

Cours d'ouverture L-INP

Petit cours de photographie numérique

Frédéric SUR

École des Mines de Nancy
LORIA

www.loria.fr/~sur/enseignement/ouvertureLINP/

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Préliminaire

Photographie = « écriture de la lumière »

But du cours :

- Une introduction aux problèmes scientifiques de la photographie (numérique) ;
- En particulier, impact du *logiciel* sur *l'image* ;
- Problèmes scientifiques / techniques actuels et implications sur ce qu'est une image numérique.

Pour aller plus loin : traitement du signal (math. & proba.), électronique, optique, cours de photographie, histoire de l'art, etc.

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

1/126

2/126

Une brève histoire de la photographie

Ou : qu'est-ce qu'une image ?

→ 1997 : première photographie couleur en « une » du *New York Times*.

→ ~ 6 milliards de photos sur Flickr en 2011.

→ ~ une heure de vidéo déposée chaque seconde sur Youtube en 2012.

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

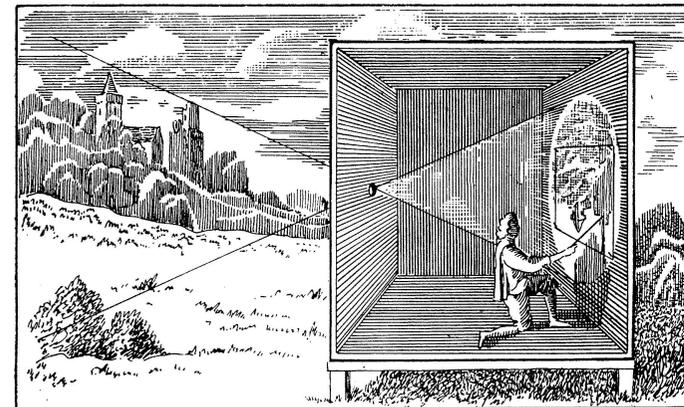
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Chambre noire (camera obscura, pinhole camera)



Sténopé

Connu d'Aristote (4^{ème} siècle av. J.-C.)

Renaissance : « découverte » de la perspective

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

3/126

4/126

Nicéphore Niépce



« Procédé héliographique » : 1820-1830
Surface sensible : bitume de Judée sur une plaque de verre

5/126

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Point de vue du Gras



Première photographie (1827)
Temps de pose : sans doute plusieurs jours !
Problème : arrêter la réaction chimique due à la lumière.

6/126

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

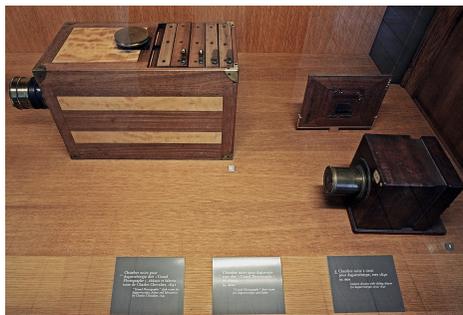
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Daguerréotype



Louis Daguerre, associé de Niépce.

Plaque de cuivre recouverte de iodure d'argent, développée à la vapeur de mercure.

Positif uniquement (pas de reproduction)

Brevet acquis par le gouvernement français, qui en « dote libéralement le monde entier ».

Daguerréotypes chers, mais « daguerréotypomanie ».

« À partir d'aujourd'hui, la peinture est morte ! »

7/126

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

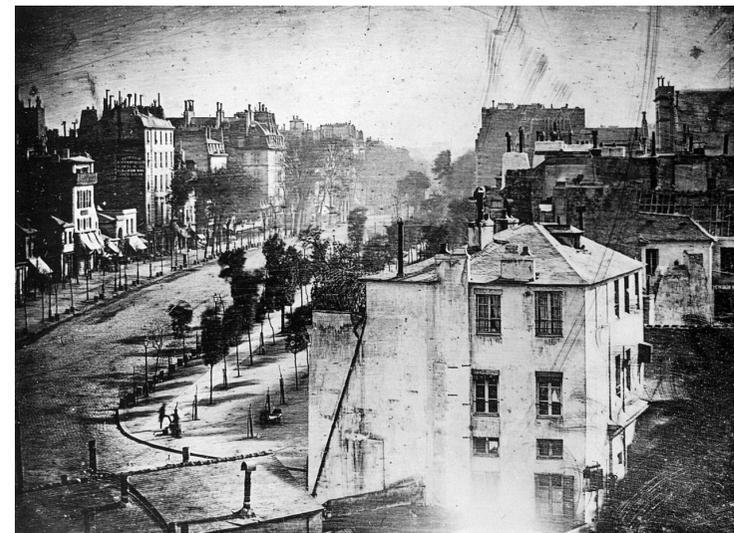
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Le Boulevard du Temple (1838)



Temps de pose : > 10 minutes.

8/126

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

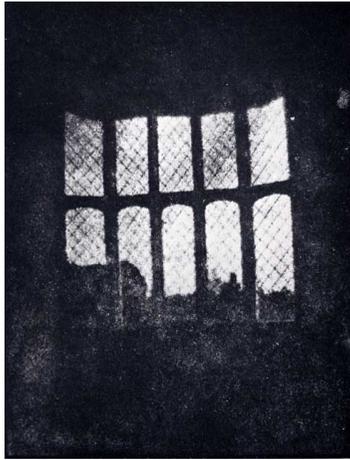
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Procédé Talbot : le calotype



Abbaye de Lacock (1835)
1ère photographie avec négatif.

William Henry Fox Talbot : « photogenic drawing ».
Feuille de papier enduite de chlorure d'argent dans sa chambre noire : le négatif.
Moins bonne qualité que daguerréotype, et brevet.

9/126

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

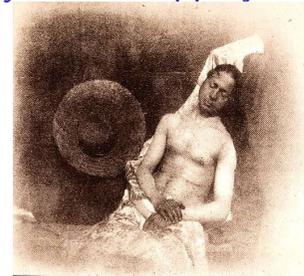
Une brève histoire de la photographie

La lumière
Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle
Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique
Conclusion

Noyade de Hippolyte Bayard, 1840



Positif sur papier
(pas de reproduction)

1839 : première exposition de photographies.

Le cadavre du Monsieur que vous voyez ci-dérrière est celui de M. Bayard, inventeur du procédé dont vous venez de voir ou dont vous allez voir les merveilleux résultats. À ma connaissance, il y a à peu près trois ans que cet ingénieux et infatigable chercheur s'occupait de perfectionner son invention. L'Académie, le Roi et tous ceux qui ont vu ces dessins que lui trouvait imparfaits les ont admirés comme vous les admirez en ce moment. Cela lui fait beaucoup d'honneur et ne lui a pas valu un liard. Le gouvernement qui avait beaucoup trop donné à M. Daguerre a dit ne rien pouvoir faire pour M. Bayard et le malheureux s'est noyé. Oh ! instabilité des choses humaines ! Les artistes, les savants, les journaux se sont occupés de lui depuis longtemps et aujourd'hui qu'il y a plusieurs jours qu'il est exposé à la morgue personne ne l'a encore reconnu ni réclamé. Messieurs et Dames, passons à d'autres, de crainte que votre odorat ne soit affecté, car la figure du Monsieur et ses mains commencent à pourrir comme

10/126 vous pouvez le remarquer.

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière
Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle
Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique
Conclusion

La photographie en couleurs : l'autochrome



Frères Lumière 1903.
Grains de féculé de pomme de terre teints en rouge, vert, bleu, sur une plaque de verre.
Image unique.

Temps de pose : plusieurs minutes.

11/126

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière
Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle
Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique
Conclusion

Kodak Brownie (1900)



George Eastman (fondateur Kodak) : film celluloïd (1885).
Premiers films en couleur modernes : Kodachrome (1935) et Agfacolor (1936).

12/126

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière
Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle
Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique
Conclusion

Leica (1925)



Oskar Barnack - Leica 1925
Film « 24x36 » : appareil compact
Problème petit format : agrandissement nécessaire
(donc grain de la pellicule fin)

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Polaroid (1948)



Tirage instantané

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

13/126

14/126

Etc.



Jusque fin XXème siècle, améliorations des techniques
chimie / optique / électronique
(automatismes : autofocus, mesure d'exposition...)

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

L'appareil photo numérique



Mavica (Sony) : prototype en 1981.
490 x 570 points (280 000 pixels)

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

15/126

16/126

APN



1997-2000 Premiers APN grand public : Sony Mavica.
Lecteur de disquette 3,5 pouces
1.3Mp
600 - 1000 dollars

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

XXIème siècle (1)



10-20 megapixels
Camera : quelques dollars.
Mais traitement d'images (logiciel)

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

17/126

18/126

XXIème siècle (2)



Logiciel embarqué

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Vers la *photographie computationnelle*

Définition : (wikipedia)

Computational photography or computational imaging refers to computational image capture, processing, and manipulation techniques that enhance or extend the capabilities of digital photography.

→ à la croisée de l'optique, du traitement du signal / image, de la vision par ordinateur.

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

19/126

20/126

High dynamic range (HDR)

The Washington Post

Washington
sunny 41/27 • Tomorrow: Partly sunny 35/23 • DETAILS, BIO FRIDAY, JANUARY 13, 2012 washington

S
er
ers
ing

ployment
of those 55
recession

FORISKEY

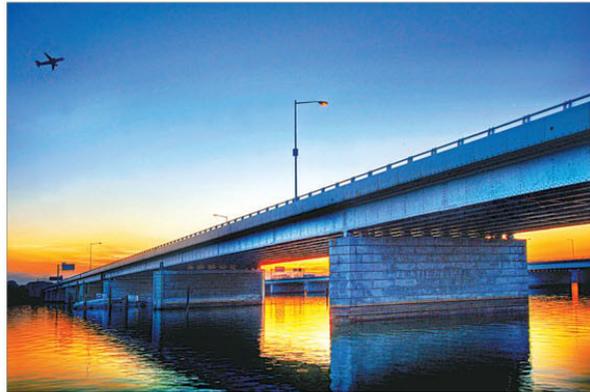
age of the eco-
nomizing cu-
older Ameri-

working
recession has
of other gener-
force, more
are employed
according to
from the Bu-
ties.

the surge of
complex, ex-
of the primary
think it is the
older Ameri-
the means to
ment needs.

on is closely
of shift in the
can in the

Long ago, the scene of disaster



A jetliner flies high over a tranquil scene at the 14th Street bridge, where 30 years ago winter weather and human error conspired to bring down Air Florida Flight 90 in a disaster that claimed 78 lives. This image is a composite created by taking several photos and combining them with computer software to transcend the visual limitations of standard photography. **Stories, B1.** For more photos, video and other coverage, go to postlocal.com.

Pan
decr
Afgh
vide

U.S. VOWS TO
ABUSE OF C

Damage to p
popular supp

BY CRAIG W
AND GREG

The Obama adm
Thursday strongly
viral video that a
picts Marines desce
es as U.S. official
vent a popular bu
ghanistan and for
to nascent peace
Taliban.

As the images o
nating on three bl
circulated around
fense Secretary L
denounced the vi
deplorable" and
President Hamid

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Appareil photo plénoptique



Lytro
(2012)

Mise au point en *post-traitement*.

[Lien www](#)

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Gigapan

Carnegie Mellon University / NASA / Google

→ Panoramas *gigapixels* interactifs.

[Lien www](#)

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Photosynth 3D (Microsoft)

Que faire avec une grande collection de photographies ?

[Lien www](#)

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
- 3 L'image numérique
- 4 La photographie computationnelle
- 5 Conclusion

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

25/126

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
 - Chambre noire
 - Objectif
 - Profondeur de champ
 - Défauts optiques
 - Exposition
- 3 L'image numérique
- 4 La photographie computationnelle
- 5 Conclusion

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

26/126

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
 - Chambre noire
 - Objectif
 - Profondeur de champ
 - Défauts optiques
 - Exposition
- 3 L'image numérique
- 4 La photographie computationnelle
- 5 Conclusion

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

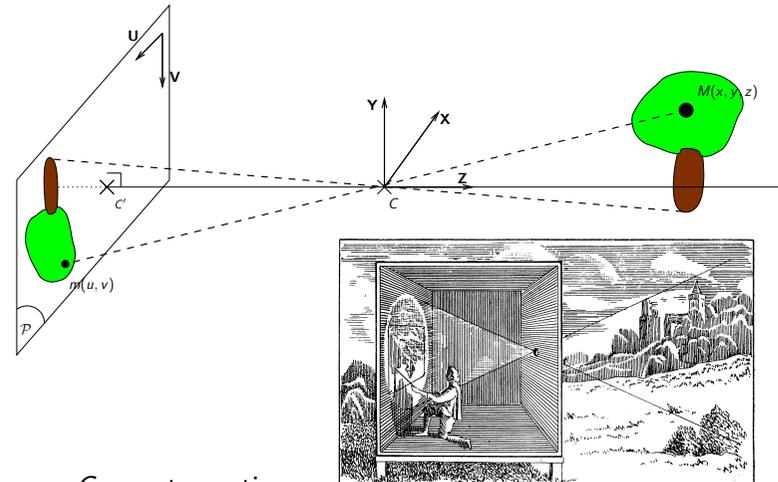
La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

27/126

Le modèle de la caméra à sténopé



- C : centre optique
- (CC') : axe optique
- C' de coordonnées $(0, 0, -f)$ dans (C, X, Y, Z)
- f : distance focale

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

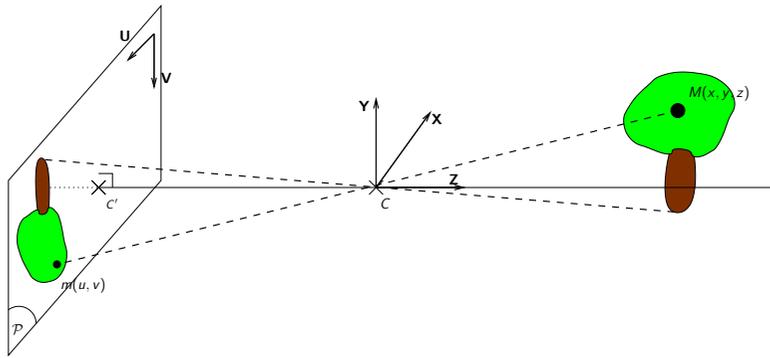
La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

28/126

Le modèle de la caméra à sténopé



Théorème de Thalès et relation entre (U, V) et (X, Y) donne (u, v) en fonction de (x, y, z) .

Application : (u, v) coordonnées dans l'image en pixels, (x, y, z) coordonnées dans le monde 3D.

La focale f régit le *rapport de reproduction*.

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière
Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle
Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique
Conclusion

Anamorphose de volume



Source : DXO

→ défaut inhérent à la projection sur un plan.

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière
Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

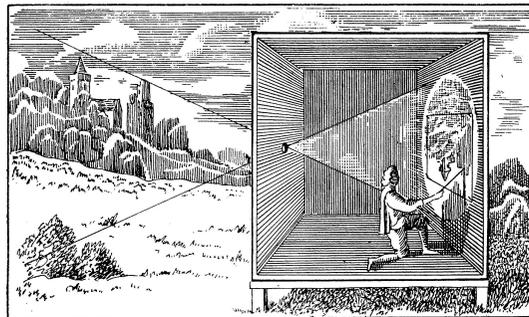
L'image numérique
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle
Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique
Conclusion

28/126

29/126

Inconvénients de la caméra à sténopé



→ nécessite un temps de pose long (plusieurs secondes / minutes avec un film moderne)

→ taille du sténopé :

- trop grand : image floue, peu contrastée
- trop petit : diffraction (donc flou)

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière
Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle
Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique
Conclusion

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
 - Chambre noire
 - Objectif
 - Profondeur de champ
 - Défauts optiques
 - Exposition
- 3 L'image numérique
- 4 La photographie computationnelle
- 5 Conclusion

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière
Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

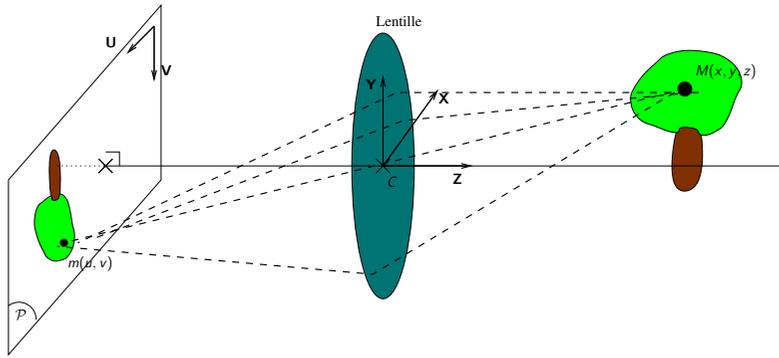
L'image numérique
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle
Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique
Conclusion

30/126

31/126

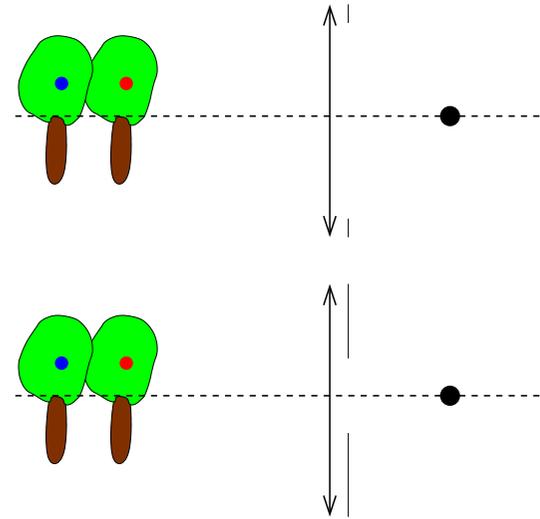
Avec une lentille



(modèle de lentille mince)
 avec lentille : intégration des rayons lumineux
 → objectif
 Lien www

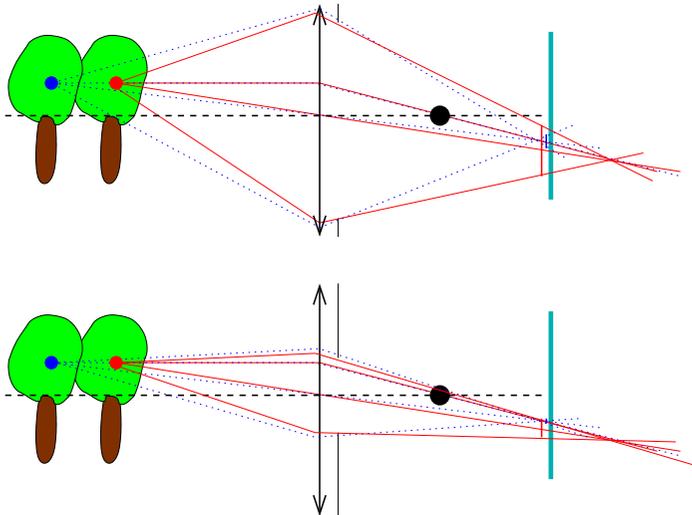
Petit cours de photographie numérique
 F. Sur - ENSMN
 Une brève histoire de la photographie
 La lumière
 Chambre noire
 Objectif
 Profondeur de champ
 Défauts optiques
 Exposition
 L'image numérique
 Capteurs
 Bruit
 Couleur
 Dynamique
 Numérisation
 Fichier informatique
 La photographie computationnelle
 Correction des défauts optiques
 Débruitage
 Restauration
 HDR
 Caméra plénoptique
 Conclusion

Exercice 1



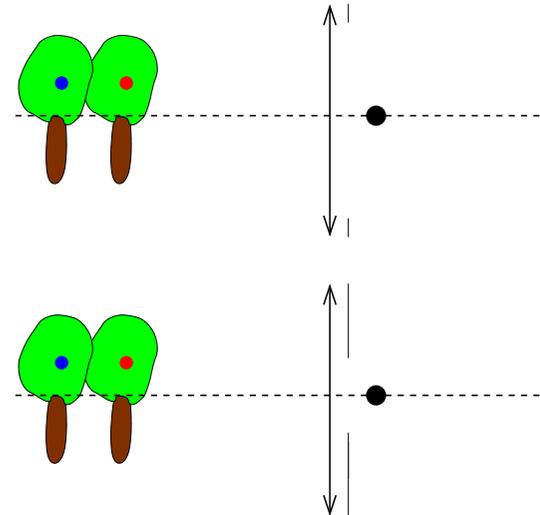
Petit cours de photographie numérique
 F. Sur - ENSMN
 Une brève histoire de la photographie
 La lumière
 Chambre noire
 Objectif
 Profondeur de champ
 Défauts optiques
 Exposition
 L'image numérique
 Capteurs
 Bruit
 Couleur
 Dynamique
 Numérisation
 Fichier informatique
 La photographie computationnelle
 Correction des défauts optiques
 Débruitage
 Restauration
 HDR
 Caméra plénoptique
 Conclusion

Solution



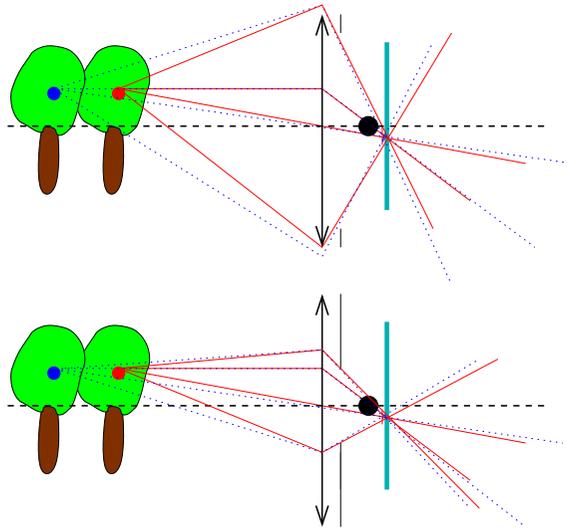
Petit cours de photographie numérique
 F. Sur - ENSMN
 Une brève histoire de la photographie
 La lumière
 Chambre noire
 Objectif
 Profondeur de champ
 Défauts optiques
 Exposition
 L'image numérique
 Capteurs
 Bruit
 Couleur
 Dynamique
 Numérisation
 Fichier informatique
 La photographie computationnelle
 Correction des défauts optiques
 Débruitage
 Restauration
 HDR
 Caméra plénoptique
 Conclusion

Exercice 2



Petit cours de photographie numérique
 F. Sur - ENSMN
 Une brève histoire de la photographie
 La lumière
 Chambre noire
 Objectif
 Profondeur de champ
 Défauts optiques
 Exposition
 L'image numérique
 Capteurs
 Bruit
 Couleur
 Dynamique
 Numérisation
 Fichier informatique
 La photographie computationnelle
 Correction des défauts optiques
 Débruitage
 Restauration
 HDR
 Caméra plénoptique
 Conclusion

Solution



Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire

Objectif

Profondeur de champ

Défauts optiques

Exposition

L'image numérique

Capteurs

Bruit

Couleur

Dynamique

Numérisation

Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques

Débruitage

Restauration

HDR

Caméra plénoptique

Conclusion

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
 - Chambre noire
 - Objectif
 - **Profondeur de champ**
 - Défauts optiques
 - Exposition
- 3 L'image numérique
- 4 La photographie computationnelle
- 5 Conclusion

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire

Objectif

Profondeur de champ

Défauts optiques

Exposition

L'image numérique

Capteurs

Bruit

Couleur

Dynamique

Numérisation

Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques

Débruitage

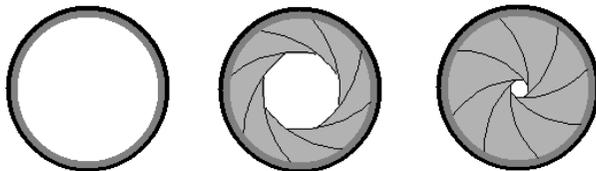
Restauration

HDR

Caméra plénoptique

Conclusion

Notion de profondeur de champ



Diaphragme = pupille

Liens www

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire

Objectif

Profondeur de champ

Défauts optiques

Exposition

L'image numérique

Capteurs

Bruit

Couleur

Dynamique

Numérisation

Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques

Débruitage

Restauration

HDR

Caméra plénoptique

Conclusion

Notion de profondeur de champ



Grande ouverture



Faible ouverture

À focale fixée :

ouverture grande : faible profondeur de champ

ouverture petite : grande profondeur de champ

À ouverture fixée :

longue focale : plus faible profondeur de champ

faible focale : plus grande profondeur de champ

→ portrait : focale assez longue, grande ouverture (pas d'anamorphose, sujet détaché du fond)

→ paysage : diaphragme fermé.

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire

Objectif

Profondeur de champ

Défauts optiques

Exposition

L'image numérique

Capteurs

Bruit

Couleur

Dynamique

Numérisation

Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques

Débruitage

Restauration

HDR

Caméra plénoptique

Conclusion

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
 - Chambre noire
 - Objectif
 - Profondeur de champ
 - Défauts optiques
 - Exposition
- 3 L'image numérique
- 4 La photographie computationnelle
- 5 Conclusion

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Défauts des lentilles : vignettage



Problème inhérent à la lentille mince / au sténopé.

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

42/126

43/126

Défauts des lentilles : distorsions géométriques



En barrillet



En coussinet

Corrections : groupement de lentilles

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

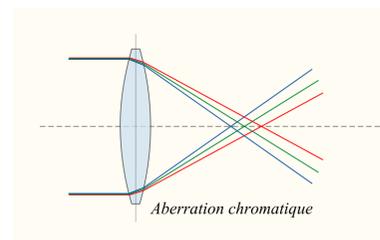
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Défauts des lentilles : aberrations chromatiques



Corrections :
Utilisation de fluorine
Double achromatique
Triplet apochromatique
Cas de la photo IR ou UV.

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

44/126

45/126

Défauts des lentilles : et aussi...

- Astigmatisme / coma (défauts de non-uniformité)
- Courbure de champ
- Réflexions parasites diffuses (*flare*)...

Finalem^{ent} :



Focale fixe : 4 à 8 lentilles, éventuellement groupées.
Téléobjectif : 2 à 7 groupes (jusque 15-20 lentilles).

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
 - Chambre noire
 - Objectif
 - Profondeur de champ
 - Défauts optiques
 - Exposition
- 3 L'image numérique
- 4 La photographie computationnelle
- 5 Conclusion

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

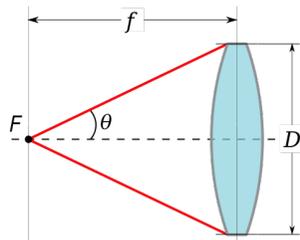
Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

46/126

47/126

Éclairement : le nombre d'ouverture



Diaphragme vu en F sous l'angle solide : $\Omega = \pi D^2 / (4f^2)$.
Éclairement par un flux lumineux parallèle à l'axe optique (en lux) :

$$E = \Omega \cdot T \cdot L = \frac{\pi D^2}{4f^2} TL = \frac{\pi TL}{4N^2}$$

- T : facteur de transmission de l'objectif
- L : luminance de la source lumineuse (proportionnelle à l'intensité lumineuse de la source).
- $N = f/D$ est le *nombre d'ouverture*

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Ouverture : f/N



Ouverture du diaphragme : $D = f/N$

→ objectif ouvrant à $f/2$ (i.e. $N = 2$), $f/4$ (i.e. $N = 4$), etc.

Éclairement inversement proportionnel à N^2

→ ouvertures standardisées en progression géom. raison $\sqrt{2}$:
 $f/1, f/1,4, f/2, f/2,8, f/4, f/5,6, f/8, f/11...$ (*cran*)

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

48/126

49/126

Principe de réciprocité

Durée d'exposition : t

Exposition lumineuse : $H = E \cdot t$

→ quantité de lumière cumulée par unité de surface pendant t (en lux.s)

Principe de réciprocité :

Multiplier (resp. diviser) le temps de pose par 2 en fermant (resp. ouvrant) d'un cran donne la même exposition.

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Exercice

Même exposition pour :

- $t = 1/100$ sec., $f/4$
- $t = \text{-----}$ sec., $f/2,8$
- $t = 1/25$ sec., $f/\text{-----}$
- $t = \text{-----}$ sec, $f/22$

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

50/126

51/126

Sensibilité

Photographie correctement exposée : la surface sensible reçoit la « bonne » quantité de lumière

→ celle qui permet d'obtenir une image qui n'est ni « trop claire » ni « trop sombre ».
(notion forcément un peu arbitraire)

Définition : sensibilité $S = H_0/H$

où H est l'exposition nécessaire, et H_0 une constante.

Unité de la sensibilité : ISO.

→ une surface de sensibilité 200 ISO a besoin de 2 fois moins d'exposition lumineuse qu'une surface de sensibilité 100 ISO pour être correctement exposée.

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Exercice

Exemple : même exposition pour :

- 100 ISO, $t = 1/100$ sec., $f/4$
- ----- ISO, $t = 1/200$ sec., $f/2,8$
- 200 ISO, $t = 1/100$ sec., $f/\text{-----}$
- 200 ISO, $t = \text{-----}$ sec., $f/4$
- ----- ISO, $t = 1/800$ sec., $f/5,6$

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

53/126

54/126

Ouverture / temps de pose / sensibilité

→ effets esthétiques.

[Lien www](#)

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

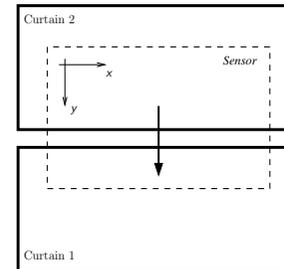
Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

L'obturateur : contrôle du temps de pose

Exemple de l'obturateur plan focal (à rideaux)

→ effet « rolling shutter »



Jacques-Henri Lartigue

Une Delage au grand prix de l'Automobile-Club de France de 1912

[Lien www](#)

Définition : Synchro-X (1/100 s ... 1/500 s)

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
- 3 **L'image numérique**
 - Capteurs
 - Bruit
 - Couleur
 - Dynamique
 - Numérisation
 - Fichier informatique
- 4 La photographie computationnelle
- 5 Conclusion

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
- 3 **L'image numérique**
 - Capteurs
 - Bruit
 - Couleur
 - Dynamique
 - Numérisation
 - Fichier informatique
- 4 La photographie computationnelle
- 5 Conclusion

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

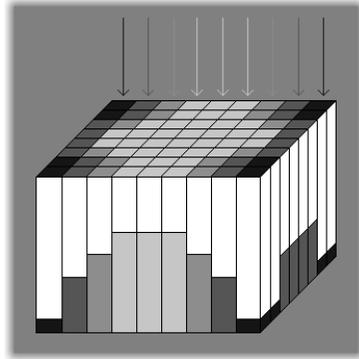
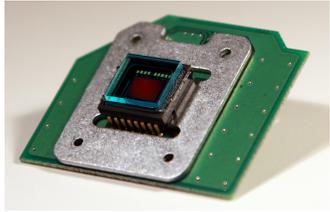
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Les capteurs imageurs



Deux grandes familles : CCD (1969) / CMOS (1963)
Années 1980 : applications vidéo
Années 1990 : applications photo

But : mesurer une tension en chaque photosite fonction de l'exposition lumineuse.

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
- 3 L'image numérique
 - Capteurs
 - **Bruit**
 - Couleur
 - Dynamique
 - Numérisation
 - Fichier informatique
- 4 La photographie computationnelle
- 5 Conclusion

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

La formation de l'image : le bruit

→ tension en chaque photosite proportionnelle à l'exposition.
Tension *haute* : site *clair*
Tension *basse* : site *sombre*

En chaque photosite :



Sources d'incertitude dans la mesure de la tension :

- courant d'obscurité (*residual dark current*)
- bruit photonique (*shot noise*)
- bruit de lecture (*read-out noise*)

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Exemple



Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Modèle stochastique

Tension en un photosite pendant une durée d'exposition t :

$$u = \mu + g\eta_{p+d} + \delta$$

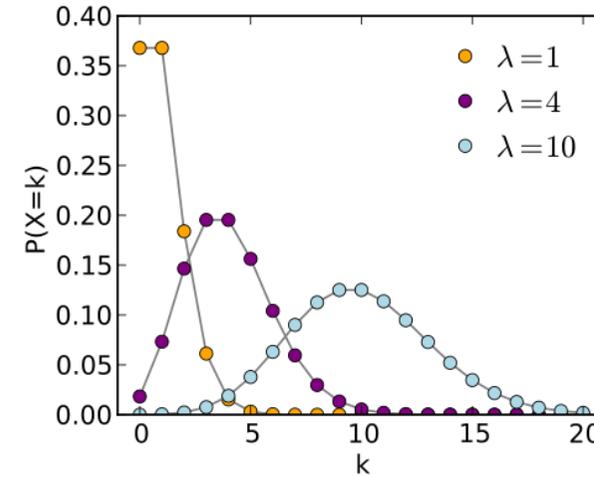
- μ : décalage (*offset*)
→ fixé par le constructeur
- p nombre moyen d'électrons générés par les photons arrivant pendant t
→ proportionnel à l'exposition lumineuse par l'intermédiaire de l'*efficacité quantique*
- d nombre moyen d'électrons *spontanément* générés pendant t (*dark current*)
- η_{p+d} variable aléatoire de Poisson ($\lambda = p + d$)
- g : coefficient d'amplification (*gain*)
- δ variable aléatoire gaussienne (moyenne 0, variance σ^2)

Remarque : d dépend de la température et de t .

→ en conditions normales, pour $t < 1$ sec., $d = 0$.

Rappel : la loi de (Siméon Denis) Poisson

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$$



Propriété : $E(X) = \text{Var}(X) = \lambda$.

Propriété du bruit

Modèle stochastique :

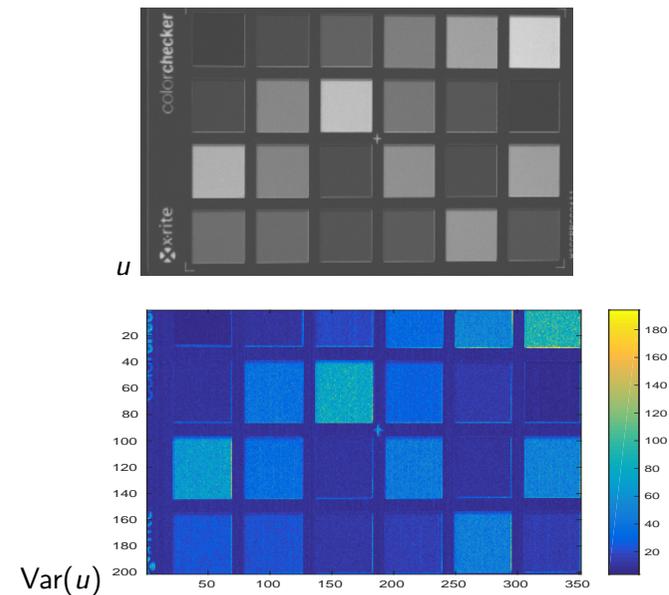
$$u = \mu + g\eta_{p+d} + \delta$$

Conséquence :

- $E(u) = \mu + g(p + d)$
- $\text{Var}(u) = g^2(p + d) + \sigma^2 = gE(u) + \sigma^2 - g\mu$

Propriété : la variance du bruit est une fonction affine de la tension mesurée moyenne (représentant l'exposition).

Exemple : variance empirique sur 100 images



Le gain règle la sensibilité

Hypothèse : $d = 0$ (conditions « normales »)

$$\begin{cases} E(u) = \mu + gp \\ \text{Var}(u) = gE(u) + \sigma^2 - g\mu \end{cases}$$

→ si durée de pose divisée par 2 (ou diaphragme fermé d'un cran), alors p divisé par 2, mais on garde la même tension moyenne $E(u)$ en multipliant le gain g par 2.

→ le gain permet de régler la sensibilité (ISO) du capteur.

Contrepartie : variance du bruit ↗ quand gain ↗.

Remarque pour les poses longues : compromis gain / temps de pose (dark noise)

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Illustration



Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

68/126

69/126

Question

Intérêt d'avoir des « gros » photosites ?

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
- 3 L'image numérique
 - Capteurs
 - Bruit
 - **Couleur**
 - Dynamique
 - Numérisation
 - Fichier informatique
- 4 La photographie computationnelle
- 5 Conclusion

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

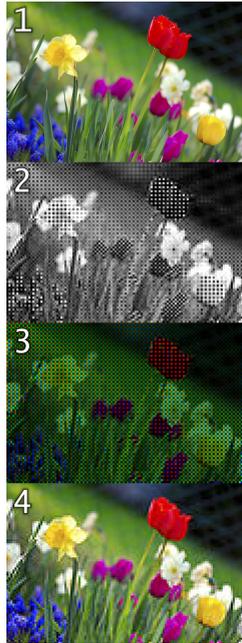
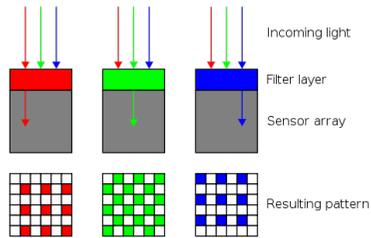
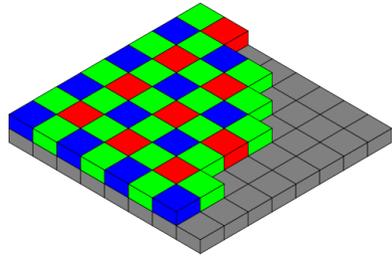
Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

70/126

72/126

La couleur : matrice de Bayer et démosaïçage



Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

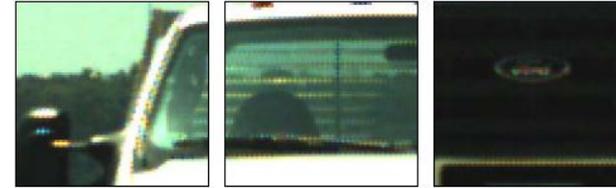
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Défauts potentiels du démosaïçage



Fausses couleurs



Zippering

<< **Alternative** >> : capteur Foveon. [Lien www](#)

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

73/126

74/126

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
- 3 L'image numérique
 - Capteurs
 - Bruit
 - Couleur
 - Dynamique
 - Numérisation
 - Fichier informatique
- 4 La photographie computationnelle
- 5 Conclusion

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

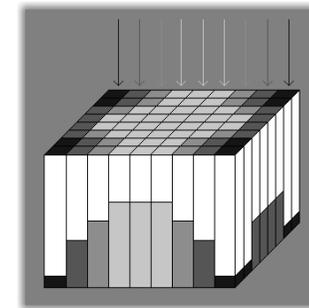
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

La dynamique



Capacité des *puits* limitée.

Définition : gamme dynamique valeur utile entre *plus petite intensité mesurable* (au dessus du bruit) et *plus grande intensité lumineuse mesurable* (avant saturation)

→ *gamme dynamique* limitée.

Remarque : dynamique ↘ quand ISO ↗.

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

75/126

76/126

Exemple



Expo. pour hautes lumières



Expo. pour faibles lumières

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
- 3 L'image numérique
 - Capteurs
 - Bruit
 - Couleur
 - Dynamique
 - Numérisation
 - Fichier informatique
- 4 La photographie computationnelle
- 5 Conclusion

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

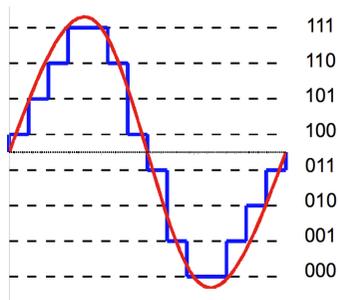
77/126

78/126

La quantification en niveaux de gris

→ la tension mesurée en chaque photosite doit être transformée en une suite de bits pour être codée informatiquement.

conversion analogique → numérique (CAN)



Exemple avec résolution de 3 bits.

Rappel : $000 = 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 0$;
 $011 = 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 3 \dots$

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Résolution des niveaux de gris



8 bits

2 bits

Résolution des CAN : 10-14 bits
(pas la peine d'augmenter la résolution à cause de la dynamique restreinte et du bruit).

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

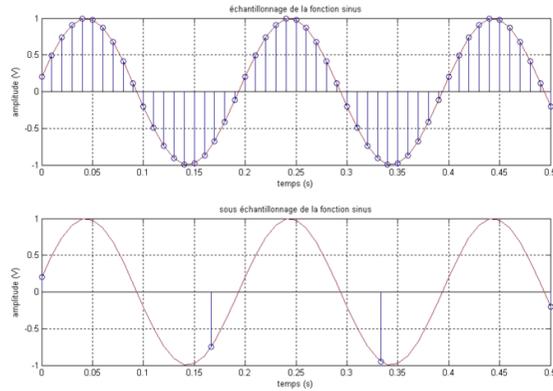
Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

79/126

80/126

La résolution spatiale : échantillonnage



Théorème de Shannon (1948) - Nyquist (1929) : la fréquence d'échantillonnage doit être au moins le double de la plus haute fréquence présente dans la signal à numériser.

Sinon apparition d'*aliasing*.

81/126

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire

Objectif

Profondeur de champ

Défauts optiques

Exposition

L'image numérique

Capteurs

Bruit

Couleur

Dynamique

Numérisation

Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques

Débruitage

Restauration

HDR

Caméra plénoptique

Conclusion

Exemple d'aliasing



Question : comment éviter l'aliasing ?

82/126

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire

Objectif

Profondeur de champ

Défauts optiques

Exposition

L'image numérique

Capteurs

Bruit

Couleur

Dynamique

Numérisation

Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques

Débruitage

Restauration

HDR

Caméra plénoptique

Conclusion

Rappel : transformée de Fourier (discrète)

Signal discret *périodique* : y_0, y_1, \dots, y_{N-1} .

Notation : $\omega_N = e^{2i\pi/N}$

Définition : $Y_n = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} y_k \omega_N^{-nk}$ est la TF de (y_n) .

Propriété : $y_n = \frac{1}{N} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} Y_k \omega_N^{nk}$ est la TF inverse de (Y_n) .

Propriété fondamentale : DFT et IDFT se calculent rapidement grâce à l'algorithme de la *Transformée de Fourier Rapide* (FFT). (Cooley & Tuckey, IBM, 1965)

→ c'est cet algorithme qui a permis la révolution numérique !

Lien www

83/126

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire

Objectif

Profondeur de champ

Défauts optiques

Exposition

L'image numérique

Capteurs

Bruit

Couleur

Dynamique

Numérisation

Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques

Débruitage

Restauration

HDR

Caméra plénoptique

Conclusion

Représentation fréquentielle d'une image

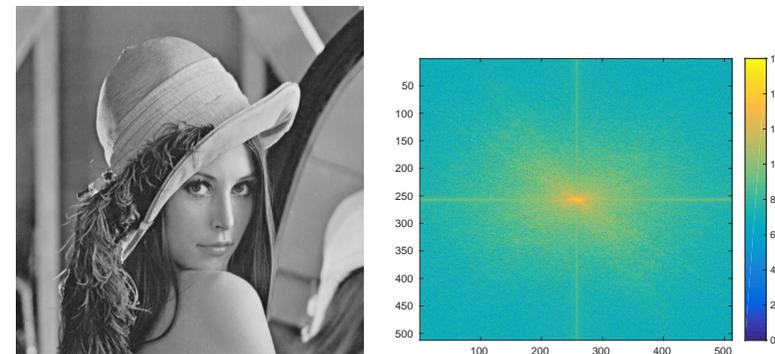


Image originale (*Lena*) et spectre ($|Y_{k,l}|$)
(basses fréquences au milieu de l'image du spectre, hautes fréquences aux extrémités)

84/126

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire

Objectif

Profondeur de champ

Défauts optiques

Exposition

L'image numérique

Capteurs

Bruit

Couleur

Dynamique

Numérisation

Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques

Débruitage

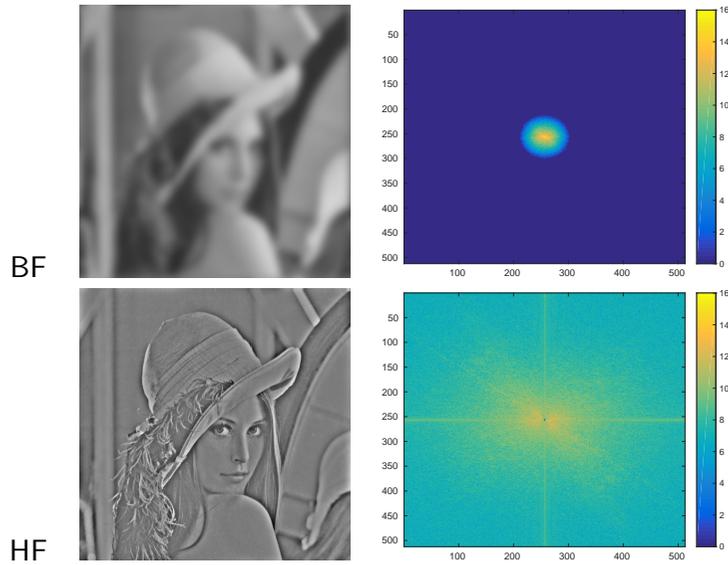
Restauration

HDR

Caméra plénoptique

Conclusion

Représentation fréquentielle d'une image



$\sigma = 10$

84/126

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

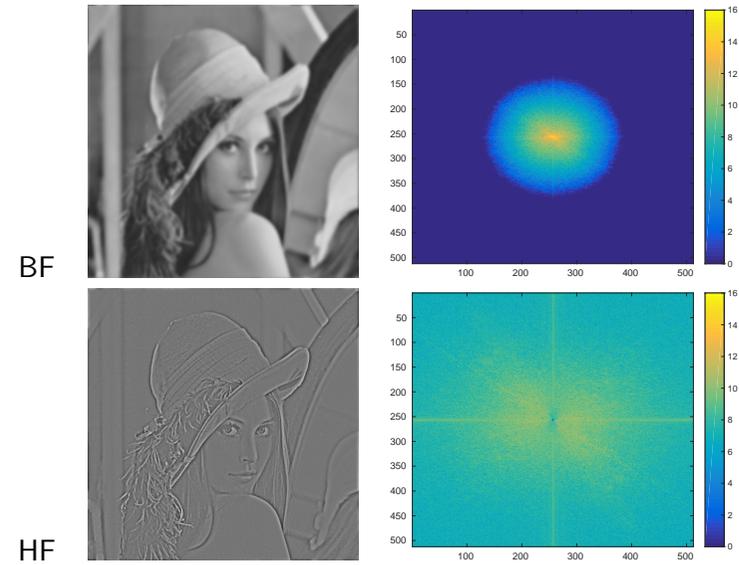
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Représentation fréquentielle d'une image



$\sigma = 30$

84/126

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

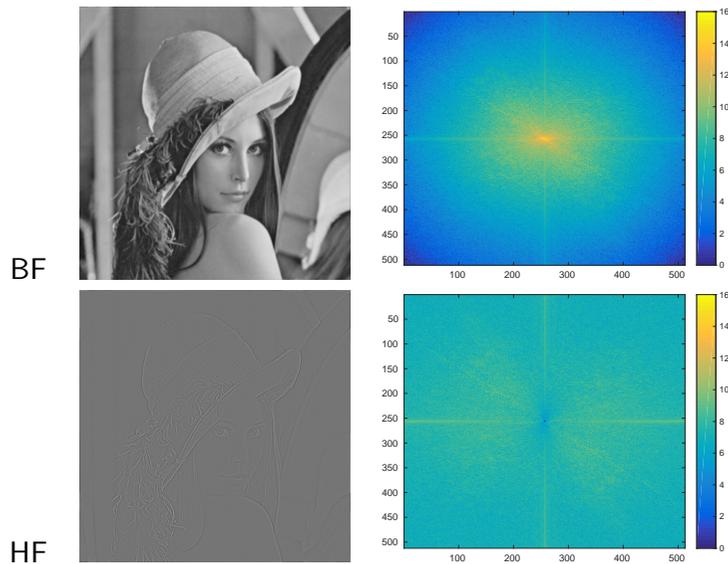
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Représentation fréquentielle d'une image



$\sigma = 100$

84/126

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Solution pratique pour éviter l'aliasing

Choix technologique :

Pour éviter l'aliasing, on s'assure du respect de la condition de Nyquist en coupant les hautes fréquences du signal *avant* numérisation.

→ on rend l'image (un peu) floue !

85/126

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

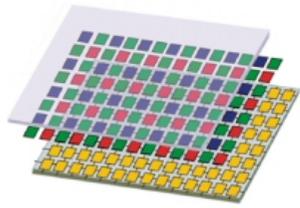
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Filtre passe-bas / anti-aliasing



Le "capteur" :

- 1 : filtre passe-bas (anti-aliasing)
- 2 : filtre de Bayer
- 3 : CMOS ou CCD

→ nécessité de placer un filtre passe-bas devant le capteur (ou une optique peu « piquée »)

→ ...ou « course aux mégapixels » : capteur de résolution supérieure à la meilleure optique (limitée de toute façon par la diffraction).

Conséquence : dans les appareils haut de gamme récents ou sur les smartphones, le filtre AA est supprimé.

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire

Objectif

Profondeur de champ

Défauts optiques

Exposition

L'image numérique

Capteurs

Bruit

Couleur

Dynamique

Numérisation

Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques

Débruitage

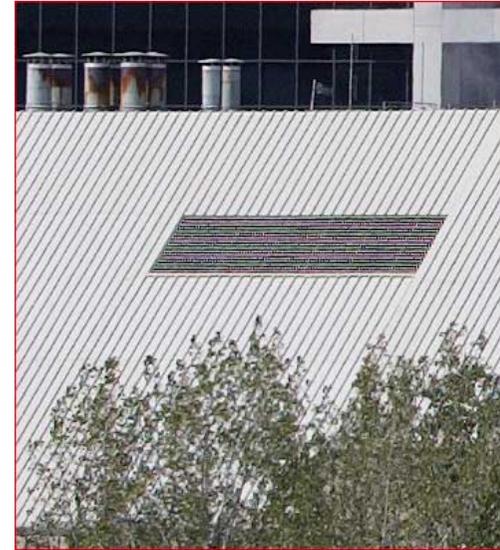
Restauration

HDR

Caméra plénoptique

Conclusion

Exemple d'aliasing (réel)



Canon EOS 1Ds

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire

Objectif

Profondeur de champ

Défauts optiques

Exposition

L'image numérique

Capteurs

Bruit

Couleur

Dynamique

Numérisation

Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques

Débruitage

Restauration

HDR

Caméra plénoptique

Conclusion

86/126

87/126

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
- 3 L'image numérique
 - Capteurs
 - Bruit
 - Couleur
 - Dynamique
 - Numérisation
 - Fichier informatique
- 4 La photographie computationnelle
- 5 Conclusion

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire

Objectif

Profondeur de champ

Défauts optiques

Exposition

L'image numérique

Capteurs

Bruit

Couleur

Dynamique

Numérisation

Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques

Débruitage

Restauration

HDR

Caméra plénoptique

Conclusion

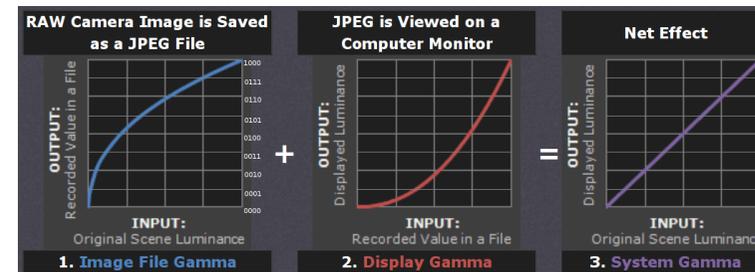
Pré-traitement : correction gamma

Fichier RAW : représentation linéaire de l'éclaircement comme un "niveau de gris" (ou R,V1,V2,B)

Mais :

- les écrans ne produisent pas un éclaircement proportionnel au niveau de gris
- l'oeil n'est pas linéaire : on perçoit mieux les nuances dans les tons sombres que dans les tons clairs.

→ on ne discrétise pas u , mais u^γ , avec $\gamma = 1/2, 2$.



Source : <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/gamma-correction.htm>

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire

Objectif

Profondeur de champ

Défauts optiques

Exposition

L'image numérique

Capteurs

Bruit

Couleur

Dynamique

Numérisation

Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques

Débruitage

Restauration

HDR

Caméra plénoptique

Conclusion

88/126

89/126

Vers le fichier informatique

Fichier RAW : intégralité des informations, sans post-traitement (sortie directe du CAN, pas de démosaiçage).

« poids » d'une image native : exemple du Canon EOS6D capteur de 5472×3648 photosites ($\simeq 20,2$ MegaPixels) CAN 14 bits.

Image = $5472 \times 3648 \times 14$ bits = $2,8 \cdot 10^8$ bits

1 octet = 8 bits

→ 33,3 Mo.

+ autres données + compression sans perte

« poids » d'un fichier RAW en mémoire : 25 à 40 Mo.

→ il faut réduire (*compresser*)...

Compression sans perte

Compression sans perte d'information (*lossless encoding*).

Deux familles utilisées en imagerie :

- Run Length Encoding (RLE)
Comment compresser un fichier fait de :
1 a, puis 1022 z, puis 1 b ? (1024 octets = 1ko)
- Codage entropique, algorithme de Huffman
Cf *théorie statistique de l'information* (Shannon 1948)

Exemple des fichiers contenant du texte :

codage ASCII : chaque lettre est codée sur 8 bits.

Or en Français, la fréquence des lettres n'est pas uniforme.

Idée du codage entropique : peu de bits pour les lettres les plus fréquentes, davantage pour les lettres rares.

→ c'est ce qui est utilisé lorsqu'on "zippe" un fichier.

Bien sûr ne marche pas sur une distribution uniforme...

Compression avec perte

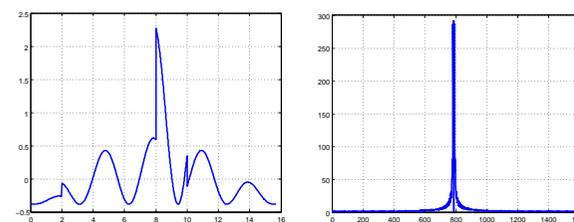
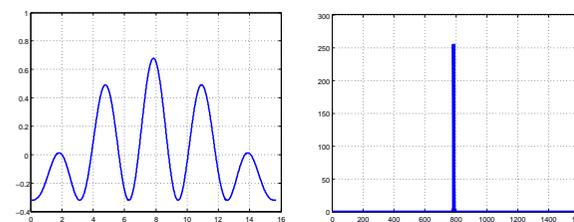
Les humains ne sont pas sensibles à l'intégralité de l'information présente dans une image.
(déjà utilisé dans échantillonnage / quantification des niveaux de gris)

→ on peut se permettre d'abandonner une partie de l'information sans dégradation (trop) sensible.

Idée de JPEG : éliminer les hautes fréquences.
(remarque : même idée dans MP3)

Transformée de Fourier et régularité

Propriété de la TF : plus un signal est régulier, plus ses coefficients de Fourier décroissent vite.

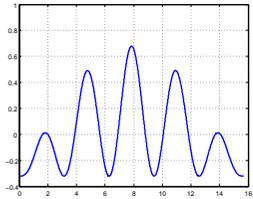


Signal

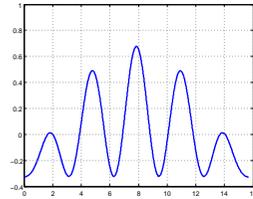
Spectre

Idée pour la compression ?

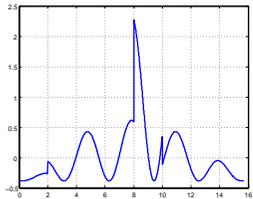
→ On garde seulement les coefficients centraux (autres à 0).



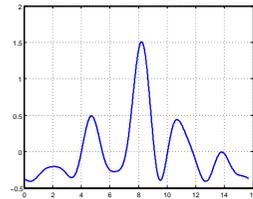
fonction originale



reconstruction avec 21 coeff.



fonction originale

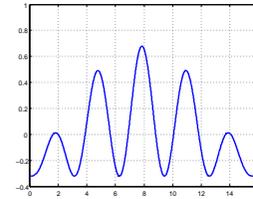


reconstruction avec 21 coeff.

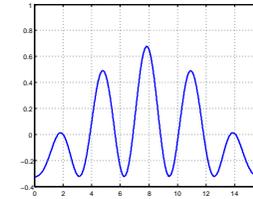
94/126

Idée pour la compression ?

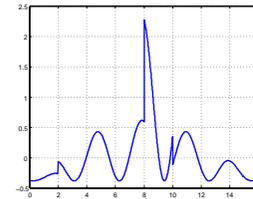
→ On garde seulement les coefficients centraux (autres à 0).



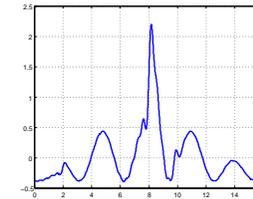
fonction originale



reconstruction avec 21 coeff.



fonction originale

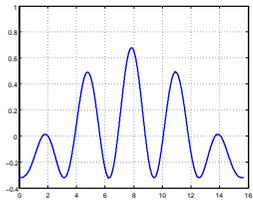


reconstruction avec 81 coeff.

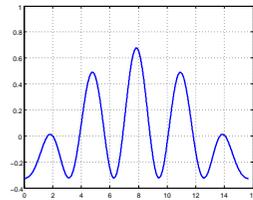
94/126

Idée pour la compression ?

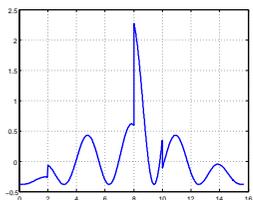
→ On garde seulement les coefficients centraux (autres à 0).



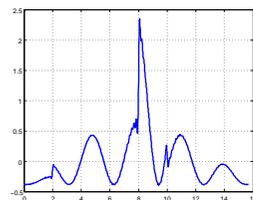
fonction originale



reconstruction avec 21 coeff.



fonction originale



reconstruction avec 201 coeff.

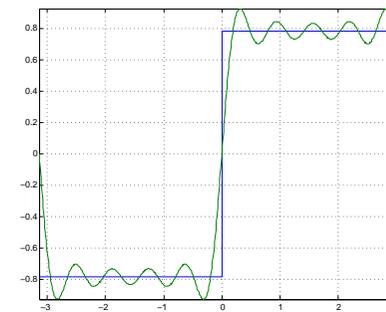
94/126

Effet de Gibbs

Soit f 2π -périodique valant :
$$\begin{cases} -\pi/4 & \text{entre } -\pi \text{ et } 0 \\ \pi/4 & \text{entre } 0 \text{ et } \pi \end{cases}$$

Sa série de Fourier est :
$$\sum_{k=0}^{+\infty} \frac{\sin((2k+1)x)}{2k+1}$$

5 termes



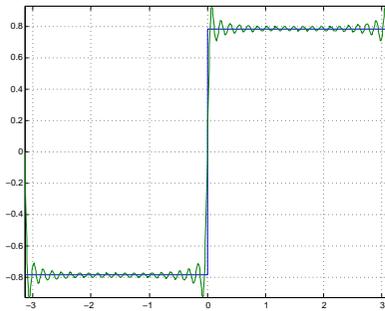
On peut montrer que la valeur de l' "oscillation résiduelle" est constante et vaut : ~ 0.14 .

95/126

Effet de Gibbs

Soit f 2π -périodique valant : $\begin{cases} -\pi/4 & \text{entre } -\pi \text{ et } 0 \\ \pi/4 & \text{entre } 0 \text{ et } \pi \end{cases}$

Sa série de Fourier est : $\sum_{k=0}^{+\infty} \frac{\sin((2k+1)x)}{2k+1}$.



21 termes

On peut montrer que la valeur de l' "oscillation résiduelle" est constante et vaut : ~ 0.14 .

95/126

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire

Objectif

Profondeur de champ

Défauts optiques

Exposition

L'image numérique

Capteurs

Bruit

Couleur

Dynamique

Numérisation

Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques

Débruitage

Restauration

HDR

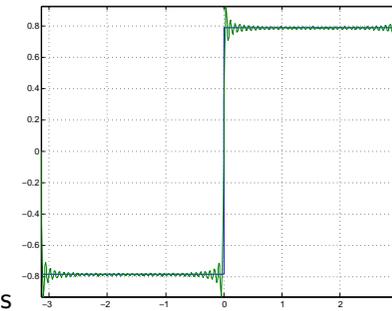
Caméra plénoptique

Conclusion

Effet de Gibbs

Soit f 2π -périodique valant : $\begin{cases} -\pi/4 & \text{entre } -\pi \text{ et } 0 \\ \pi/4 & \text{entre } 0 \text{ et } \pi \end{cases}$

Sa série de Fourier est : $\sum_{k=0}^{+\infty} \frac{\sin((2k+1)x)}{2k+1}$.



41 termes

On peut montrer que la valeur de l' "oscillation résiduelle" est constante et vaut : ~ 0.14 .

95/126

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire

Objectif

Profondeur de champ

Défauts optiques

Exposition

L'image numérique

Capteurs

Bruit

Couleur

Dynamique

Numérisation

Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques

Débruitage

Restauration

HDR

Caméra plénoptique

Conclusion

JPEG : images

Joint Photographics Experts Group (normalisé en 1993).

Compression (par rapport à image 24 bits RGB) à un taux $\simeq 20$ sans perte de qualité visible.

Préliminaires :

DCT 2D :

$$\hat{Y}_{n,m} = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} y_{k,l} \cos\left(\frac{\pi n(k+1/2)}{N}\right) \cos\left(\frac{\pi m(l+1/2)}{N}\right)$$

RVB \rightarrow YCbCr (crédit image : Wikipedia.org)



original



Y



Cb



Cr

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire

Objectif

Profondeur de champ

Défauts optiques

Exposition

L'image numérique

Capteurs

Bruit

Couleur

Dynamique

Numérisation

Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques

Débruitage

Restauration

HDR

Caméra plénoptique

Conclusion

JPEG : schéma de l'algorithme (1)

Étapes de la compression d'une image couleur :

- RVB \rightarrow YCbCr;
- définition de Cb-Cr divisée par 2 (argument psycho-visuel);
- découpage des canaux en blocs 8x8;
- puis...

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire

Objectif

Profondeur de champ

Défauts optiques

Exposition

L'image numérique

Capteurs

Bruit

Couleur

Dynamique

Numérisation

Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques

Débruitage

Restauration

HDR

Caméra plénoptique

Conclusion

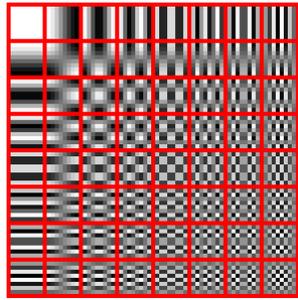
96/126

97/126

JPEG : schéma de l'algorithme (2)

- DCT sur les blocs (DCT = comb. linéaire de "blocs 8x8") :

niveaux de gris d'un bloc 8x8 :



$$\begin{pmatrix} 52 & 55 & 61 & 66 & 70 & 61 & 64 & 73 \\ 63 & 59 & 55 & 90 & 109 & 85 & 69 & 72 \\ 62 & 59 & 68 & 113 & 144 & 104 & 66 & 73 \\ 63 & 58 & 71 & 122 & 154 & 106 & 70 & 69 \\ 67 & 61 & 68 & 104 & 126 & 88 & 68 & 70 \\ 79 & 65 & 60 & 70 & 77 & 68 & 58 & 75 \\ 85 & 71 & 64 & 59 & 55 & 61 & 65 & 83 \\ 87 & 79 & 69 & 68 & 65 & 76 & 78 & 94 \end{pmatrix}$$

coefficients DCT $\widehat{Y}_{n,m}$:

$$\begin{pmatrix} -415 & -30 & -61 & 27 & 56 & -20 & -2 & 0 \\ 4 & -22 & -61 & 10 & 13 & -7 & -9 & 5 \\ -47 & 7 & 77 & -25 & -29 & 10 & 5 & -6 \\ -49 & 12 & 34 & -15 & -10 & 6 & 2 & 2 \\ 12 & -7 & -13 & -4 & -2 & 2 & -3 & 3 \\ -8 & 3 & 2 & -6 & -2 & 1 & 4 & 2 \\ -1 & 0 & 0 & -2 & -1 & -3 & 4 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -4 & -1 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

JPEG : schéma de l'algorithme (3)

- quantification / mise à zéro de coefficients de la DCT :

matrice de quantification : (asymétrie ?)

$$Q = \begin{pmatrix} 16 & 11 & 10 & 16 & 24 & 40 & 51 & 61 \\ 12 & 12 & 14 & 19 & 26 & 58 & 60 & 55 \\ 14 & 13 & 16 & 24 & 40 & 57 & 69 & 56 \\ 14 & 17 & 22 & 29 & 51 & 87 & 80 & 62 \\ 18 & 22 & 37 & 56 & 68 & 109 & 103 & 77 \\ 24 & 35 & 55 & 64 & 81 & 104 & 113 & 92 \\ 49 & 64 & 78 & 87 & 103 & 121 & 120 & 101 \\ 72 & 92 & 95 & 98 & 112 & 100 & 103 & 99 \end{pmatrix}$$

coefficients de DCT quantifiés : $\widehat{B}_{n,m} = E \left(\frac{\widehat{Y}_{n,m}}{Q_{n,m}} \right)$

$$\widehat{B} = \begin{pmatrix} -26 & -3 & -6 & 2 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & -4 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 1 & 5 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -4 & 1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

JPEG : exemple de DCT sur un bloc 16x16

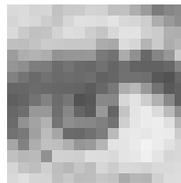
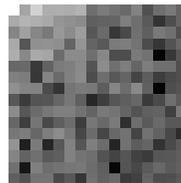


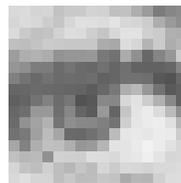
image originale



dct



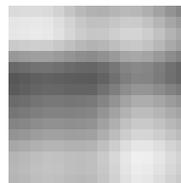
58% des coefs à zéro



reconstruction



95% des coefs à zéro



reconstruction

Artefacts de la compression JPEG



image originale (JPEG)

230ko

(sans compression : $567 \times 378 \times 3 \times 8 \text{ bits} = 628\text{ko}$)

Artefacts de la compression JPEG



qualité 70 dans GIMP
71ko

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Artefacts de la compression JPEG



qualité 30 dans GIMP
39ko

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

101/126

101/126

Artefacts de la compression JPEG



qualité 10 dans GIMP
19ko

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Artefacts de la compression JPEG



Artefacts : block effect, effet de Gibbs (ringing),
dérive couleurs

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

101/126

101/126

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
- 3 L'image numérique
- 4 La photographie computationnelle
 - Correction des défauts optiques
 - Débruitage
 - Restauration
 - HDR
 - Caméra plénoptique
- 5 Conclusion

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Au delà de la photographie

Une image numérique est le résultat de traitements électroniques et logiciels.

Révolution numérique : le *logiciel* est moins cher, plus flexible que le *matériel*.

Photographie computationnelle :

- remplacer du matériel coûteux par un traitement logiciel (cf smartphone, Google glass)
- au delà de l'image « classique ».

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

103/126

102/126

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
- 3 L'image numérique
- 4 La photographie computationnelle
 - Correction des défauts optiques
 - Débruitage
 - Restauration
 - HDR
 - Caméra plénoptique
- 5 Conclusion

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Correction des défauts optiques

Dépendent de caractéristiques de l'optique utilisée.

- Vignettage et aberrations géométriques dépendent de l'ouverture ;
- Aberrations chromatiques dépendent aussi de l'endroit de mise au point.

+ influence de la focale pour un objectif zoom.

→ utilisation des "données EXIF" dans le fichier RAW ou JPEG, et de modélisations des défauts d'un grand nombre d'objectifs.

Exemple : DXO [Lien www](#)

Attention : nécessite interpolation (si correction possible), éventuellement recadrage, et peut faire « monter » le bruit.

→ il reste un intérêt à avoir des optiques performantes (mais chères!).

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

105/126

104/126

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
- 3 L'image numérique
- 4 La photographie computationnelle
 - Correction des défauts optiques
 - Débruitage
 - Restauration
 - HDR
 - Caméra plénoptique
- 5 Conclusion

Le débruitage

La plupart des algorithmes de débruitage historiques sont *locaux* : ils travaillent pixel à pixel et s'appuient sur un voisinage du pixel considéré.

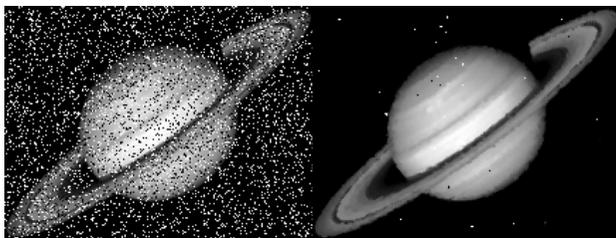
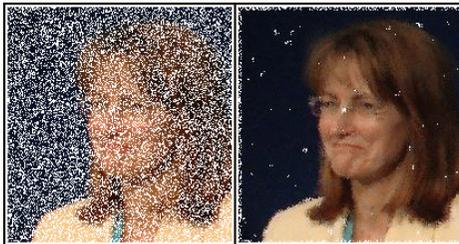
$$v(x, y) = F(\mathcal{V}_{u(x,y)})$$

Exemples de voisinages $\mathcal{V}_{u(x,y)}$:

X	X	X
X	u(x,y)	X
X	X	X

	X	X	X	
X	X	X	X	X
X	X	u(x,y)	X	X
X	X	X	X	X
	X	X	X	

Bruit impulsionnel



“Salt and pepper” noise (pixels défectueux)
Filtre : valeur *médiane* des niveaux de gris dans $\mathcal{V}_{u(x,y)}$

Bruit additif

Le niveau de gris observé est de la forme :

$$u(x, y) = u_0(x, y) + n(x, y)$$

- u_0 image idéale, sans bruit
- n composante de bruit, indépendante de pixel à pixel.

Remarque : si sur un voisinage de (x, y) fait de P pixels, le niveau de gris idéal est à peu près constant et n a une variance σ^2 , alors la moyenne des niveaux de gris sur le voisinage vaut $u_0(x, y)$ et la variance est σ^2/P .

Filtrage linéaire :

$$v(x, y) = F(\mathcal{V}_{u(x,y)}) = \sum_{(i,j) \in \mathcal{V}_{u(x,y)}} w(i, j)u(i, j)$$

→ il s'agit de la *convolution* de l'image u par le noyau w .
Exemple de choix pour les poids $w(i, j)$: fonction gaussienne de la distance à (x, y)

Filtrage linéaire gaussien

Exemple avec variance du poids augmentant.



Artefact : contours adoucis

Au delà du filtrage linéaire



diffusion
anisotrope

seuillage
ondelettes

→ adaptation des poids en fonction du contenu du voisinage.

Exemple : diffusion anisotrope (Perona-Malik 1990)

Autre approche : bruit prépondérant dans les hautes fréquences : mettre à 0 les coefficients de Fourier des HF
Idée semblable : wavelet shrinkage (Donoho-Johnstone 1994)

Les moyennes non-locales (NL means)

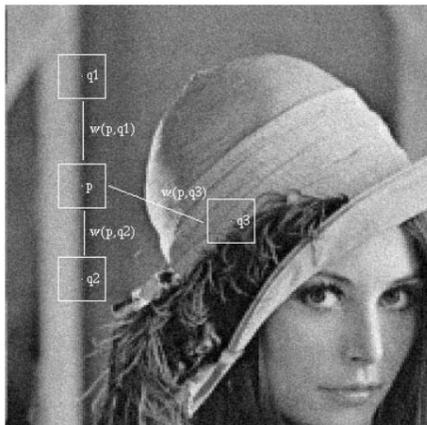


Figure 1. Scheme of NL-means strategy. Similar pixel neighborhoods give a large weight, $w(p,q1)$ and $w(p,q2)$, while much different neighborhoods give a small weight $w(p,q3)$.

Buades - Coll - Morel 2005

Les moyennes non-locales (NL means)

u image de taille $X \times Y$ à débruiter :

$$NLN(u)(x, y) = \sum_{1 \leq i \leq X, 1 \leq j \leq Y} w_{(x,y),(i,j)} u(i, j)$$

avec les poids

$$w_{(x,y),(i,j)} = \frac{1}{Z(x, y)} e^{-\frac{\|\mathcal{P}(i,j) - \mathcal{P}(x,y)\|_2^2}{h^2}}$$

→ débruitage PRIME de DXO [Lien www](#)

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
- 3 L'image numérique
- 4 La photographie computationnelle
 - Correction des défauts optiques
 - Débruitage
 - Restauration
 - HDR
 - Caméra plénoptique
- 5 Conclusion

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

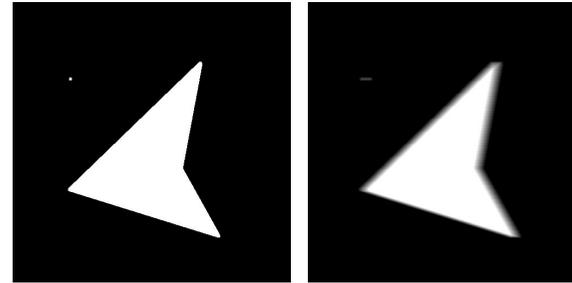
Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Restauration d'images par déconvolution

Modèle courant de dégradation des images :

$$u = g * u_0 + n$$



Sans bruit et g connu : autant d'équations que d'inconnues.
Avec bruit ou g inconnu : plus d'inconnues que d'équations
→ problème *mal posé*.
Résolution en ajoutant des hypothèses sur les propriétés
statistiques du bruit ou de l'image u_0 .

Exemple : flou de bougé (*motion blur*) [Lien www](#)

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

114/126

115/126

En astrophotographie

g dépend des performances optiques de l'imageur
(*point spread function*, PSF)

si n = bruit de Poisson : algorithme de Richardson-Lucy
(1972-1974).



Remarque : imagerie satellitaire grande consommatrice
d'algo de restauration.

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
- 3 L'image numérique
- 4 La photographie computationnelle
 - Correction des défauts optiques
 - Débruitage
 - Restauration
 - **HDR**
 - Caméra plénoptique
- 5 Conclusion

Petit cours de
photographie
numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire
de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie
computationnelle

Correction des défauts
optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

116/126

117/126

Imagerie à grande dynamique (HDR)



Brick au clair de lune, Gustave Le Gray, 1856-1857

HDR par fusion de photos à temps de pose différents.

Problème : Visualisation ?

(dynamique réduite des écrans ou des procédés d'impression)

Solution : tone mapping (mappage tonal)

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Imagerie à grande dynamique

Original images



-4 stops

-2 stops

+2 stops

+4 stops

Results after processing



Simple contrast reduction

Local tone mapping

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
- 3 L'image numérique
- 4 La photographie computationnelle
 - Correction des défauts optiques
 - Débruitage
 - Restauration
 - HDR
 - Caméra plénoptique
- 5 Conclusion

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

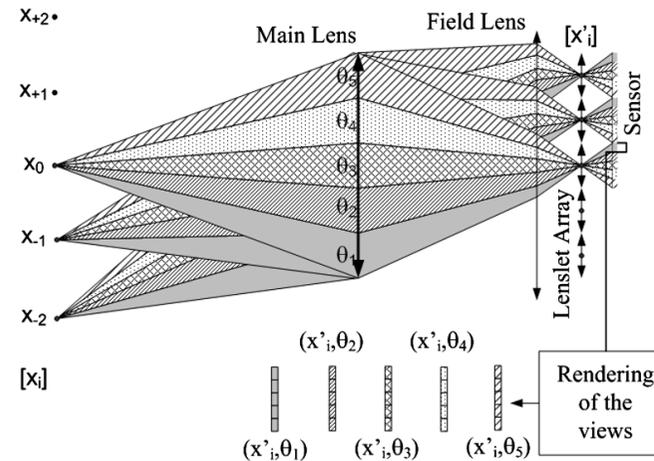
Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Caméra plénoptique : principe



Source : *Optimal design and critical analysis of a high-resolution video plenoptic demonstrator*, Journal of Electronic Imaging, 2012.

Petit cours de photographie numérique

F. Sur - ENSMN

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Caméra plénoptique : image brute



Source : Lytro

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

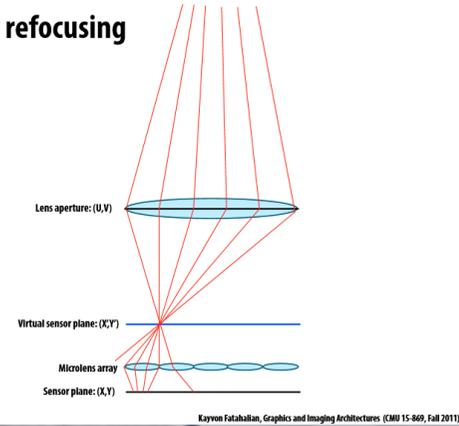
La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Caméra plénoptique : refocalisation (principe)

Digital refocusing



Source : cours Fatahalian CMU 2011

Limitation : résolution limitée.

Applications : refocalisation en post-production, « extended depth-of-field », 3D TV.

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Plan

- 1 Une brève histoire de la photographie
- 2 La lumière
- 3 L'image numérique
- 4 La photographie computationnelle
- 5 Conclusion

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion

Conclusion

→ Le logiciel intervient dans toutes les étapes de la création d'une image, et au-delà.

→ Implications artistiques / éthiques (qu'est-ce qu'une photographie? cf "World Press Photo")

→ Nombreuses applications scientifiques non abordées ici :

- imagerie astronomique (visible ou non),
- imagerie satellitaire (idem),
- imagerie « non conventionnelle » (contrôle non destructif, imagerie médicale, microscopie)
- . . .

Une brève histoire de la photographie

La lumière

Chambre noire
Objectif
Profondeur de champ
Défauts optiques
Exposition

L'image numérique

Capteurs
Bruit
Couleur
Dynamique
Numérisation
Fichier informatique

La photographie computationnelle

Correction des défauts optiques
Débruitage
Restauration
HDR
Caméra plénoptique

Conclusion