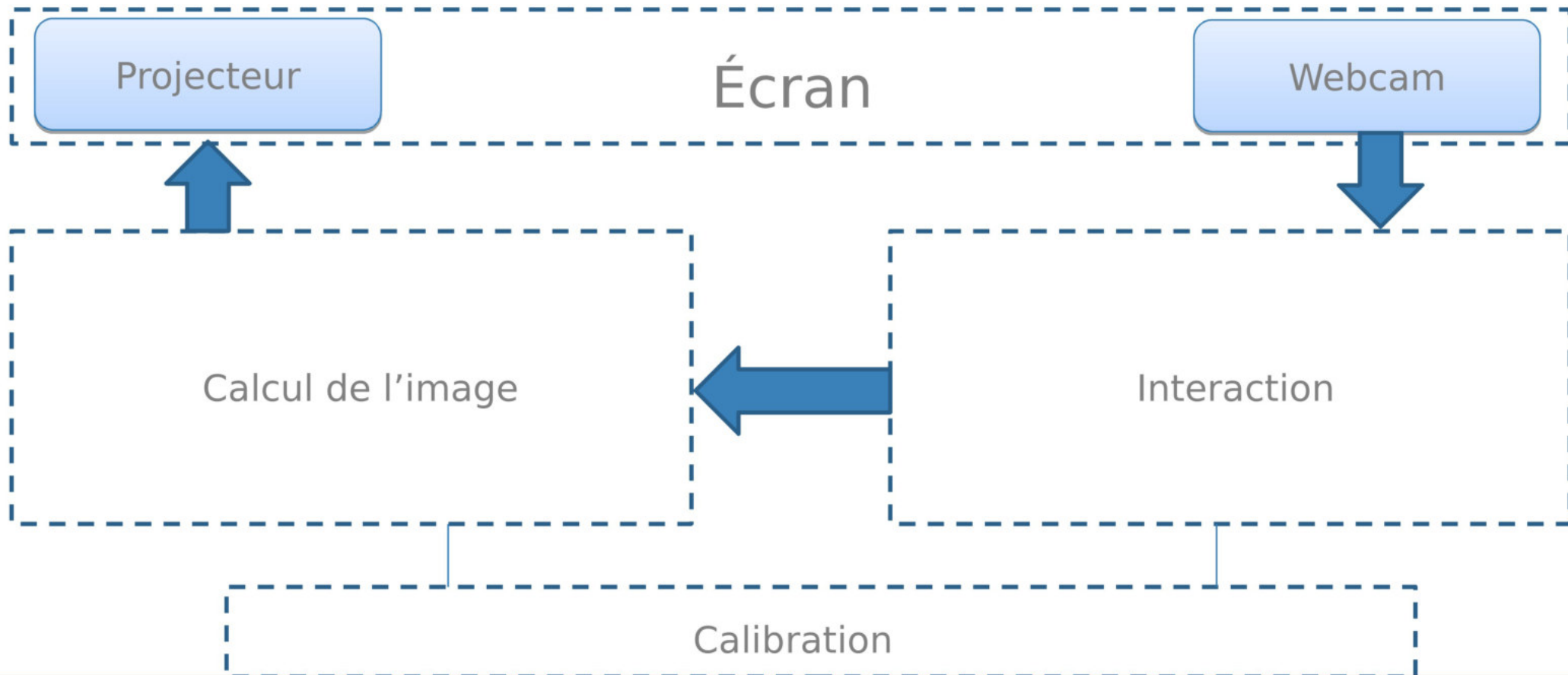


Miroir semi-transparent

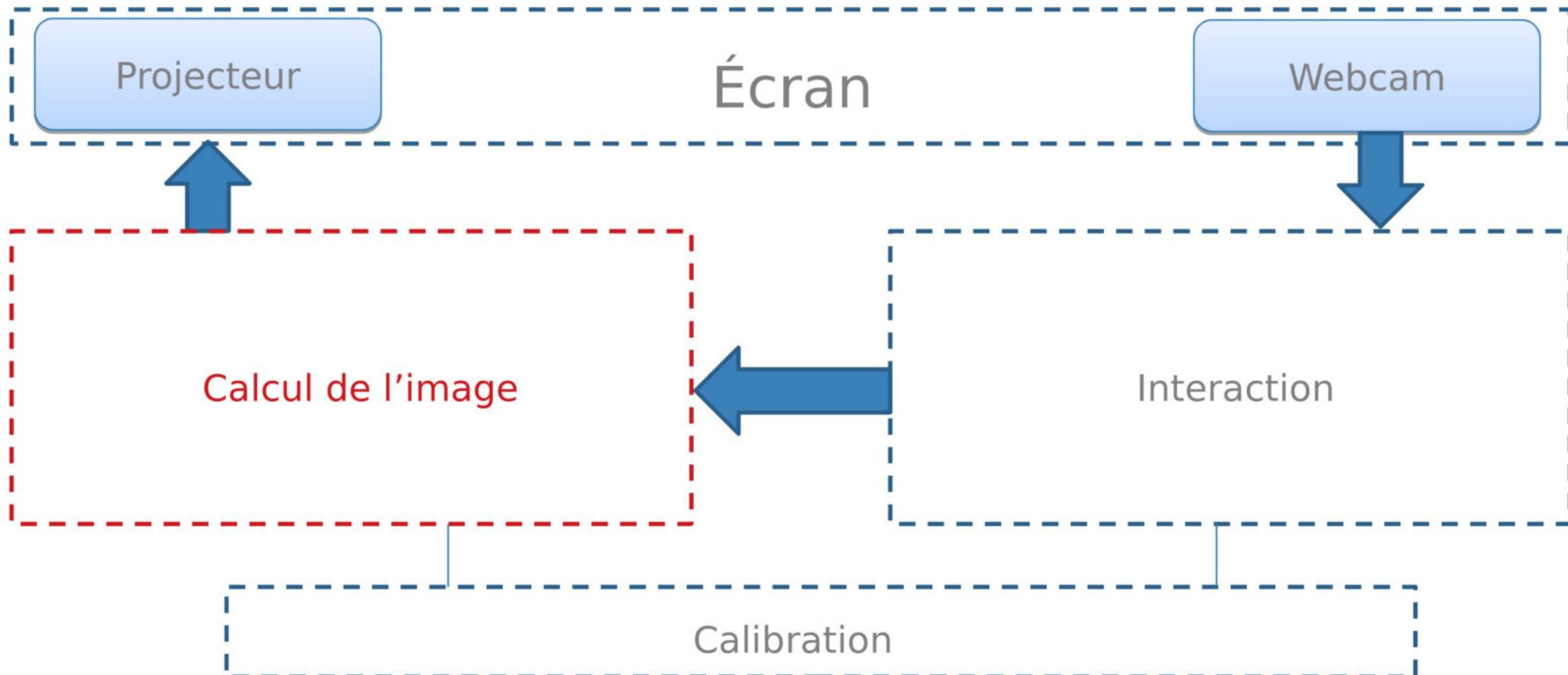
Caméra infrarouge
○ PSEye modifiée



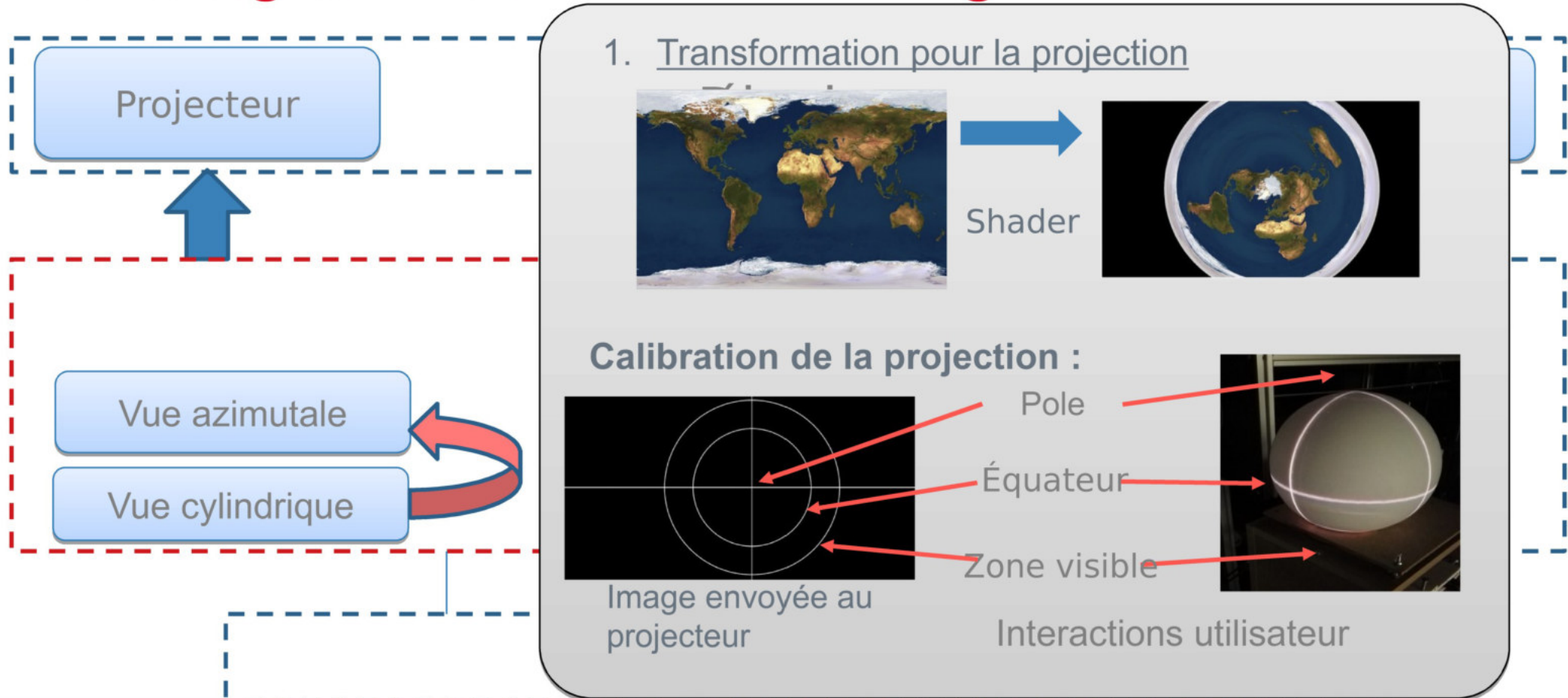
Partie logiciel



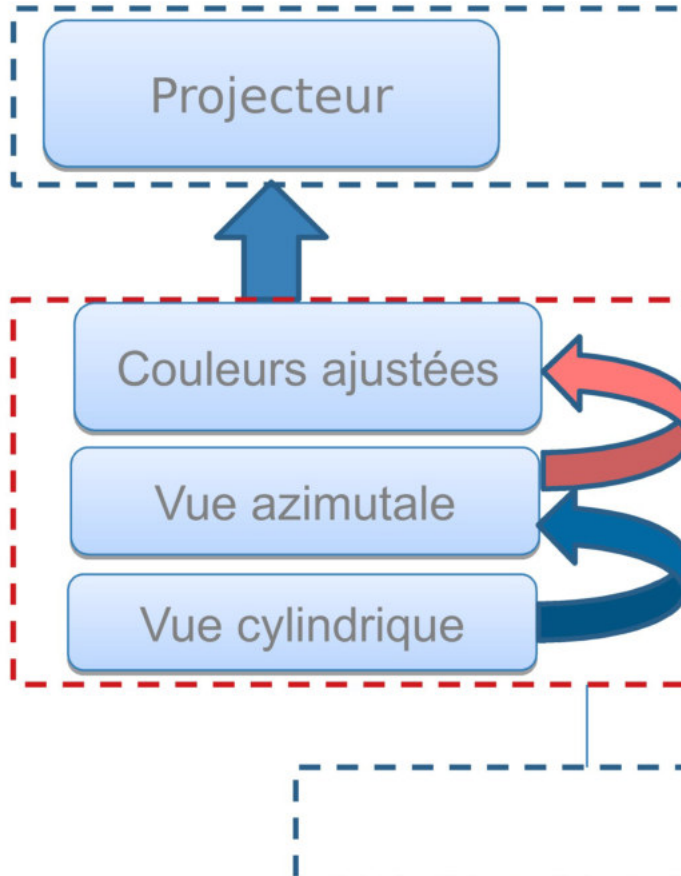
Partie logiciel – correction des images



Partie logiciel – correction des images

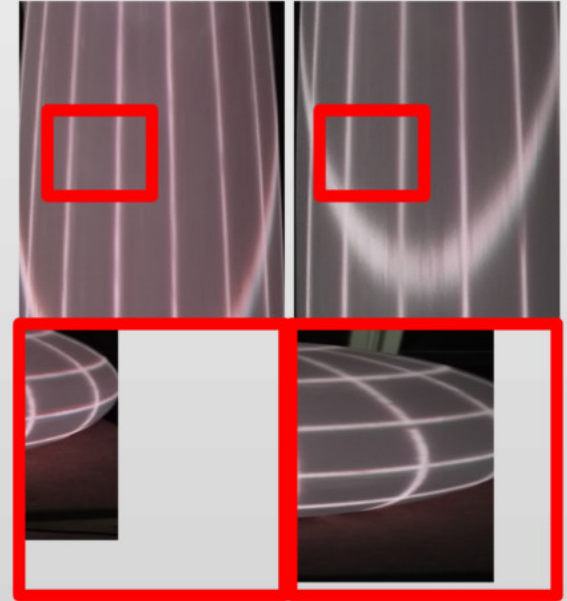


Partie logiciel – co



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

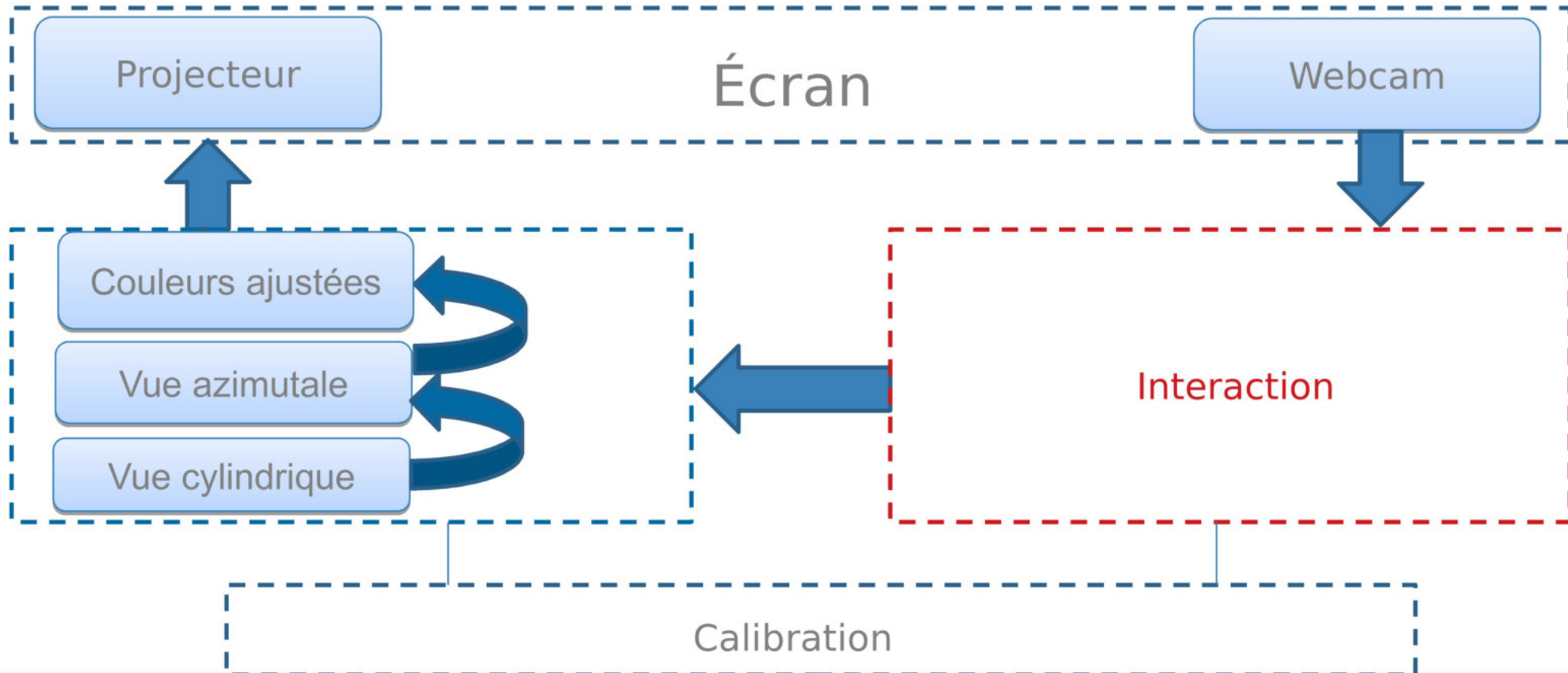
- Aberrations non-uniformes
- Spectre discret
- Décalage entre les canaux



Calibration

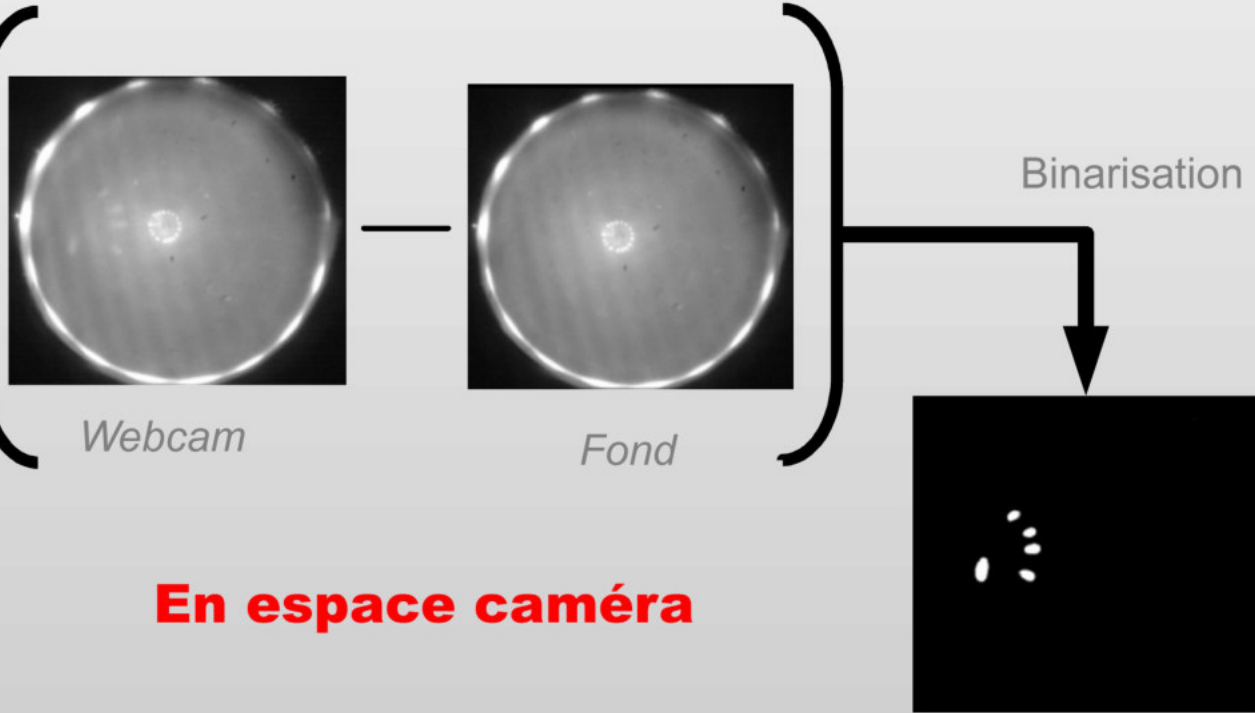
- Correction manuelle sur une série de points
- Interpolation avec reconstruction bi-laplacienne
- Carte de correction de couleurs
 - Pour chaque pixel, stoker ΔR et ΔB

Partie logiciel – interactions utilisateur

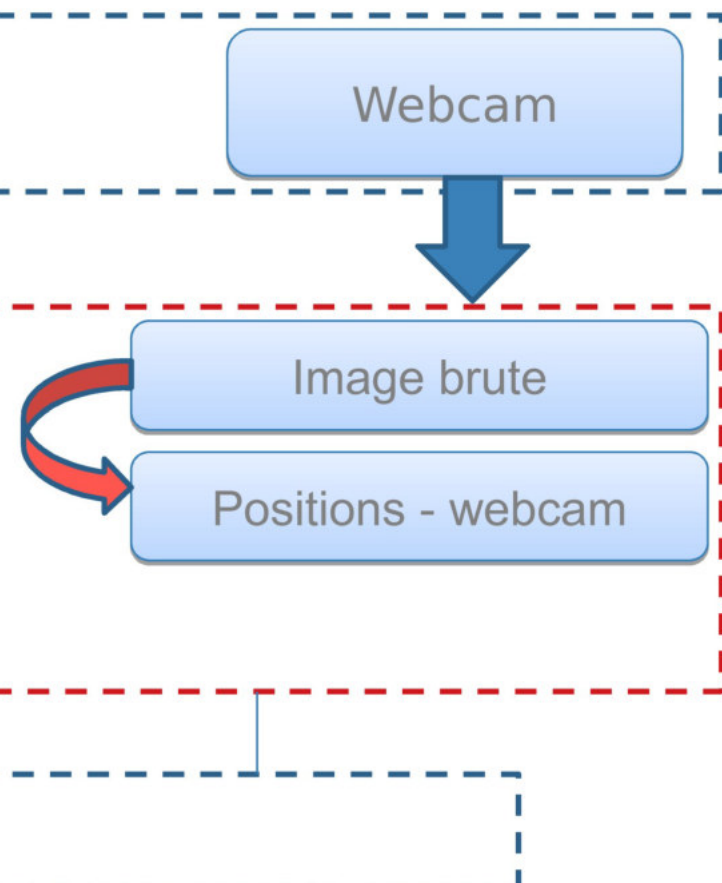


Partie logiciel – interactions utilisateur

1. Suivi des doigts : vision par ordinateur

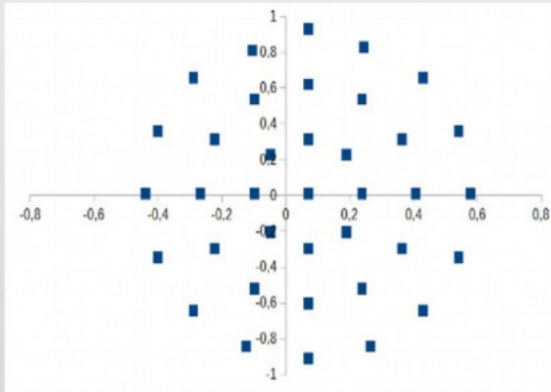


En espace caméra

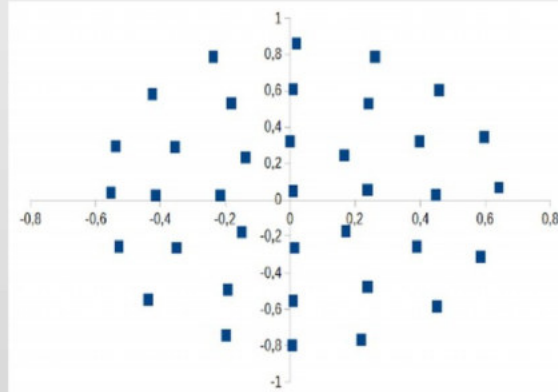


Partie logiciel – interactions utilisateur

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



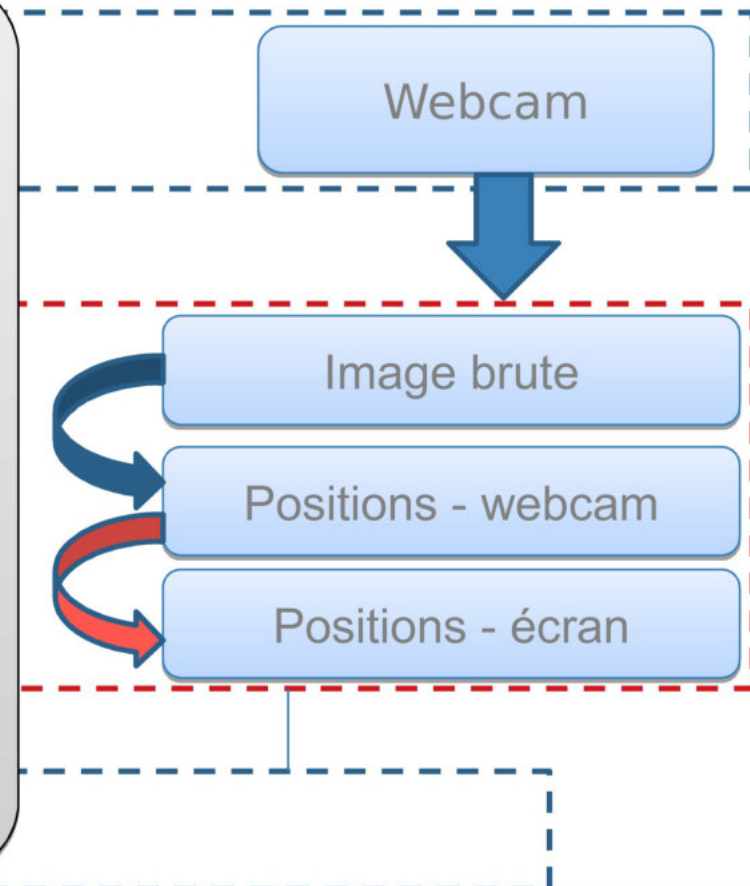
Points projetés



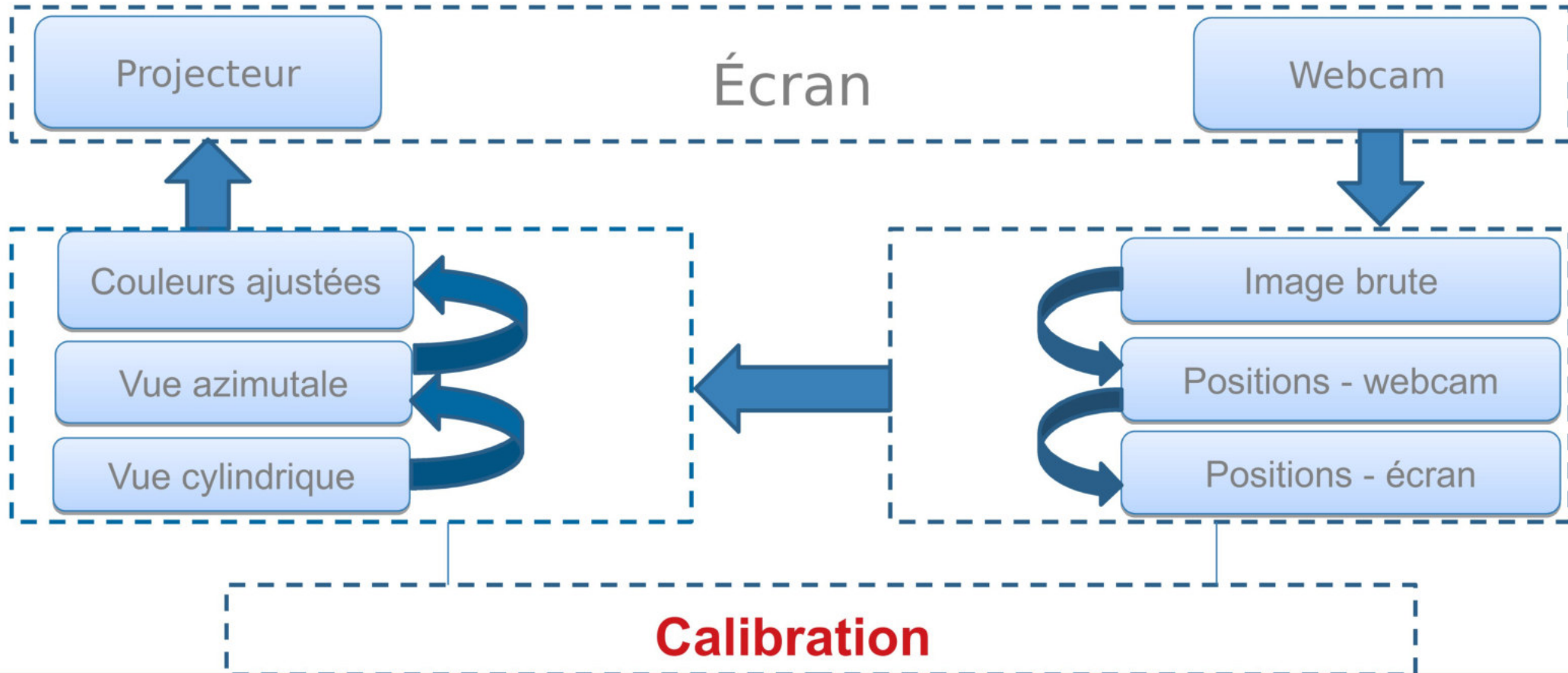
Point détectés

Calibration

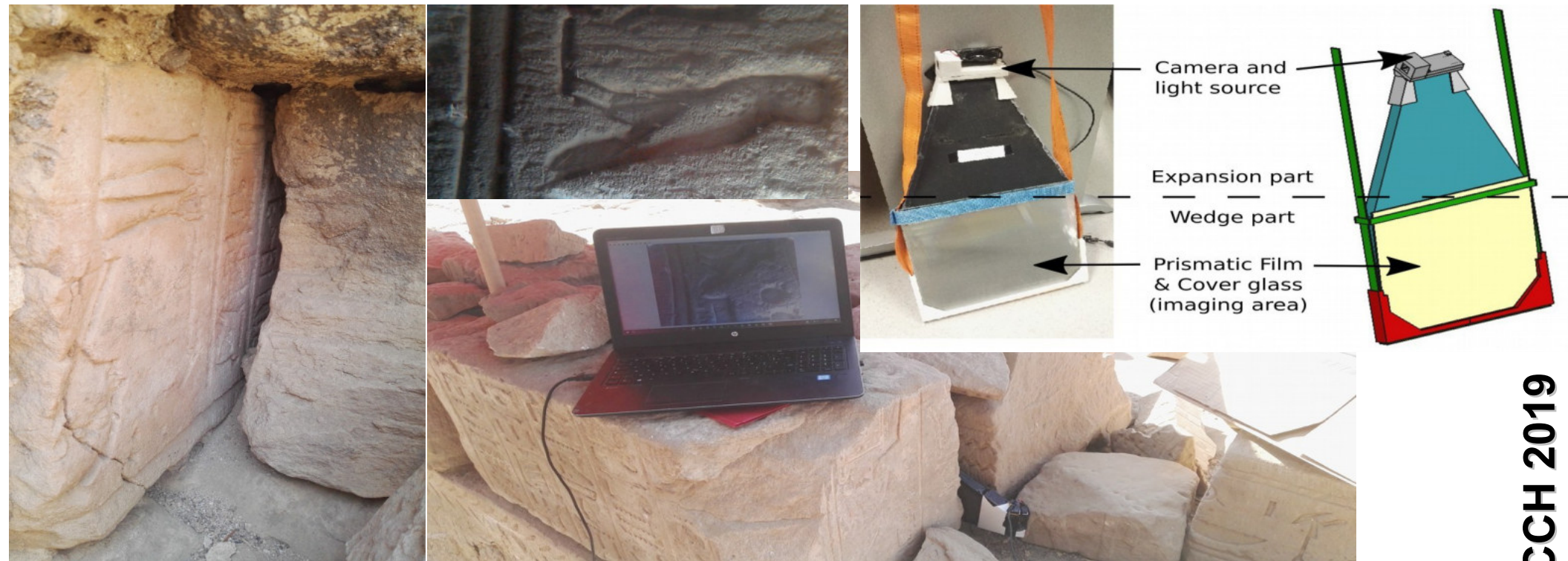
- L'utilisateur touche une série de points projetés
- Reconstruction bilaplacienne



Partie logiciel



« Wedge Camera » – Caméra pour espace confinée



JOCCH 2019

Avec l'IFAO – temple de Medamoud – Egypte

Concept

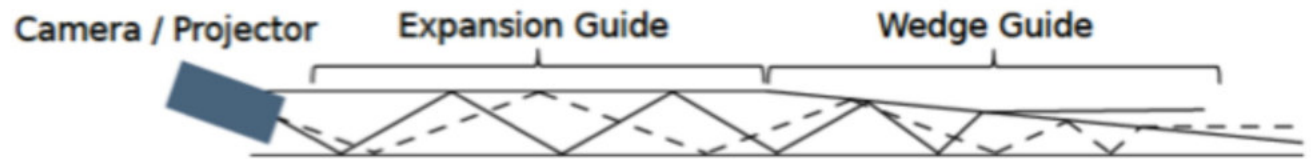
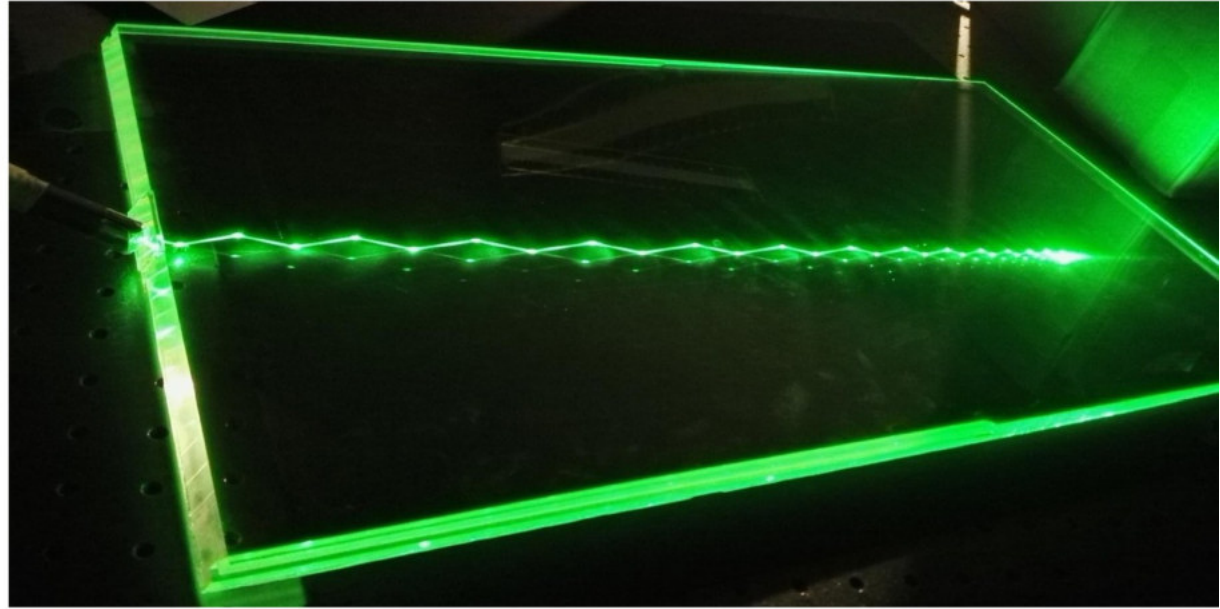
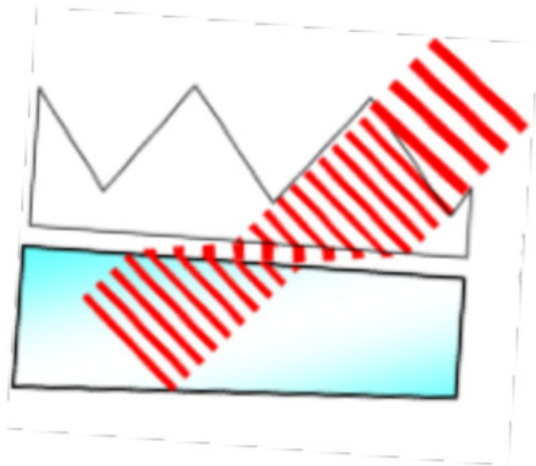
Challenge:

Acquisition en espace confiné

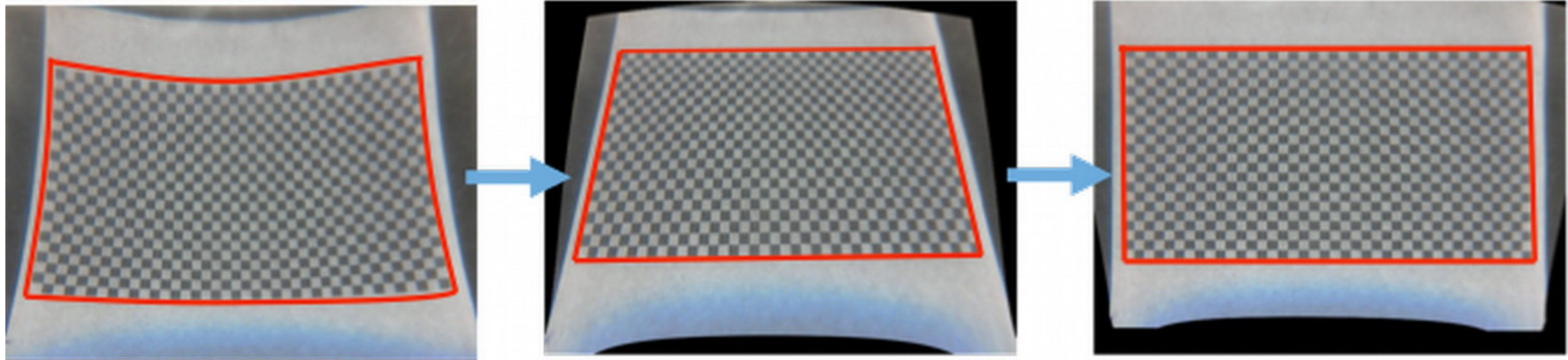
Idée :

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

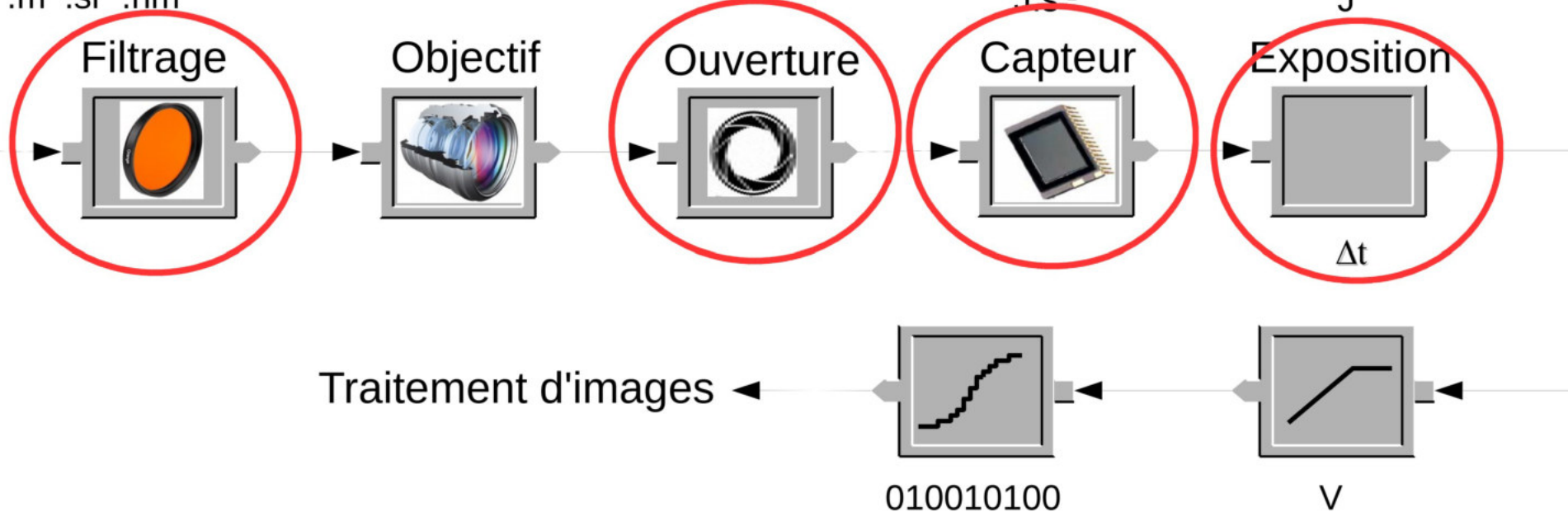
010010100

V

Convertisseurs

Perte d'information par intégration

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



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

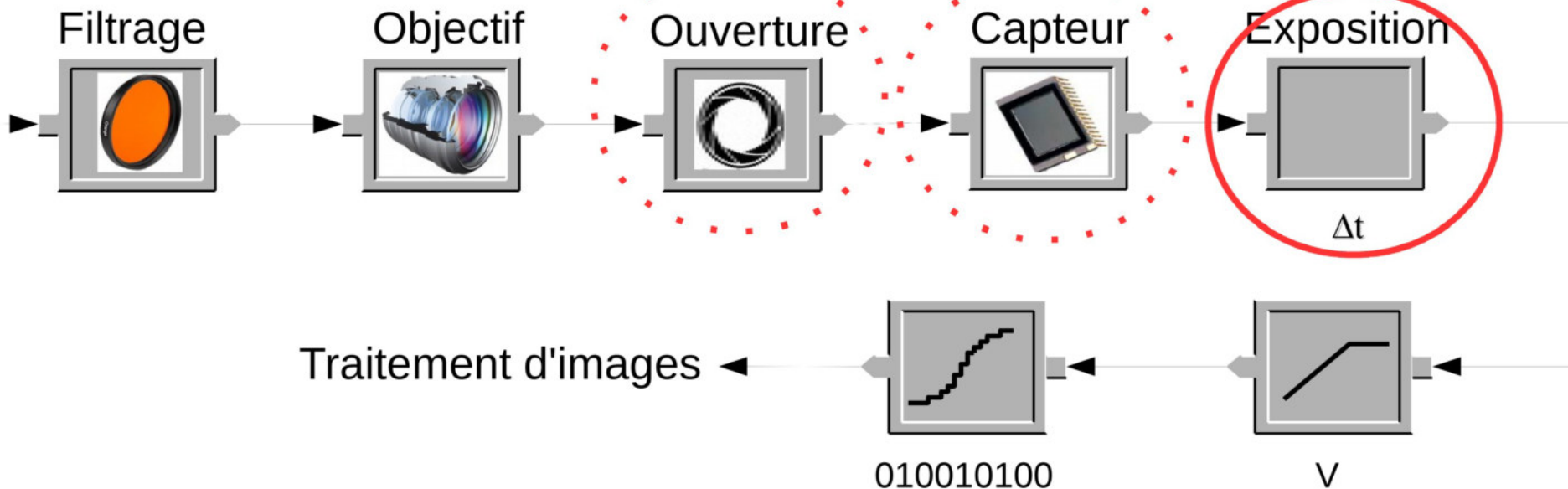
Convertisseurs

Imagerie HDR

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

Flux
 $J.s^{-1}$

Energie
 J



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

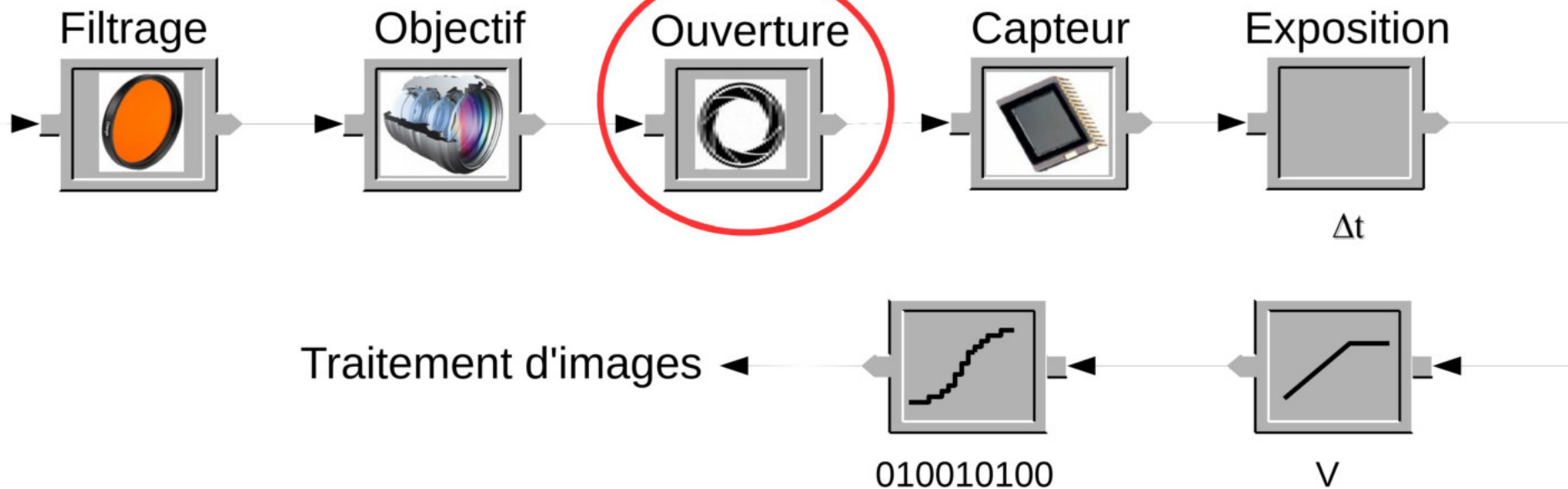
Convertisseurs

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

Objectif

- Control de la PSF
- Meilleure déconvolution

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

[Levin et al 2007]



Point hors focus

[Levin et al 2007]

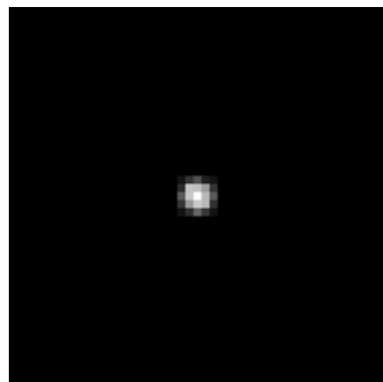
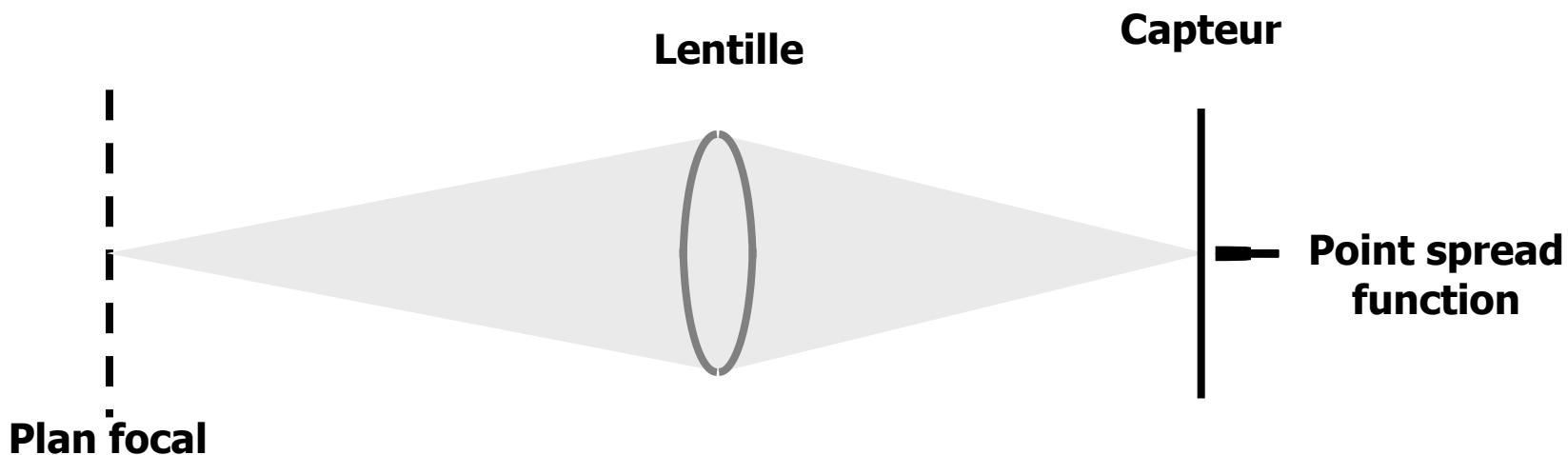


Image d'une source
ponctuelle



Point hors focus

[Levin et al 2007]

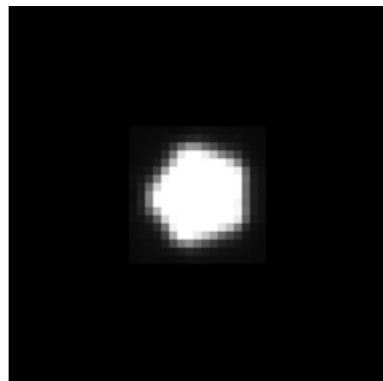
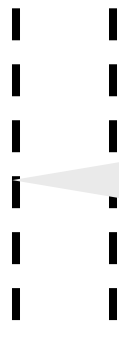


Image d'une source
ponctuelle

Objet



Plan focal

Lentille



Capteur



Point spread
function

Utilisation d'une ouverture codée

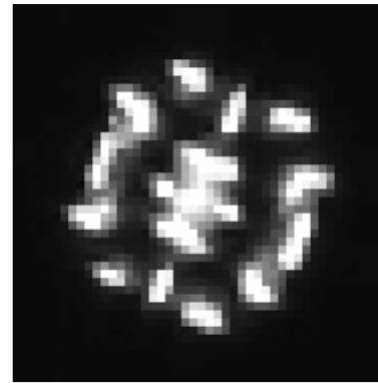
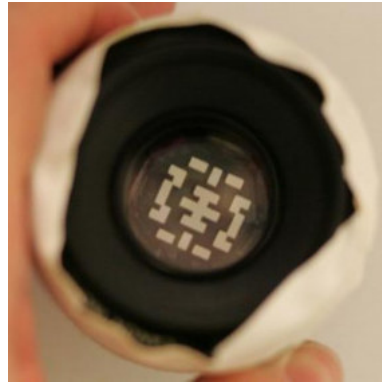
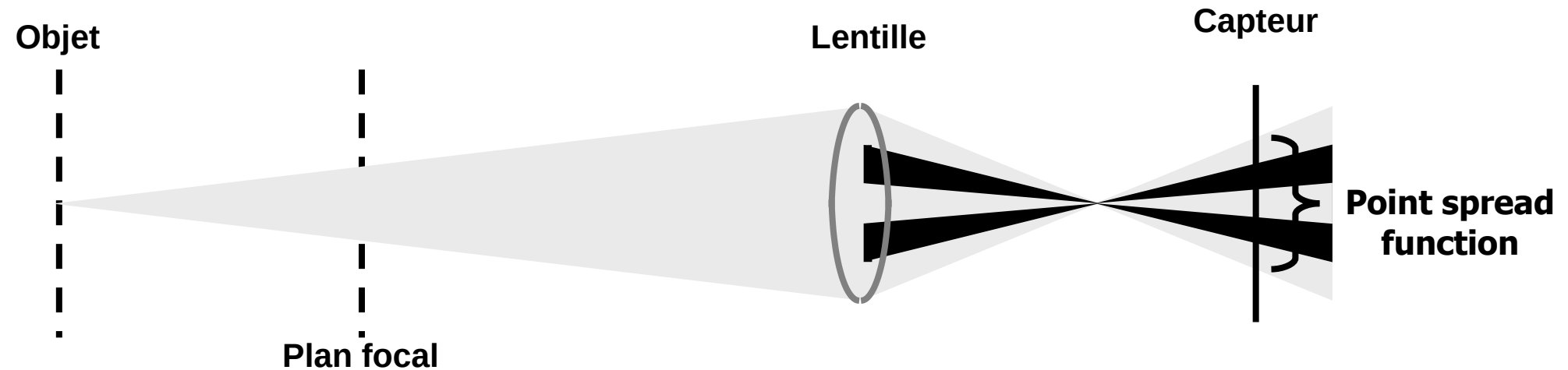


Image d'une source ponctuelle



Entrée



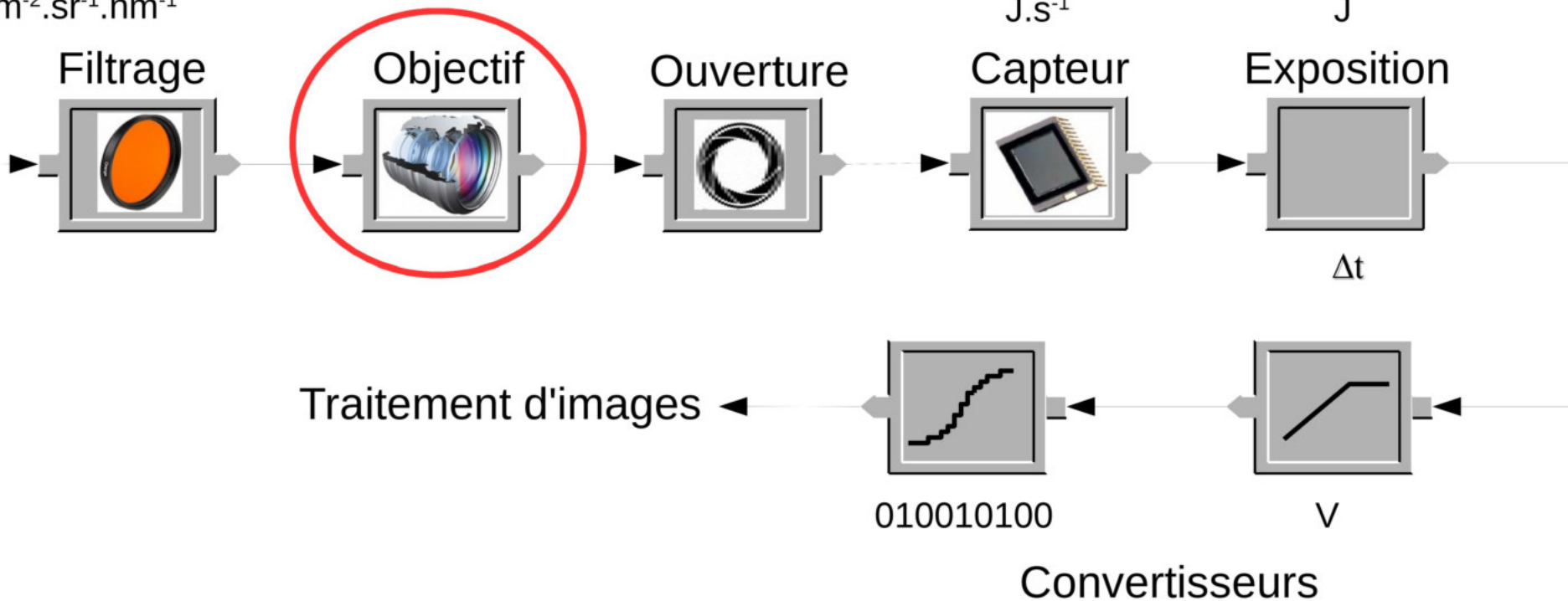


Plénoptique et champ lumineux

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

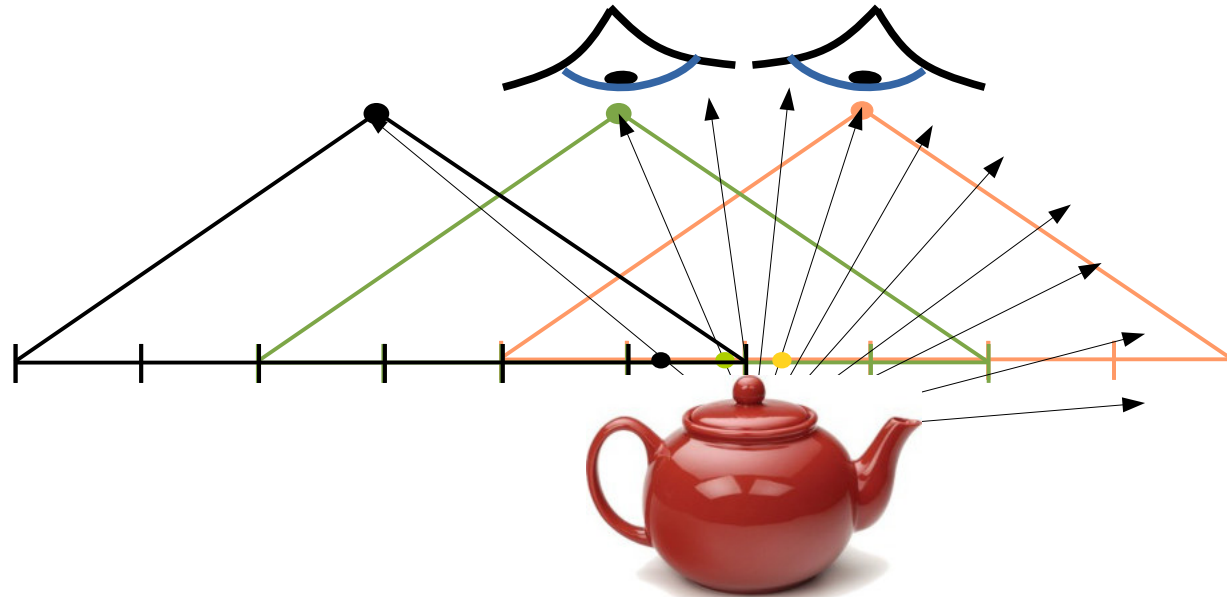
Flux
 $J.s^{-1}$

Energie
 J



Champ lumineux / Light-Field - définitions

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



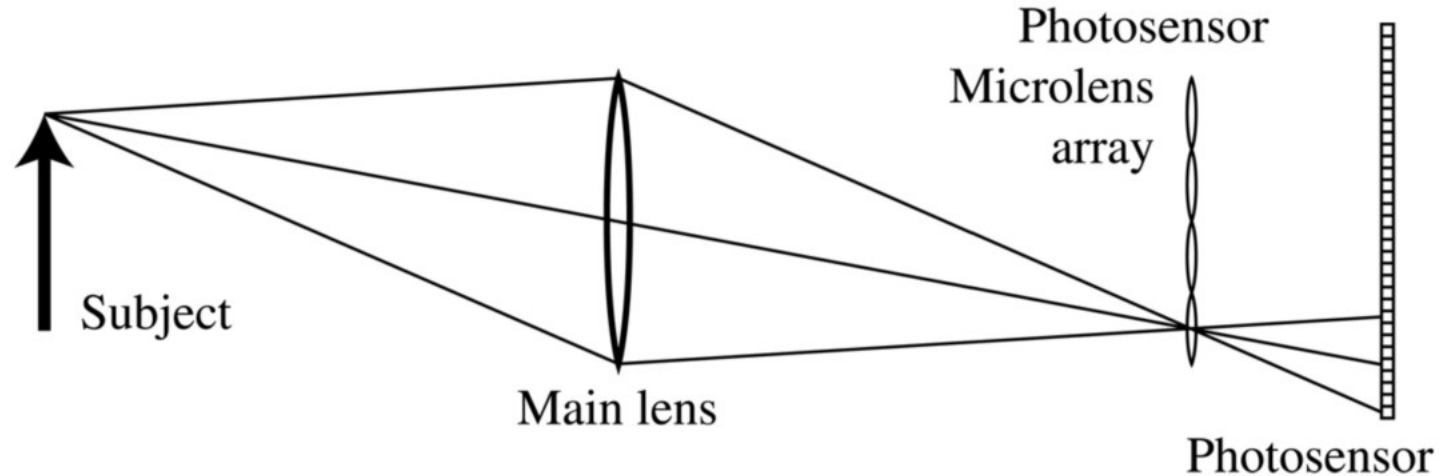
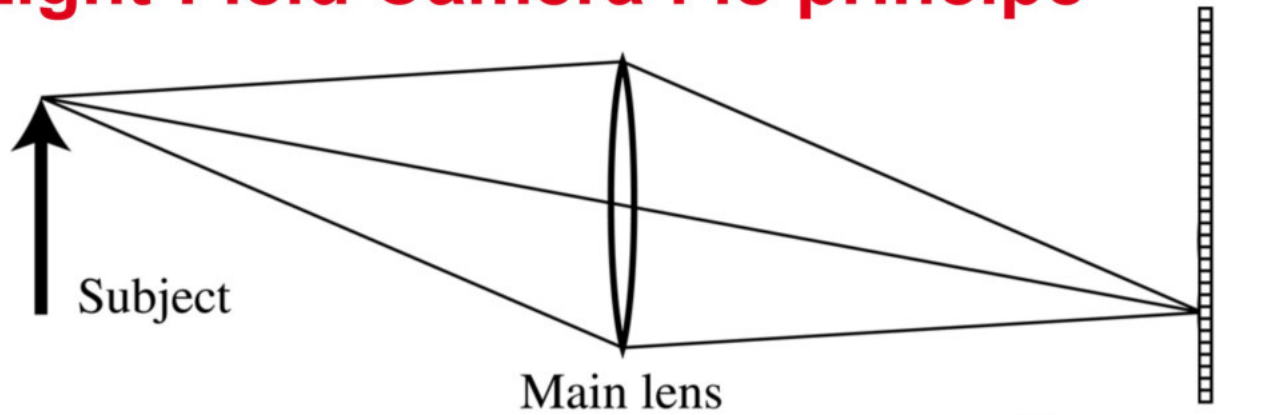
Notion de champ lumineux

- **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



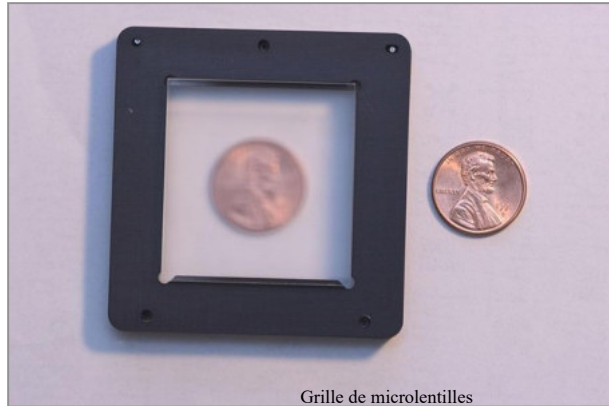
Grille de microlentilles

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

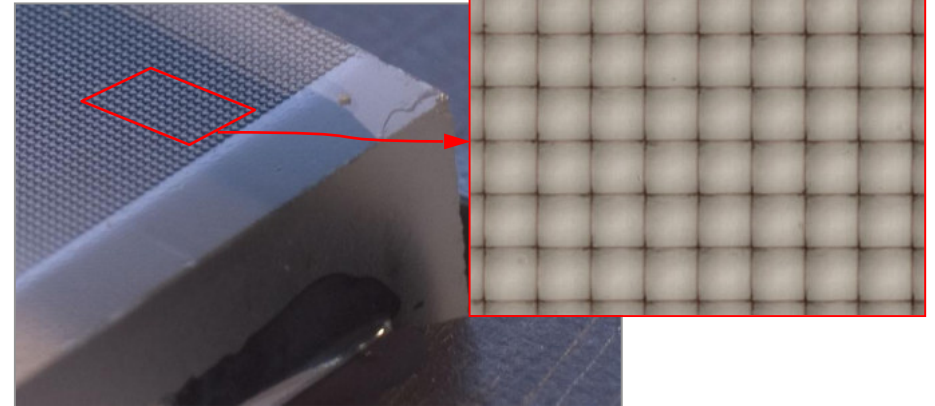
Prototype



Kodak 16-megapixel sensor

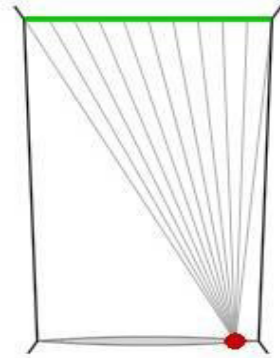
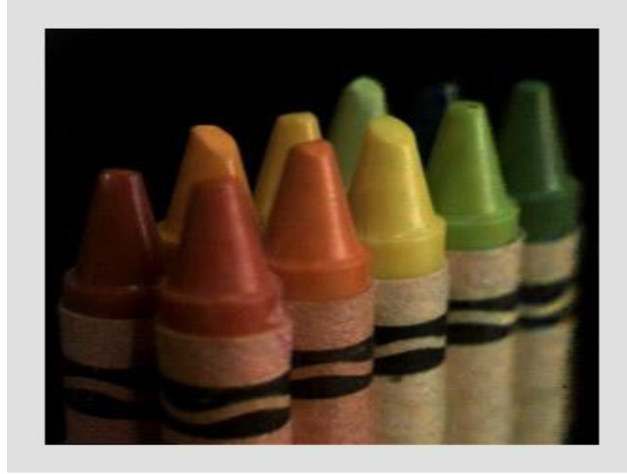


Grille de microlentilles

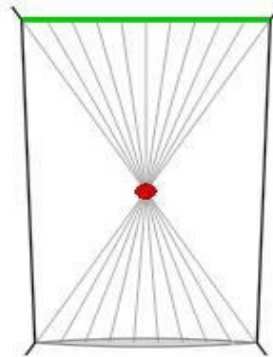




Changing view-point

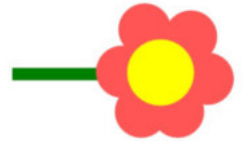


Changing view-point



Comment générer plusieurs points de vue

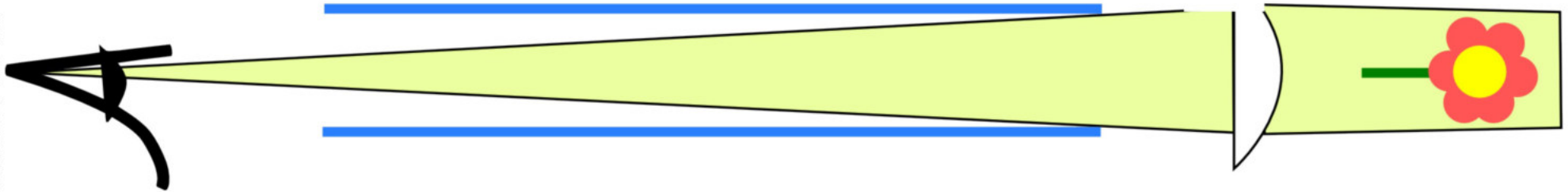
Manakov et al. – SIGGRAPH 2013





Comment générer plusieurs points de vue

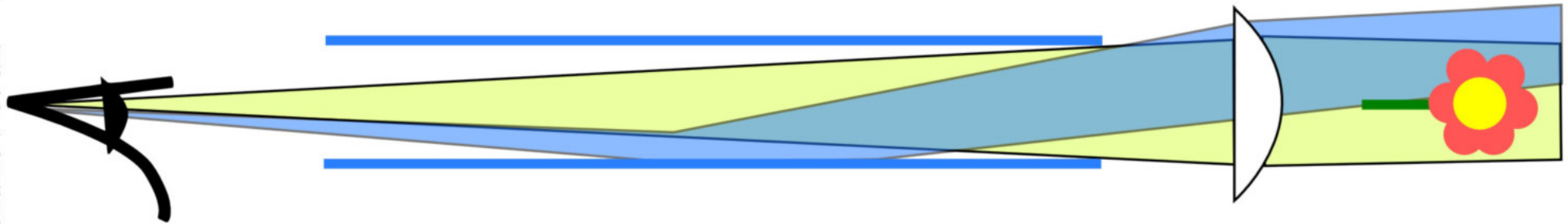
- On peut voir la scène directement ...





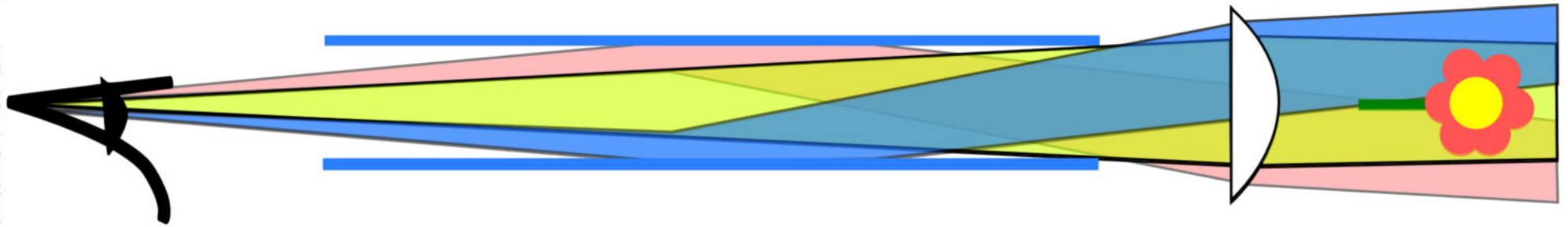
Comment générer plusieurs points de vue

- ... 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

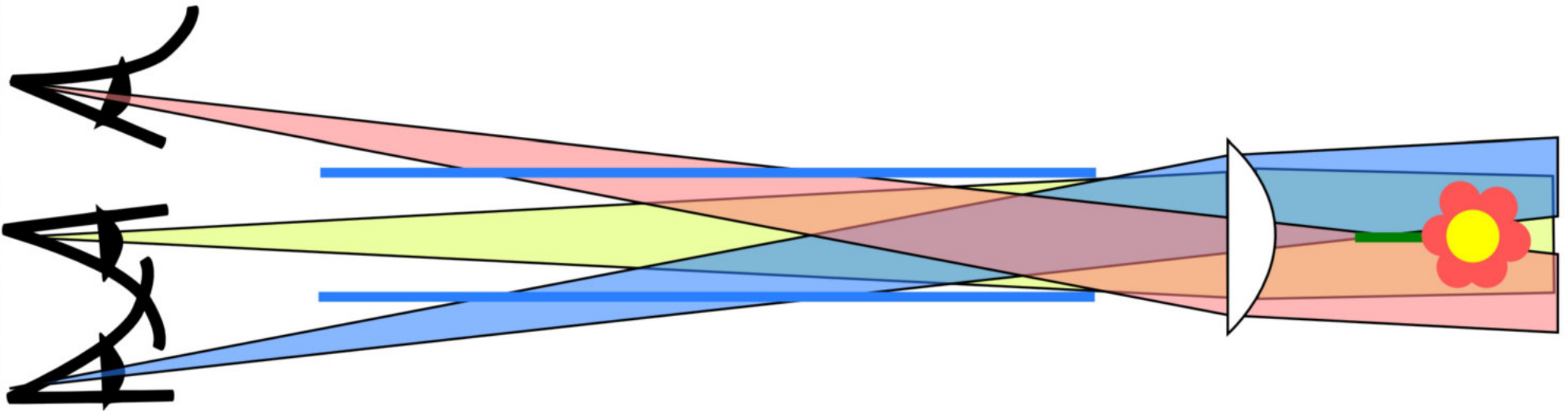




Image obtenue



Manakov et al. – SIGGRAPH 2013

Application 3: Light field

Manakov et al. – SIGGRAPH 2013



Prototype actuel

Manakov et al. – SIGGRAPH 2013

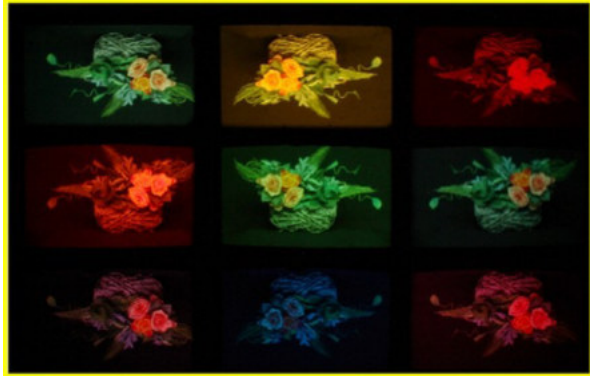
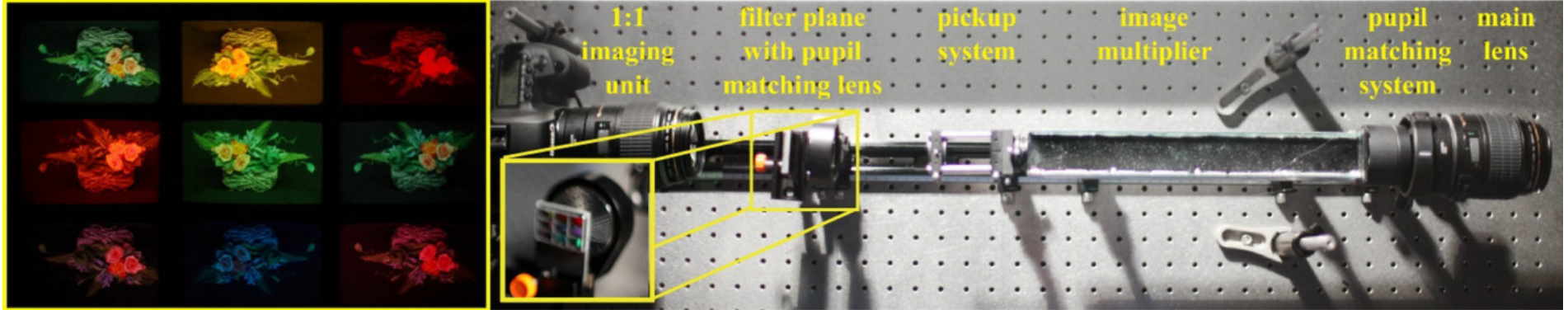
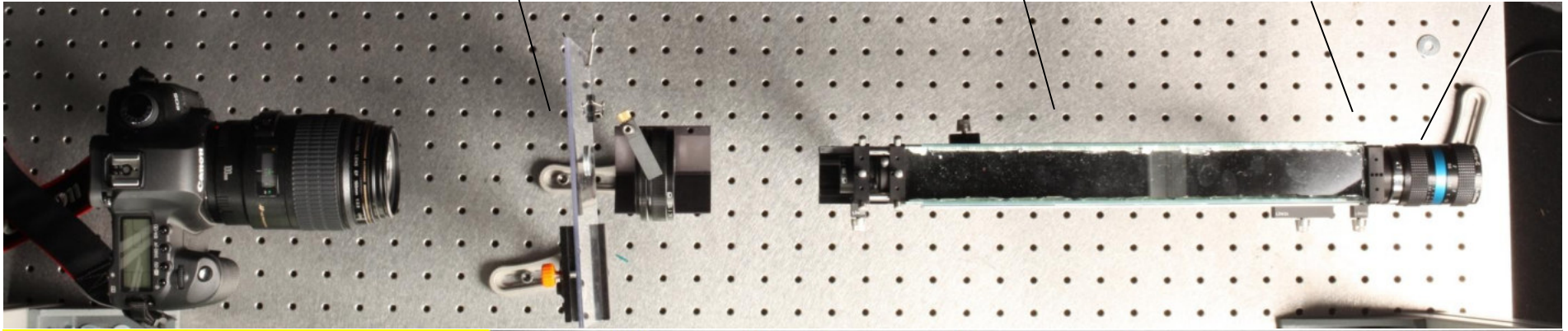
Camera

Filtres

Kaleidoscope

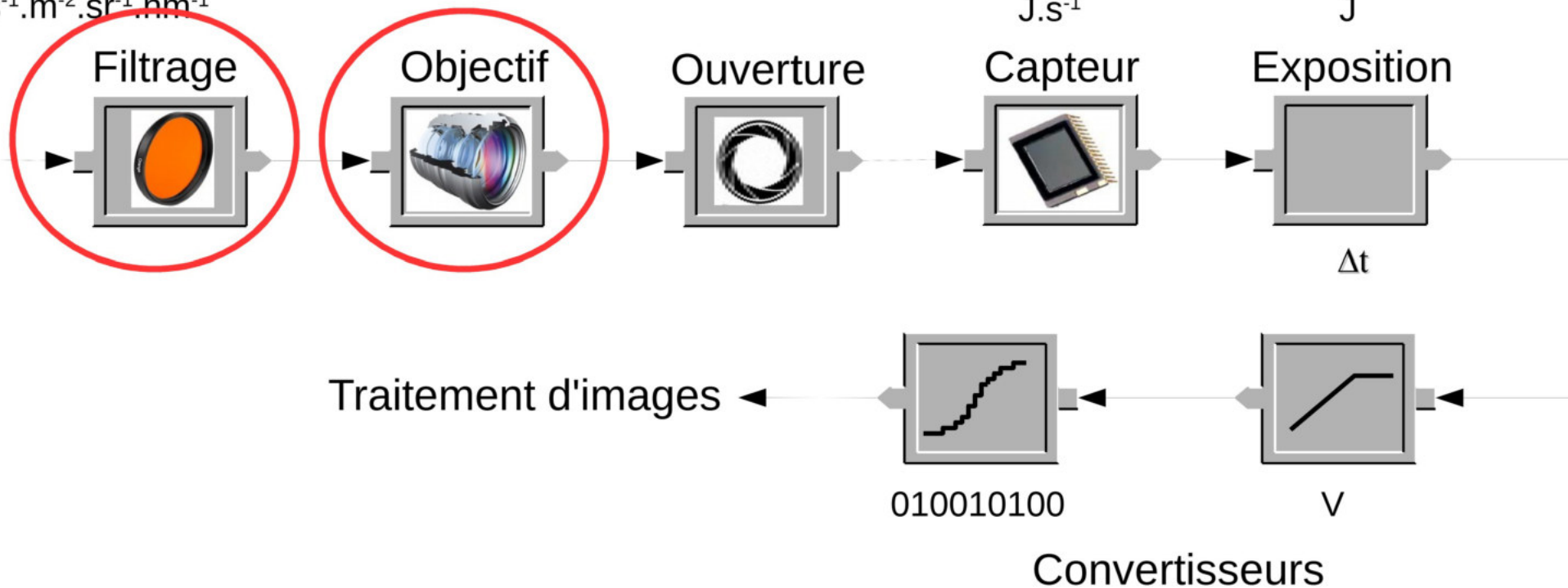
Diffuseur

Objectif



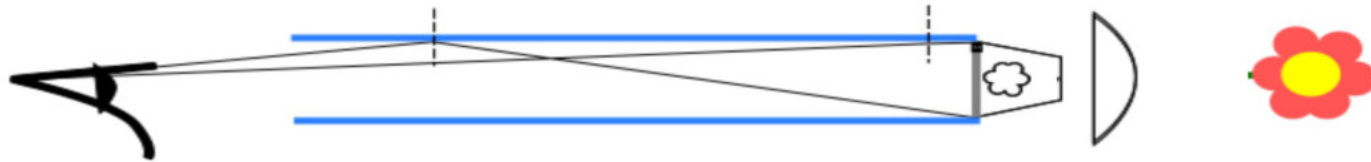
Plénoptique et champ lumineux

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



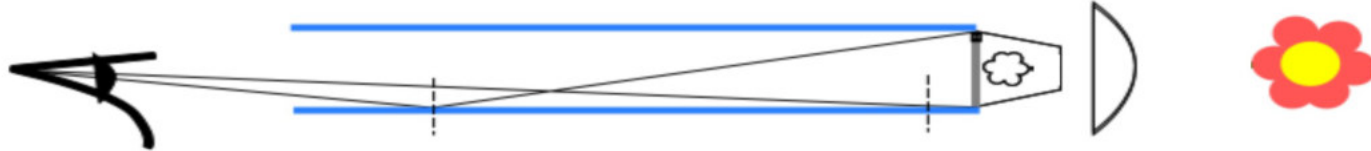
Comment faire plusieurs copies

- ... et aussi après une réflexion



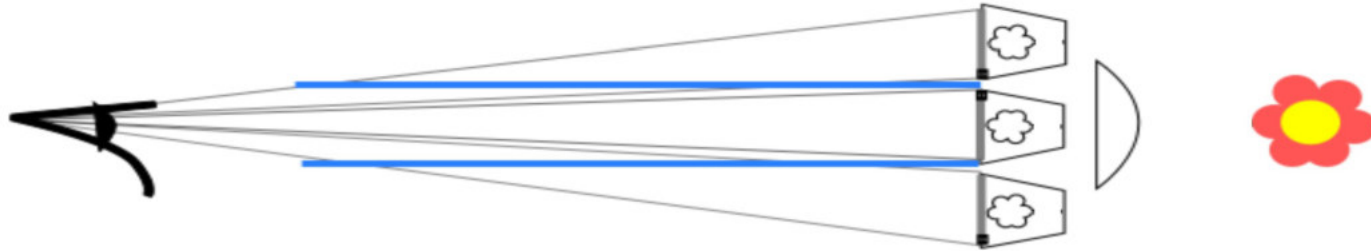
Comment faire plusieurs copies

- ... et une autre

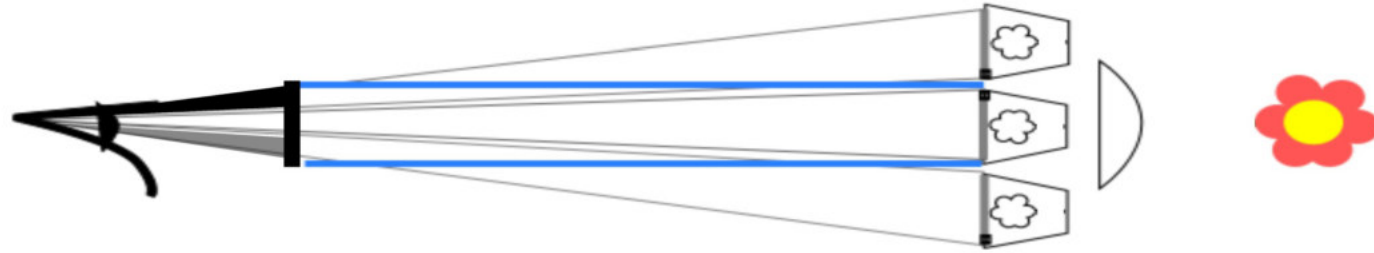


Comment faire plusieurs copies

- Cela correspond aux images de diffuseurs virtuels



Application 1: Imagerie HDR



Filtres
neutres



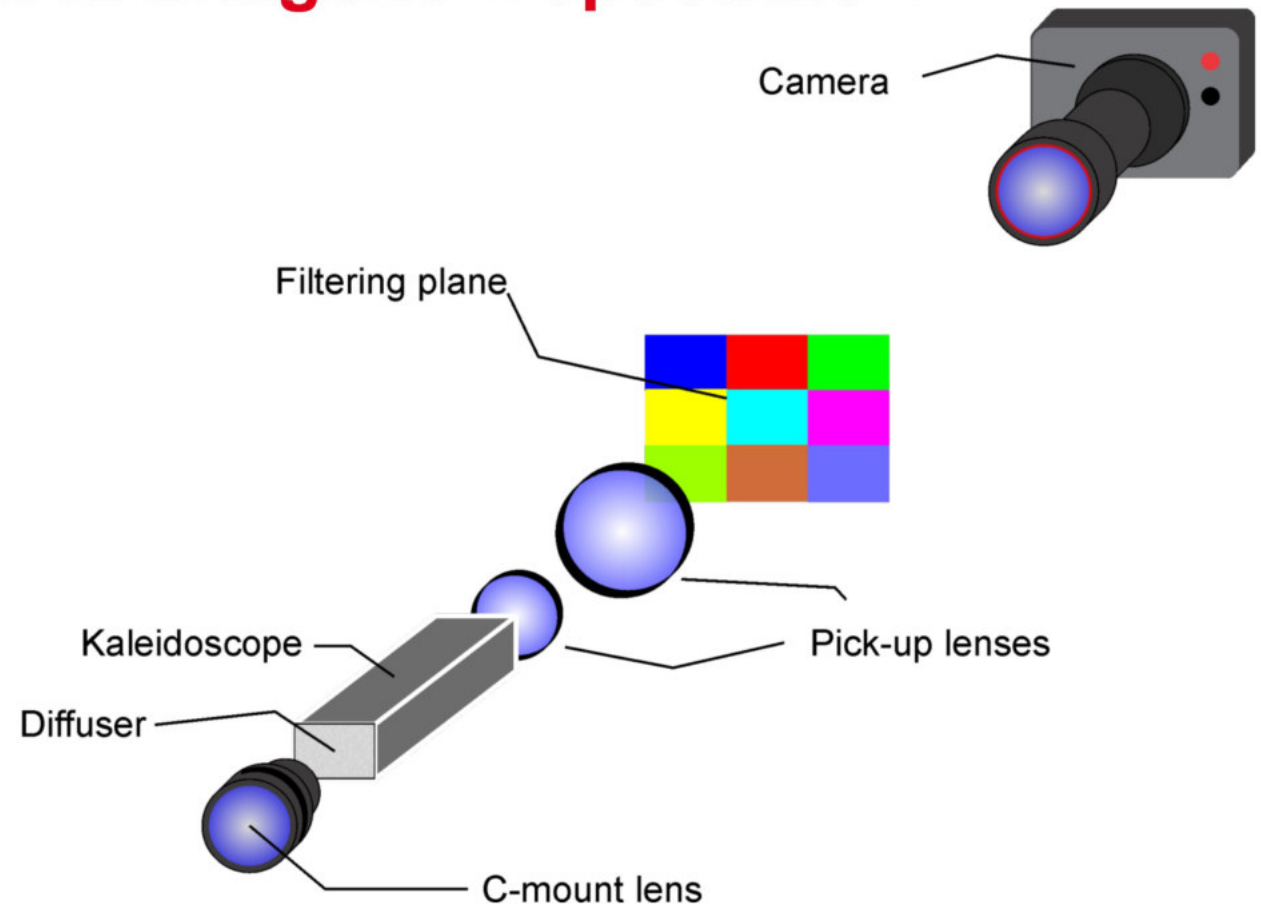
Application 1: Imagerie HDR

Manakov et al. – SIGGRAPH 2013



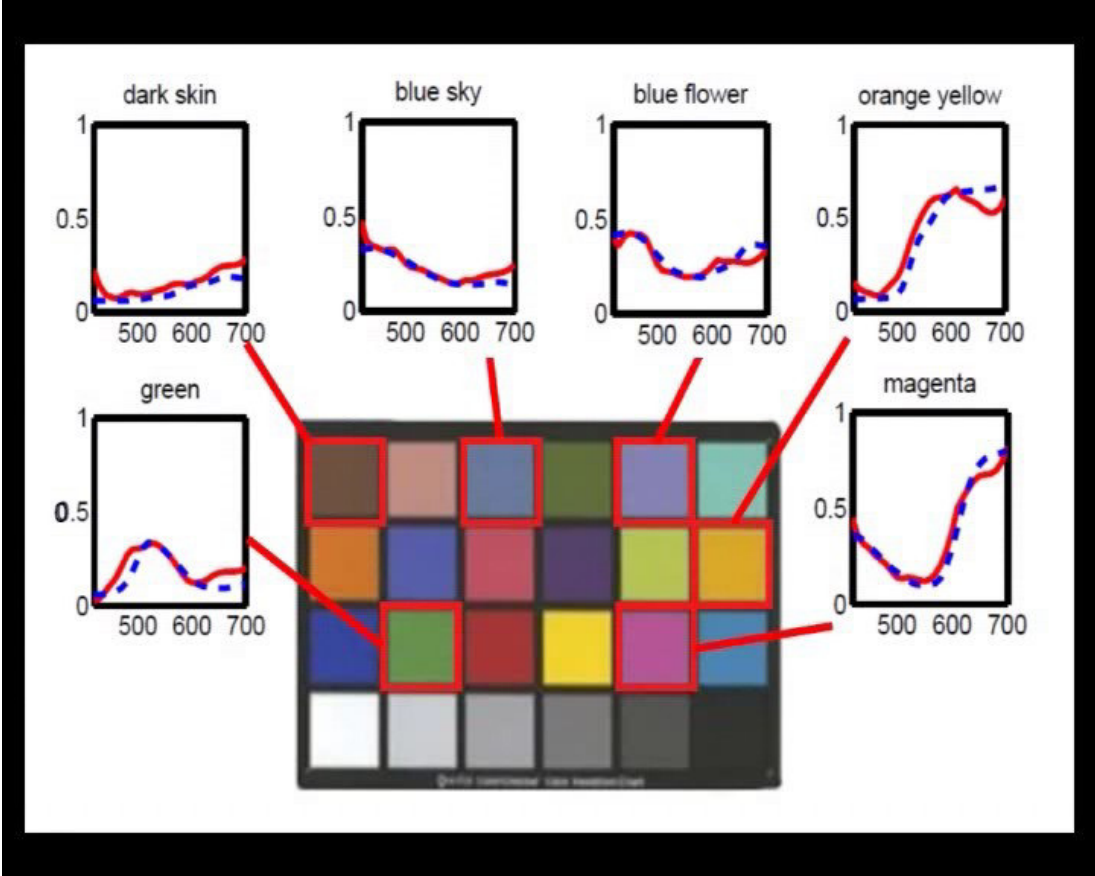
Application 2: Imagerie « spectrale »

Manakov et al. – SIGGRAPH 2013



Application 2: Imagerie « spectrale »

Manakov et al. – SIGGRAPH 2013



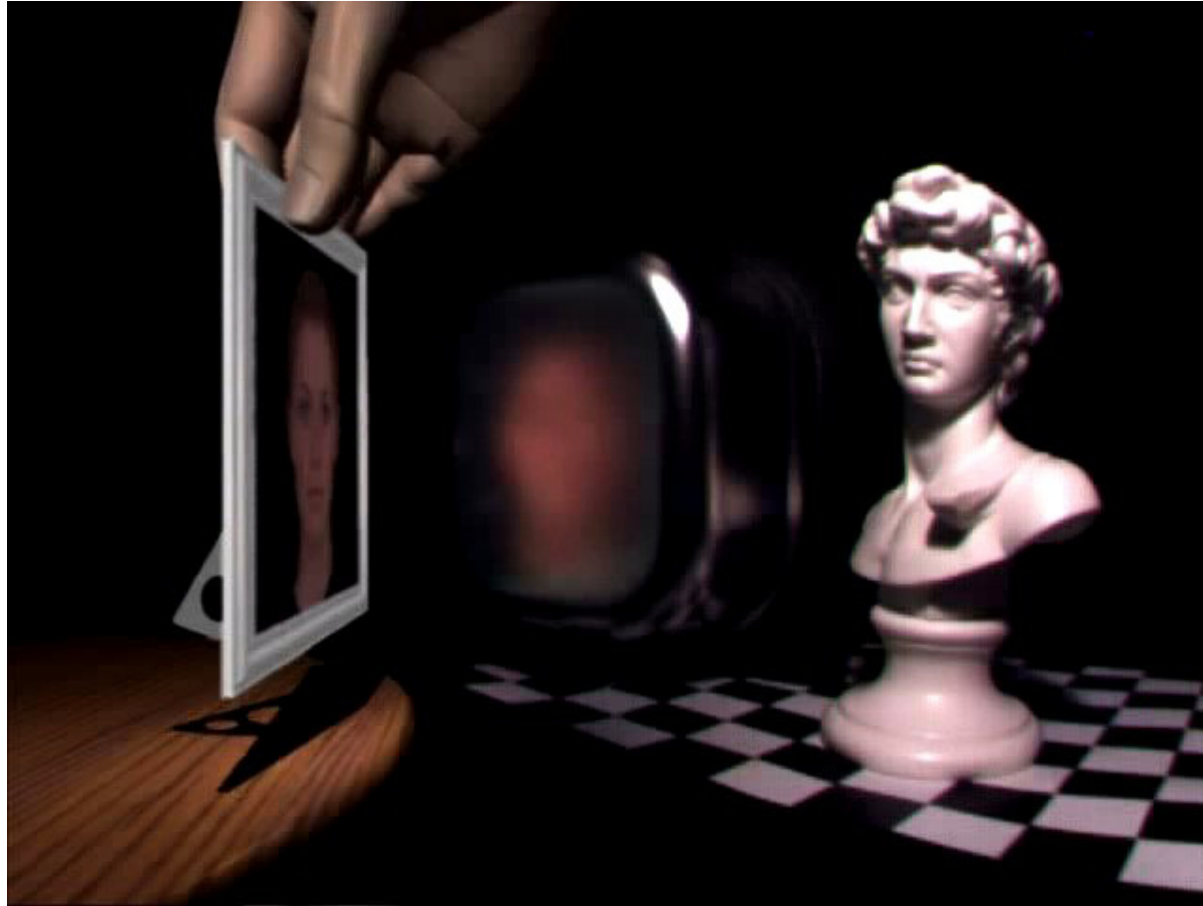
6

Conclusion

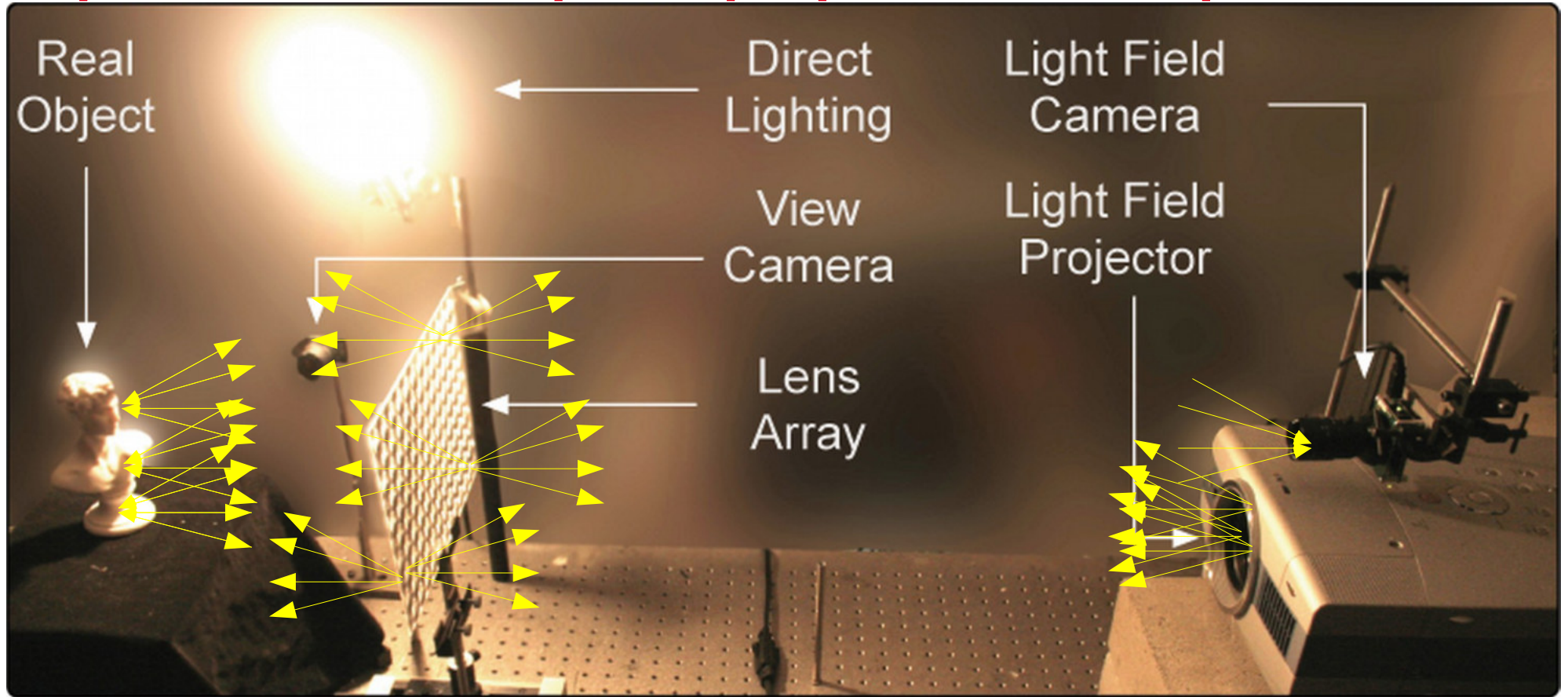
Résumé : les principaux concepts

- 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>