

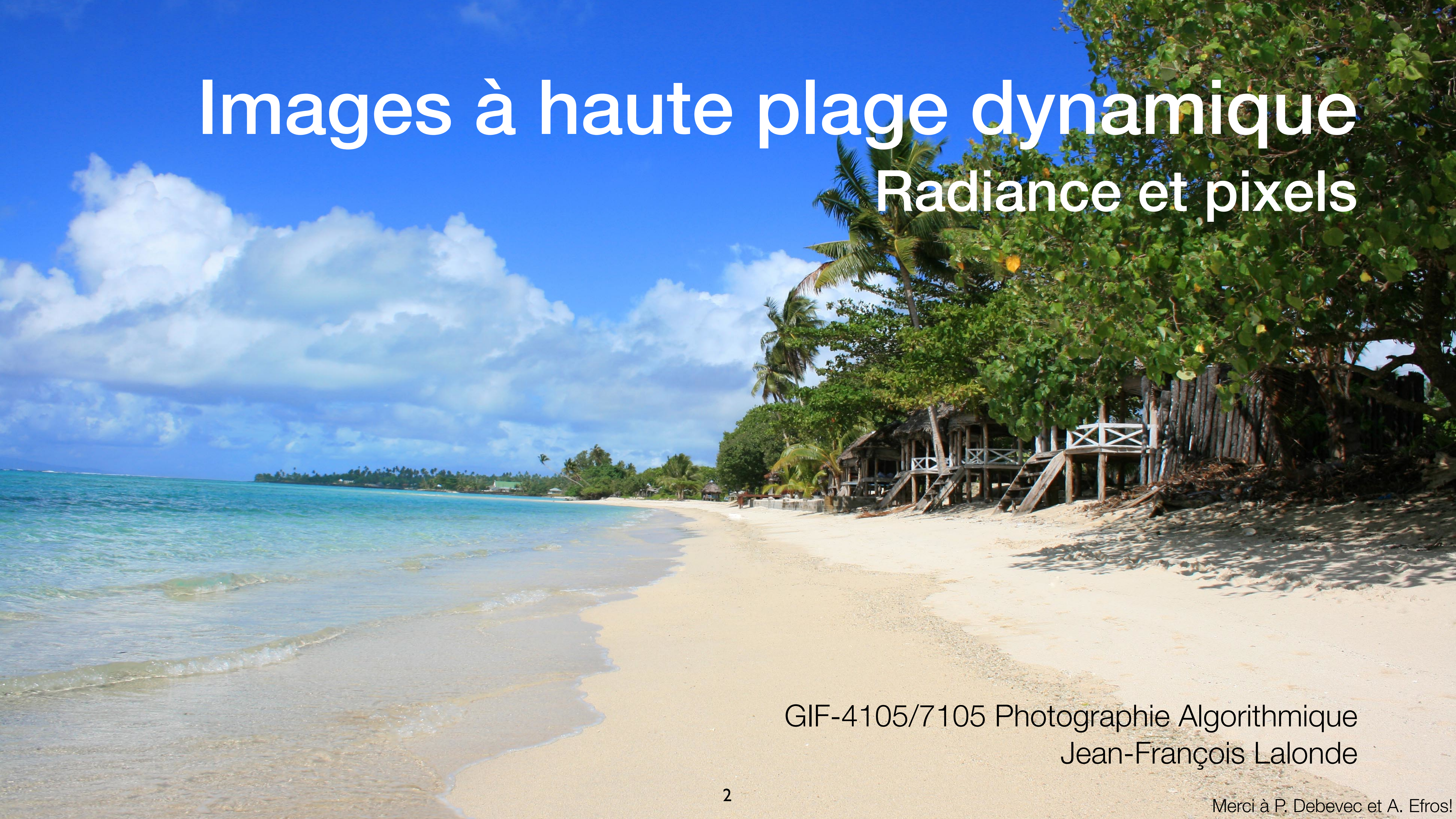
Images à haute plage dynamique



GIF-4105/7105 Photographie Algorithmique
Jean-François Lalonde

Images à haute plage dynamique

Radiance et pixels



GIF-4105/7105 Photographie Algorithmique
Jean-François Lalonde



OU





Plage dynamique

1



Plage dynamique : valeurs de radiance possibles
Le monde possède une (très) haute plage dynamique!

1 500



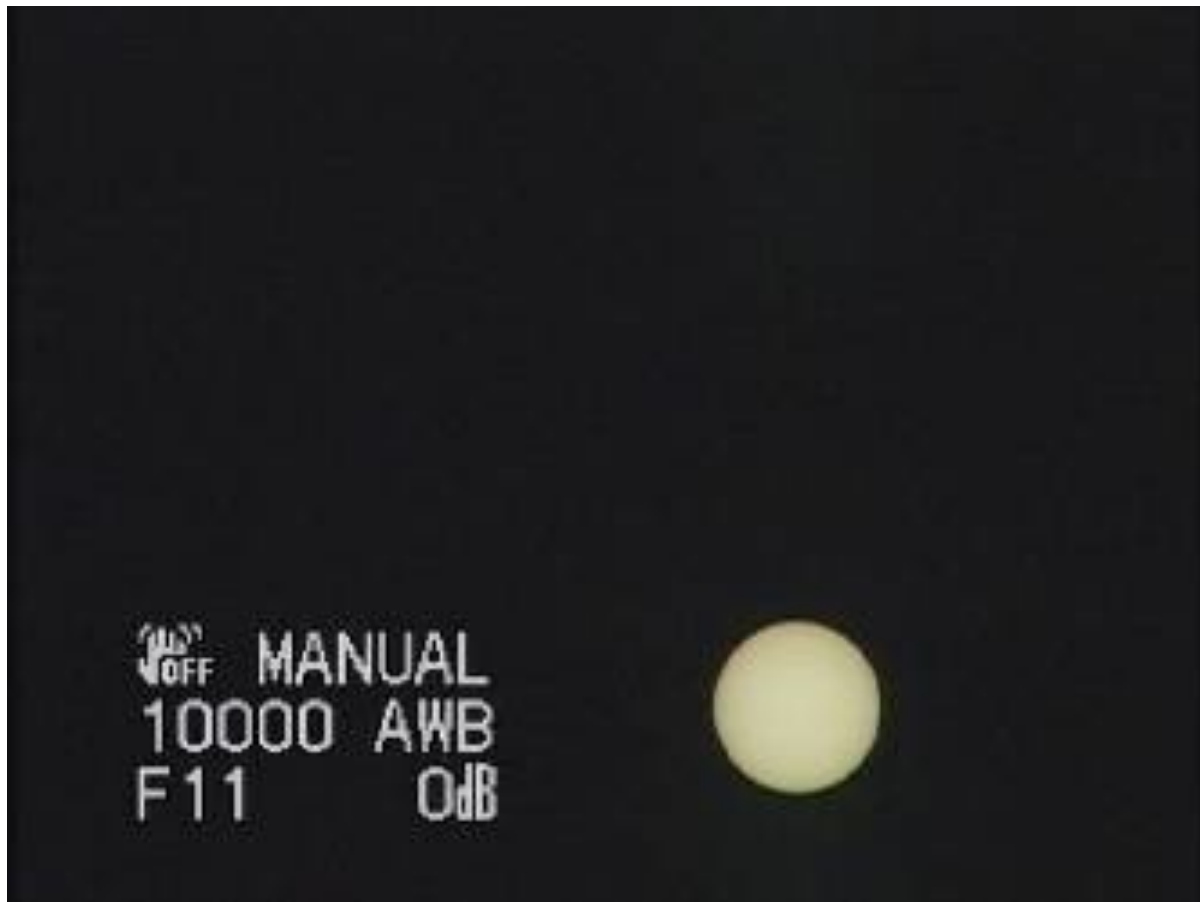
25 000



400 000



2 000 000 000



Et la caméra?

Plage dynamique : valeurs de radiance possibles
Le monde possède une (très) haute plage dynamique!

pixel = 42
42 quoi ? photons ?



Quelques définitions

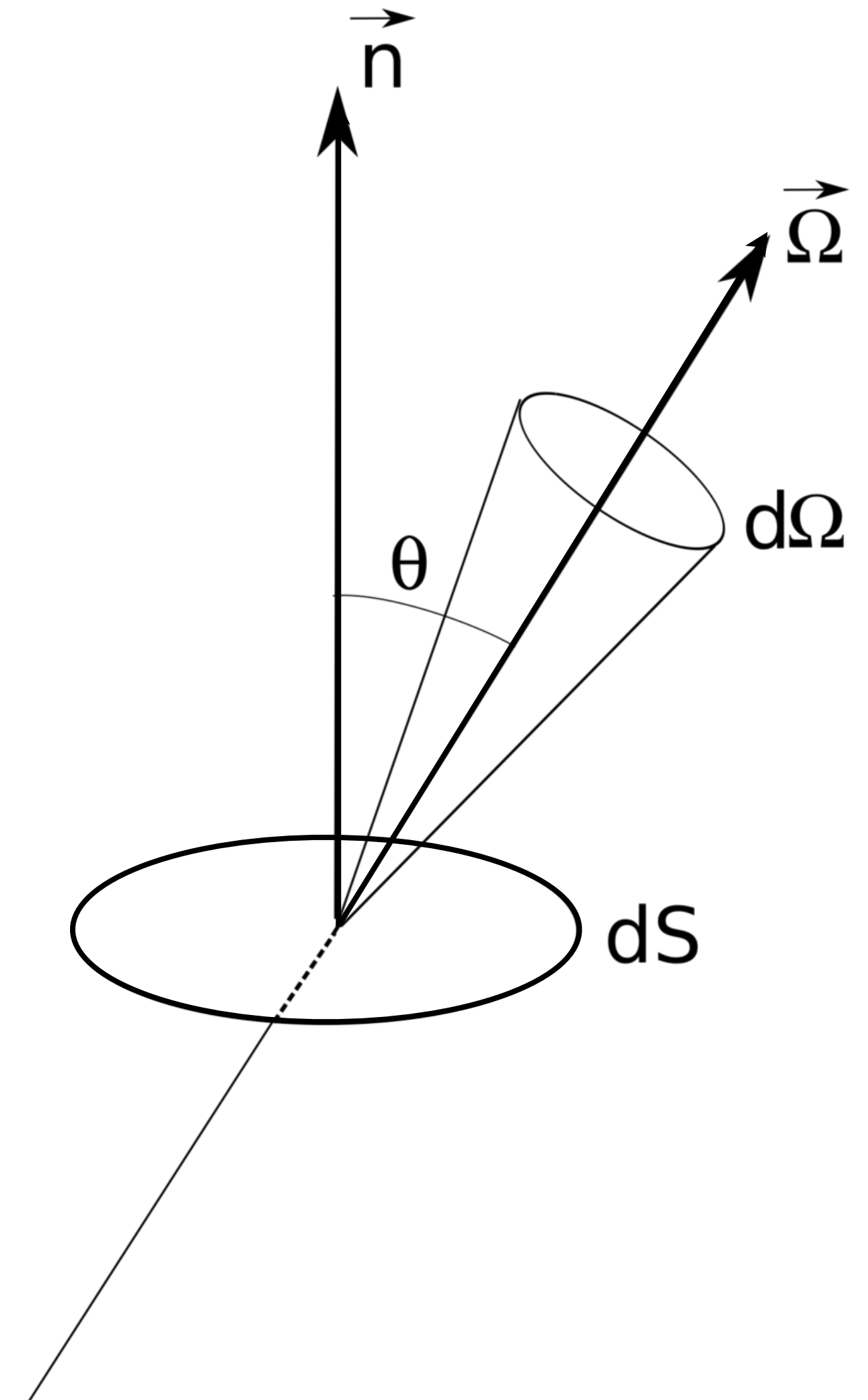
ra·di·ance | 'rādēəns |

Flux énergétique émis, ou reçu, en un point d'une surface, et dans une direction donnée par unité d'angle solide.

Elle s'exprime en $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$.

flux énergétique

puissance d'un rayonnement électromagnétique



Quelques définitions

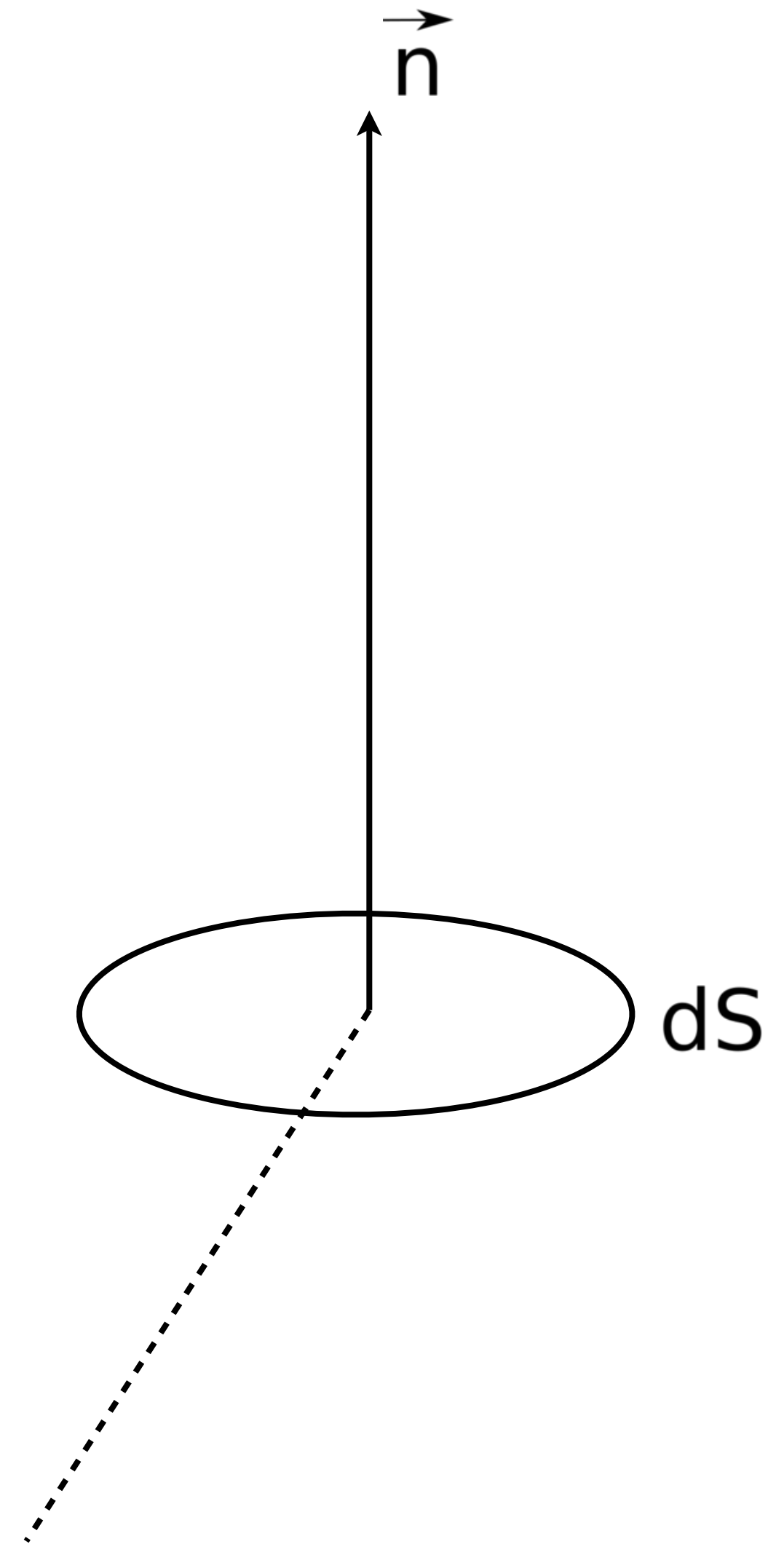
ir·ra·di·ance | i'rādēəns |

Flux énergétique perçue par une surface, par unité d'aire.

Elle s'exprime en W/m^2 .

flux énergétique

puissance d'un rayonnement électromagnétique



Radiance et irradiance

ra·di·ance | 'rādēəns |

Flux énergétique émis, ou reçu, en un point d'une surface, et dans une direction donnée par unité d'angle solide.

Elle s'exprime en $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$.

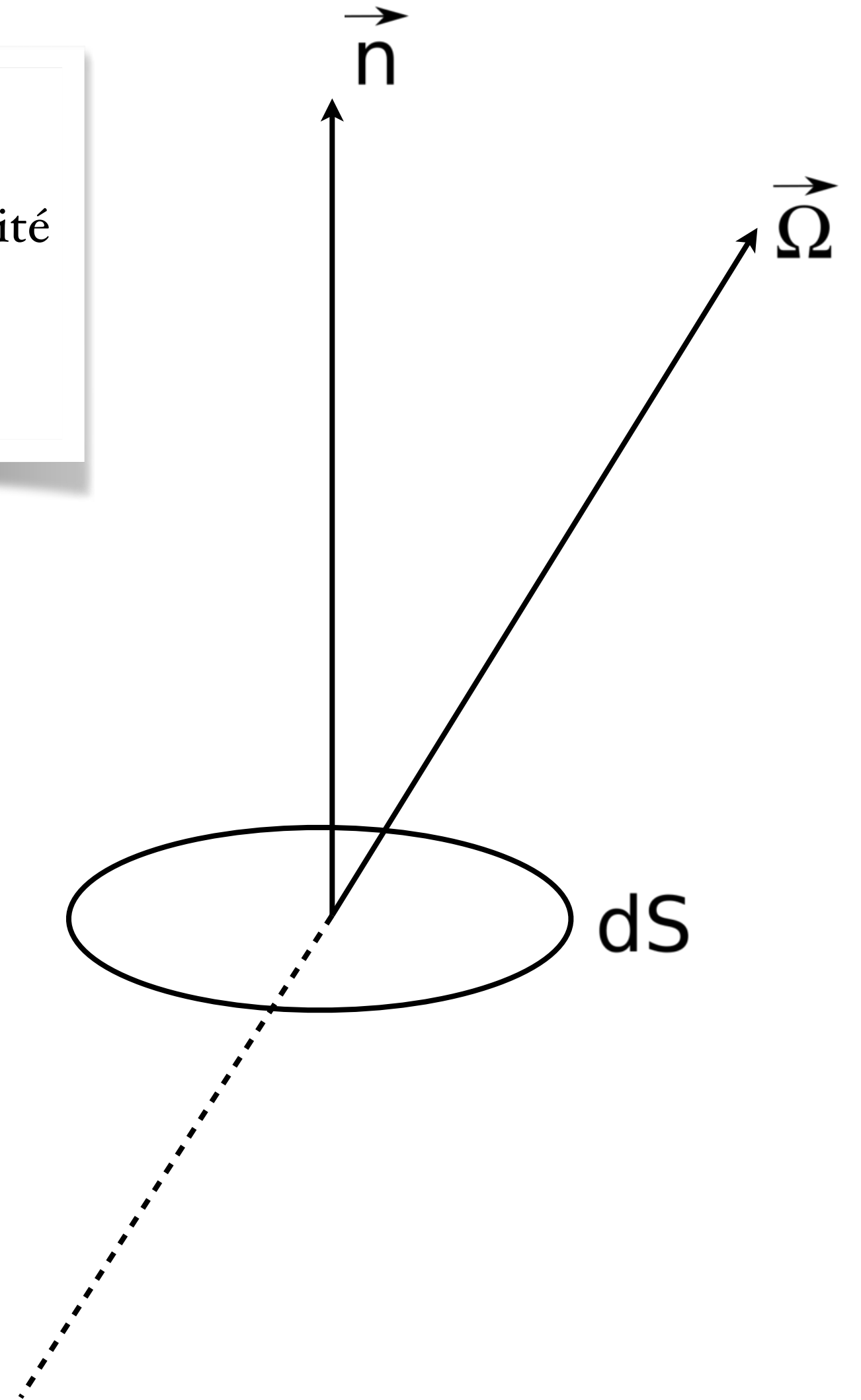
ir·ra·di·ance | i'rādēəns |

Flux énergétique perçue par une surface, par unité d'aire.

Elle s'exprime en W/m^2 .

$$E(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} L(\mathbf{x}, \theta, \phi) \cos \theta d\Omega$$

L'**irradiance** est donc l'intégrale de la **radiance**
(calculée sur un hémisphère)
perçue par une surface.



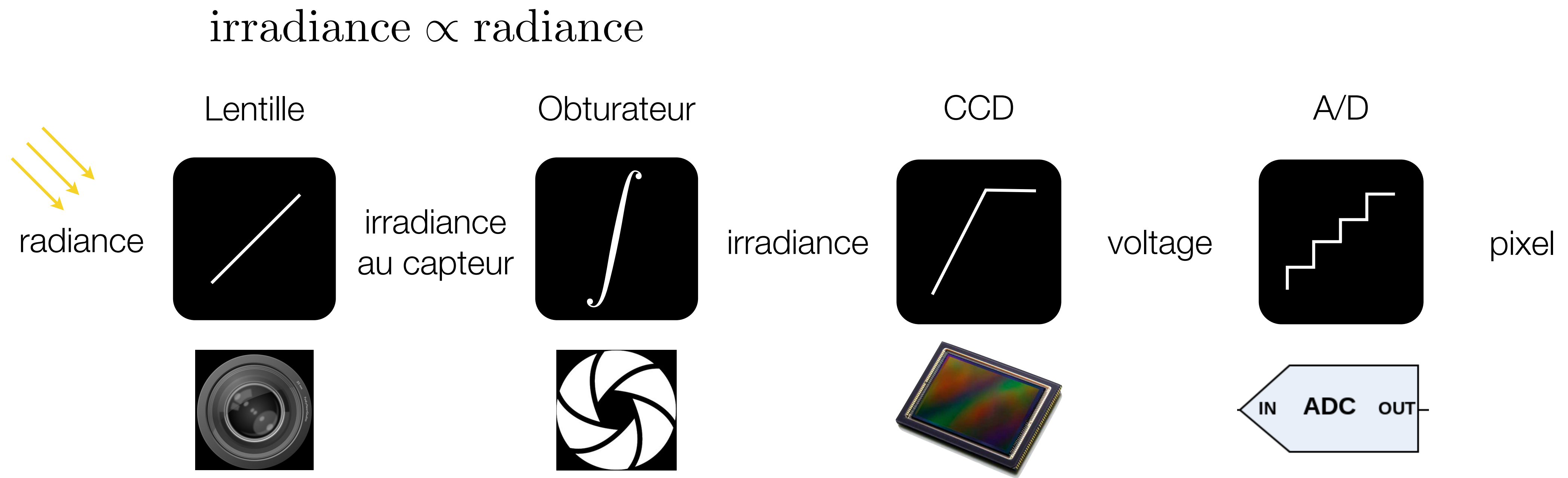
Et la caméra?

Plage dynamique : valeurs de radiance possibles
Le monde possède une (très) haute plage dynamique!

pixel = 42
42 quoi ? photons ? $\text{W/m}^2/\text{sr}$?



Dans une caméra...



Dans une caméra...

irradiance $\propto$ radiance

Lentille

Obturateur

Plus précisément, pour une lentille mince :

$$E = \left(\frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{z} \right)^2 \cos^4 \alpha \right) L$$

E : irradiance au capteur

L : radiance émise

d : diamètre de la lentille

z : profondeur

α : angle à l'axe optique

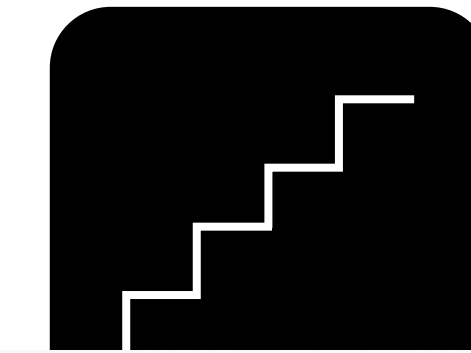
CCD

A/D

ce



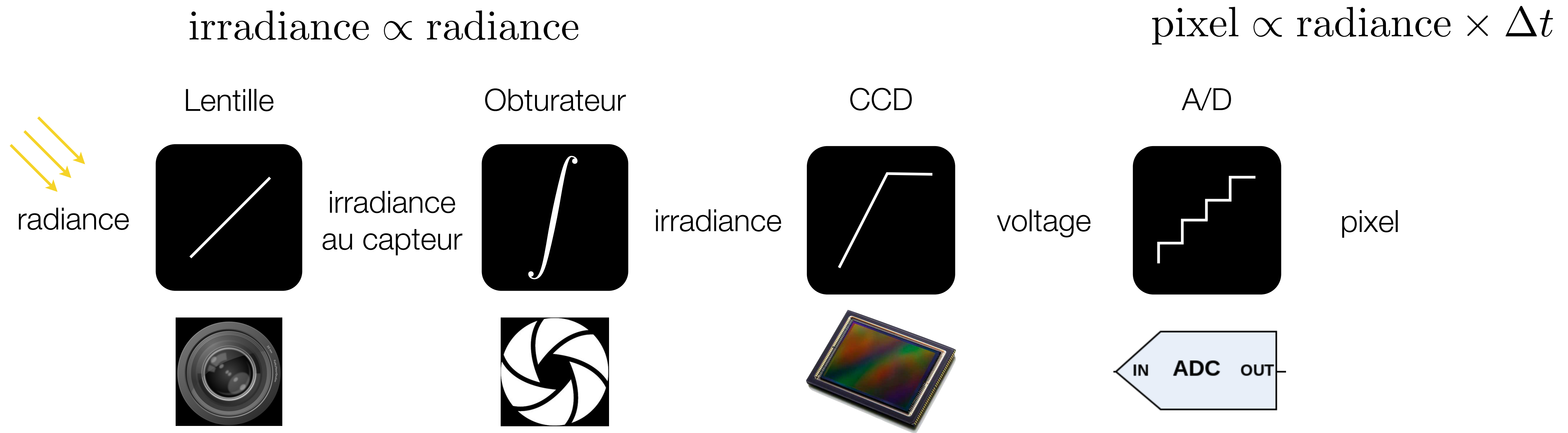
voltage



pixel

La plupart des lentilles « modernes » rendent ce rapport à peu près constant sur le plan du capteur!

Dans une caméra...



Relation entre pixels et radiance

En pratique, les caméras ont également une fonction de réponse non-linéaire...
on y reviendra.

- Pour une caméra « linéaire »

$$\text{pixel} \propto \text{radiance} \times \Delta t$$

- Plus l'exposition (Δt) est longue, plus l'image est claire
- Ou encore

$$\text{radiance} \propto \frac{\text{pixel}}{\Delta t}$$

Images à haute plage dynamique

Capturer la radiance



GIF-4105/7105 Photographie Algorithmique
Jean-François Lalonde

Relation entre pixels et radiance

En pratique, les caméras ont également une fonction de réponse non-linéaire...
on y reviendra.

- Pour une caméra « linéaire »

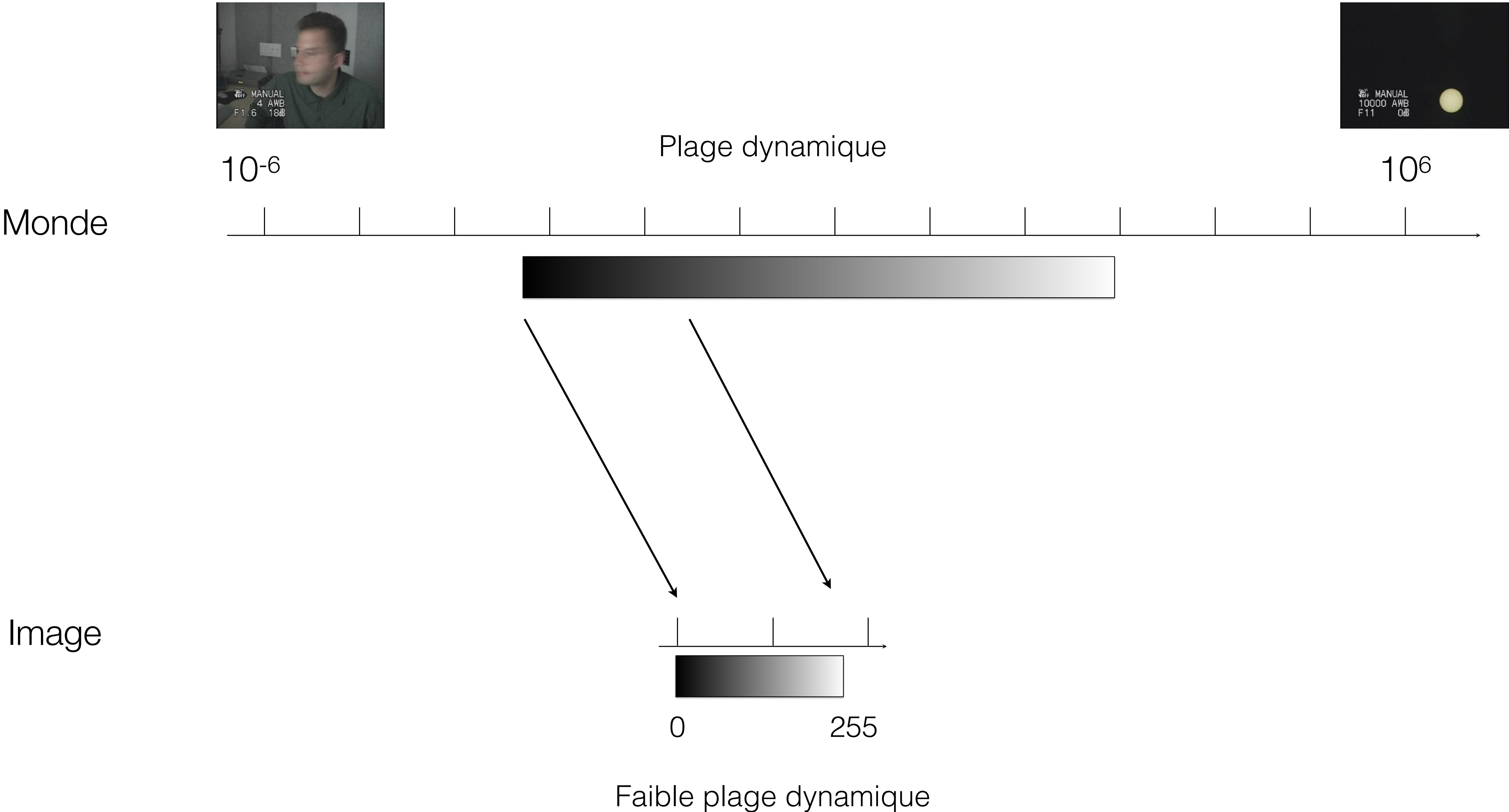
$$\text{pixel} \propto \text{radiance} \times \Delta t$$

- Plus l'exposition (Δt) est longue, plus l'image est claire
- Ou encore

$$\text{radiance} \propto \frac{\text{pixel}}{\Delta t}$$

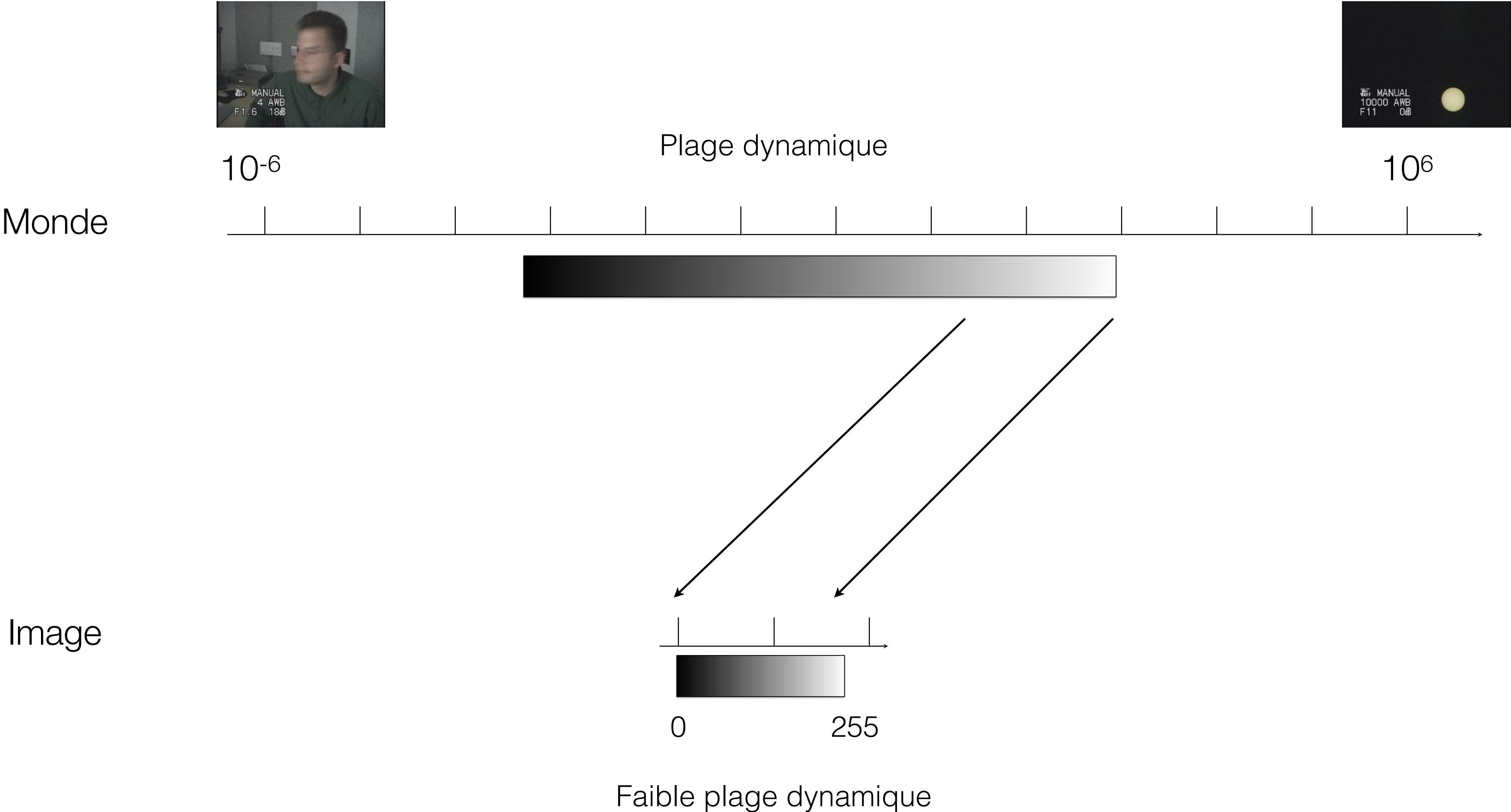
Exposition longue

$\text{radiance} \propto \frac{\text{pixel}}{\Delta t}$



Exposition courte

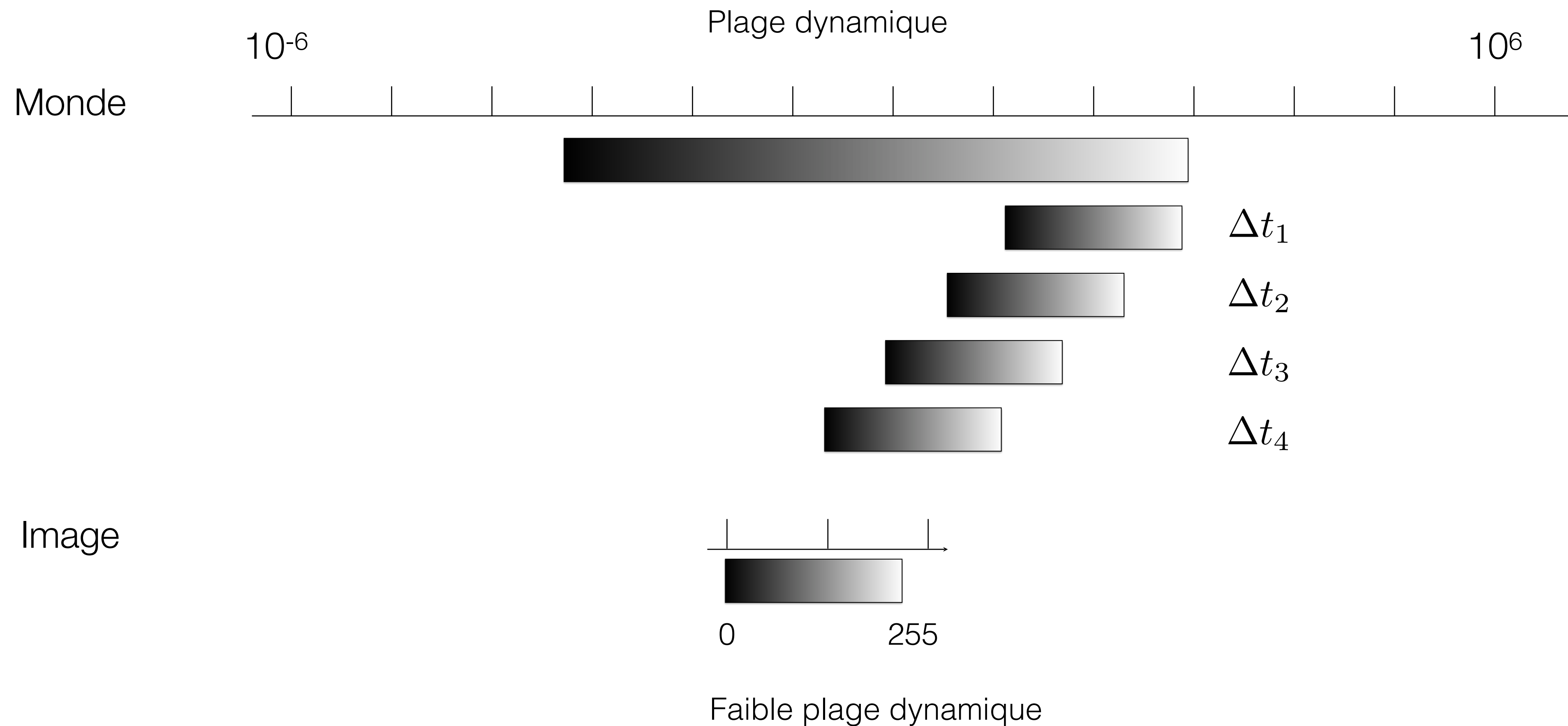
$\text{radiance} \propto \frac{\text{pixel}}{\Delta t}$



Radiance à partir des pixels?

$$\text{radiance} \propto \frac{\text{pixel}}{\Delta t}$$

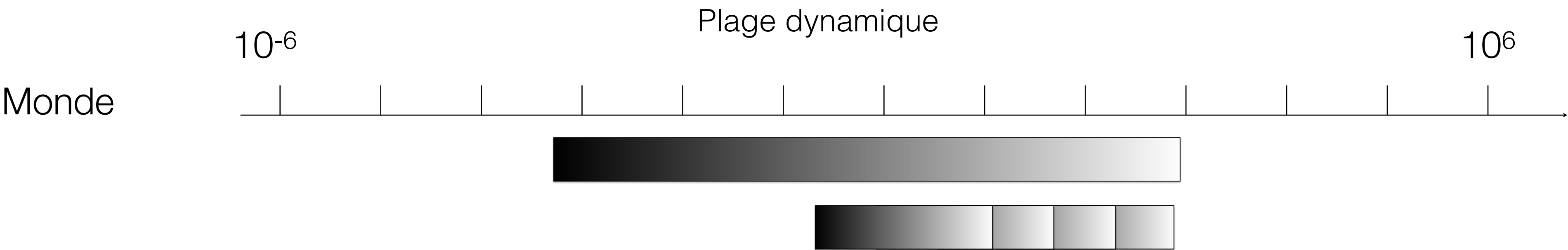
Capturer plusieurs expositions!



Radiance à partir des pixels?

$$\text{radiance} \propto \frac{\text{pixel}}{\Delta t}$$

Capturer plusieurs expositions!



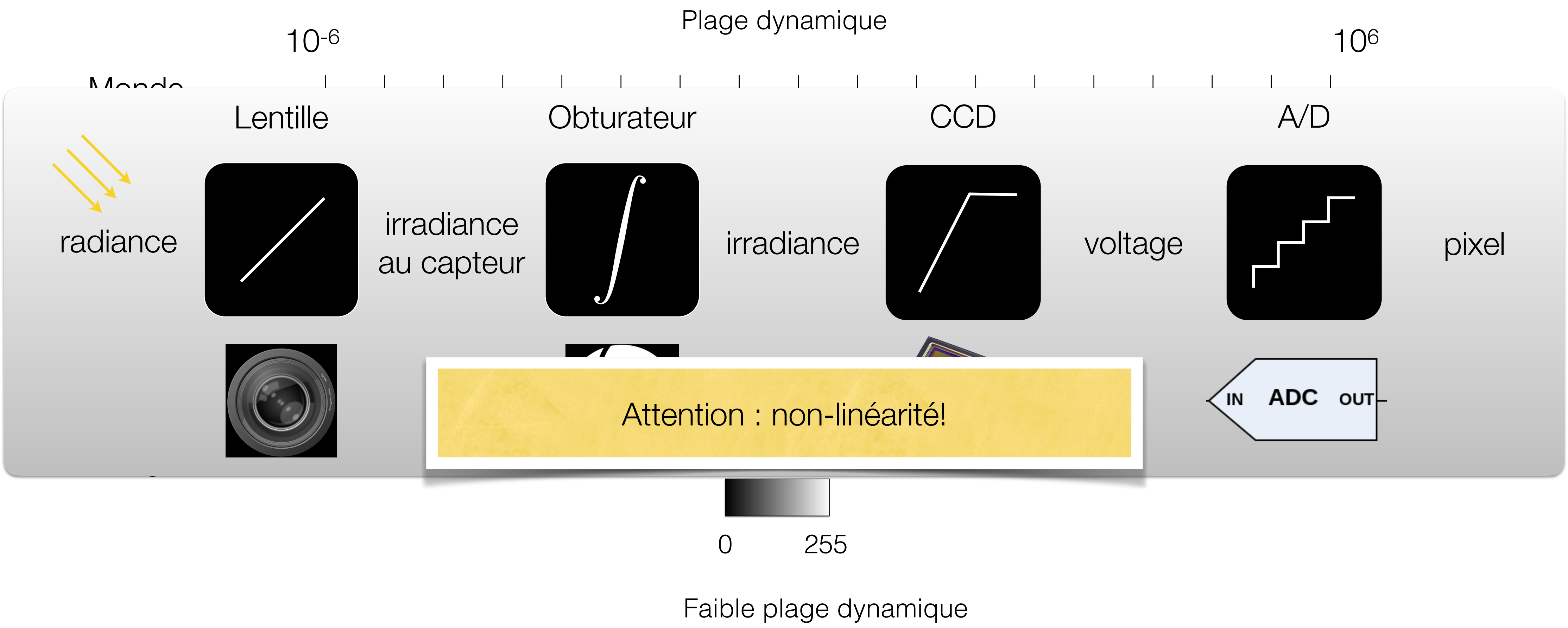
$$I_{\text{radiance}} = \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{\Delta t_i}$$



Faible plage dynamique

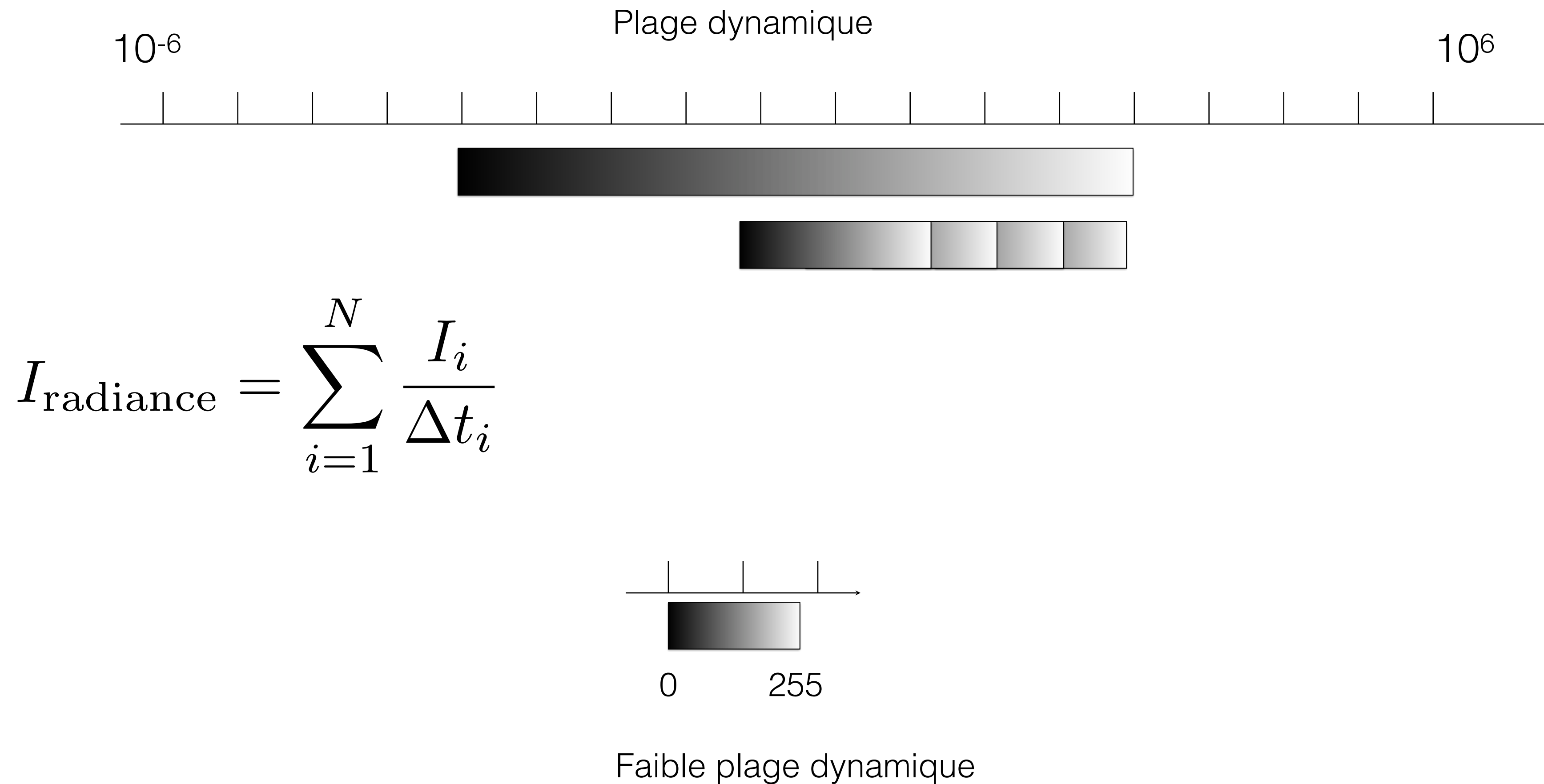
Radiance à partir des pixels?

$$\text{radiance} \propto \frac{\text{pixel}}{\Delta t}$$



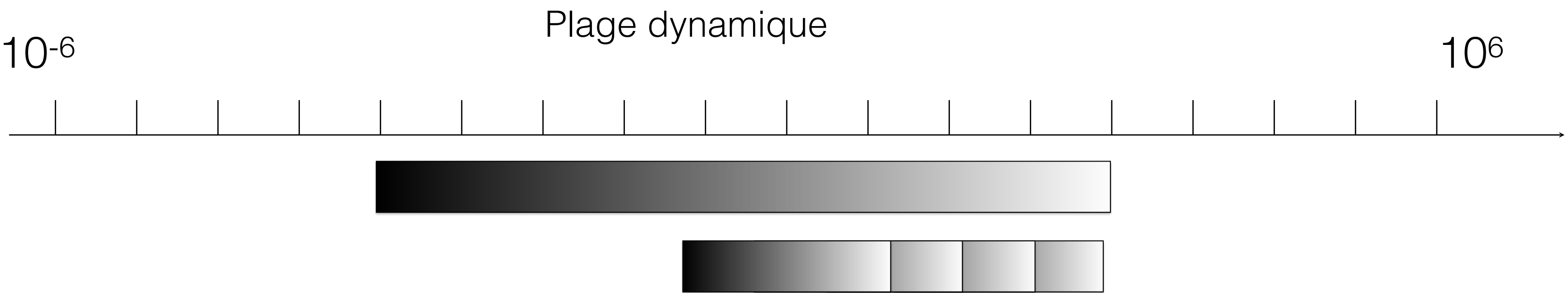
Radiance à partir des pixels?

$$\text{radiance} \propto \frac{\text{pixel}}{\Delta t}$$

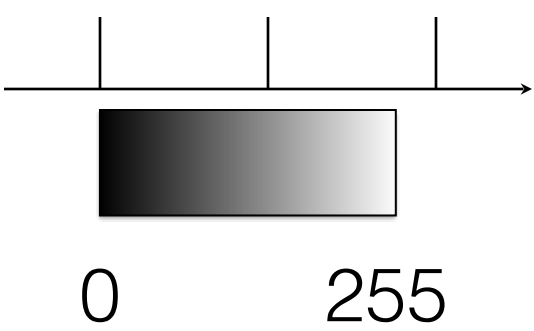
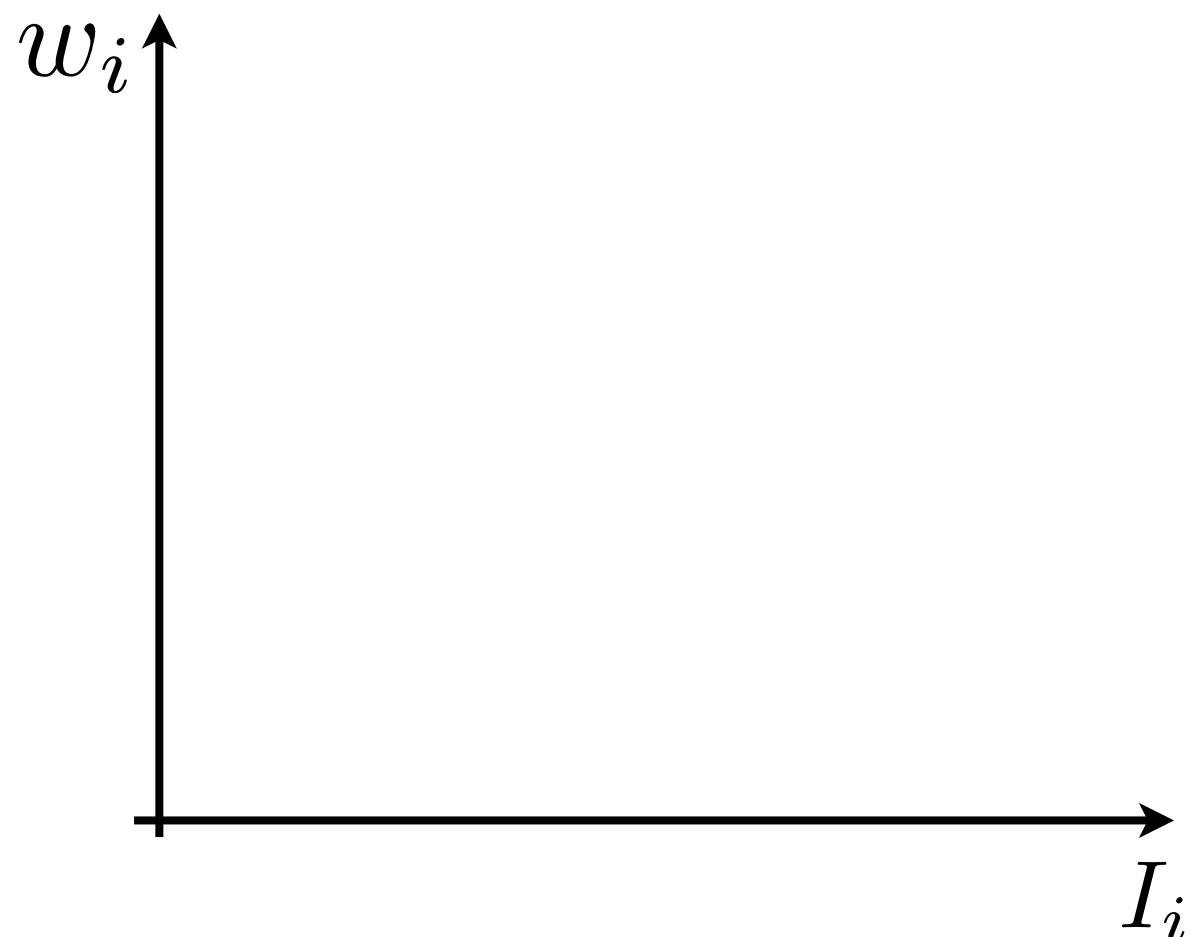


Radiance à partir des pixels?

$$\text{radiance} \propto \frac{\text{pixel}}{\Delta t}$$



$$I_{\text{radiance}} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \frac{I_i}{\Delta t_i}}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

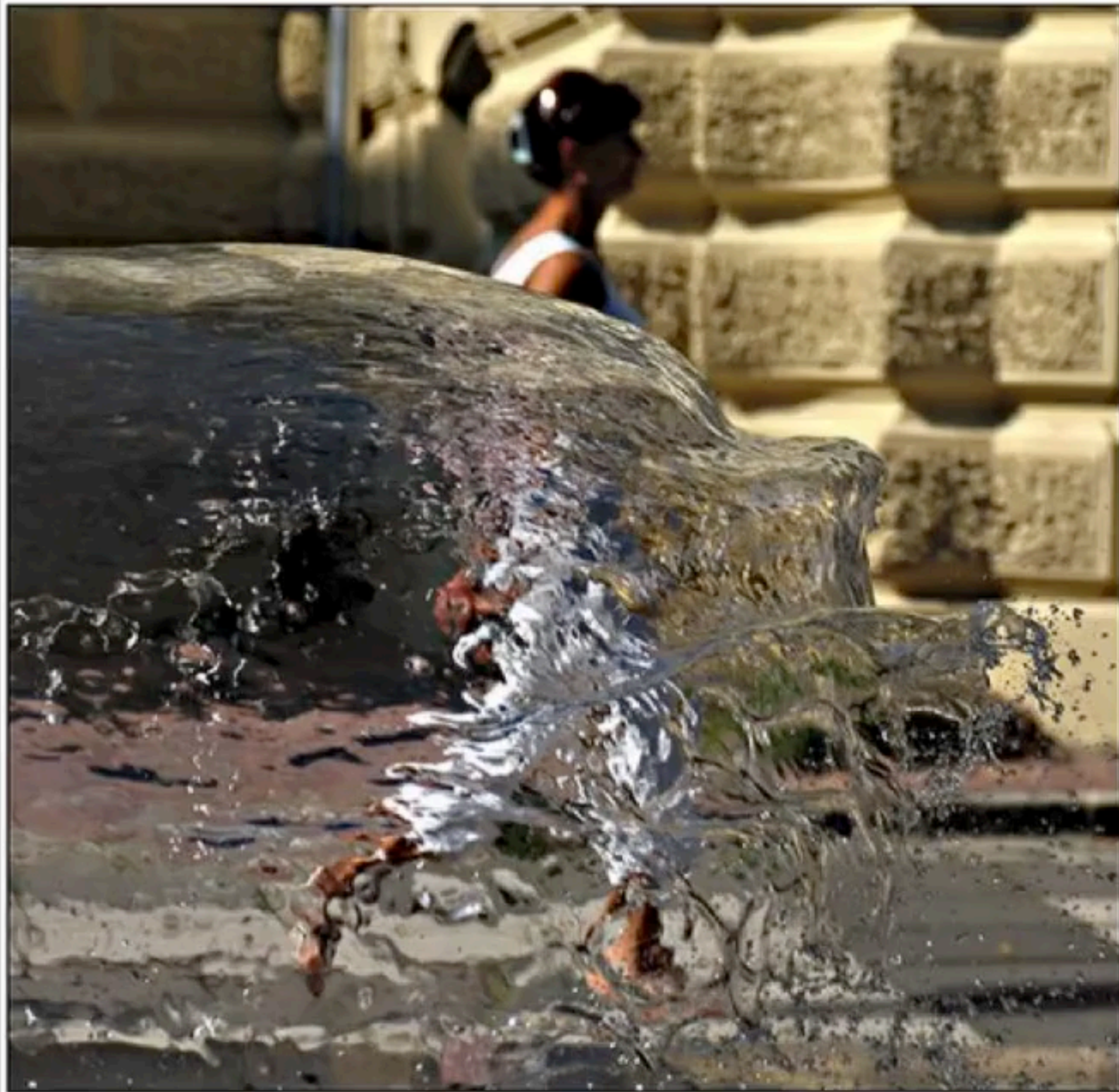


Faible plage dynamique

Comment varier l'exposition?

Rappel!

La caméra Exposition



(c) Tomasz Pluciennik

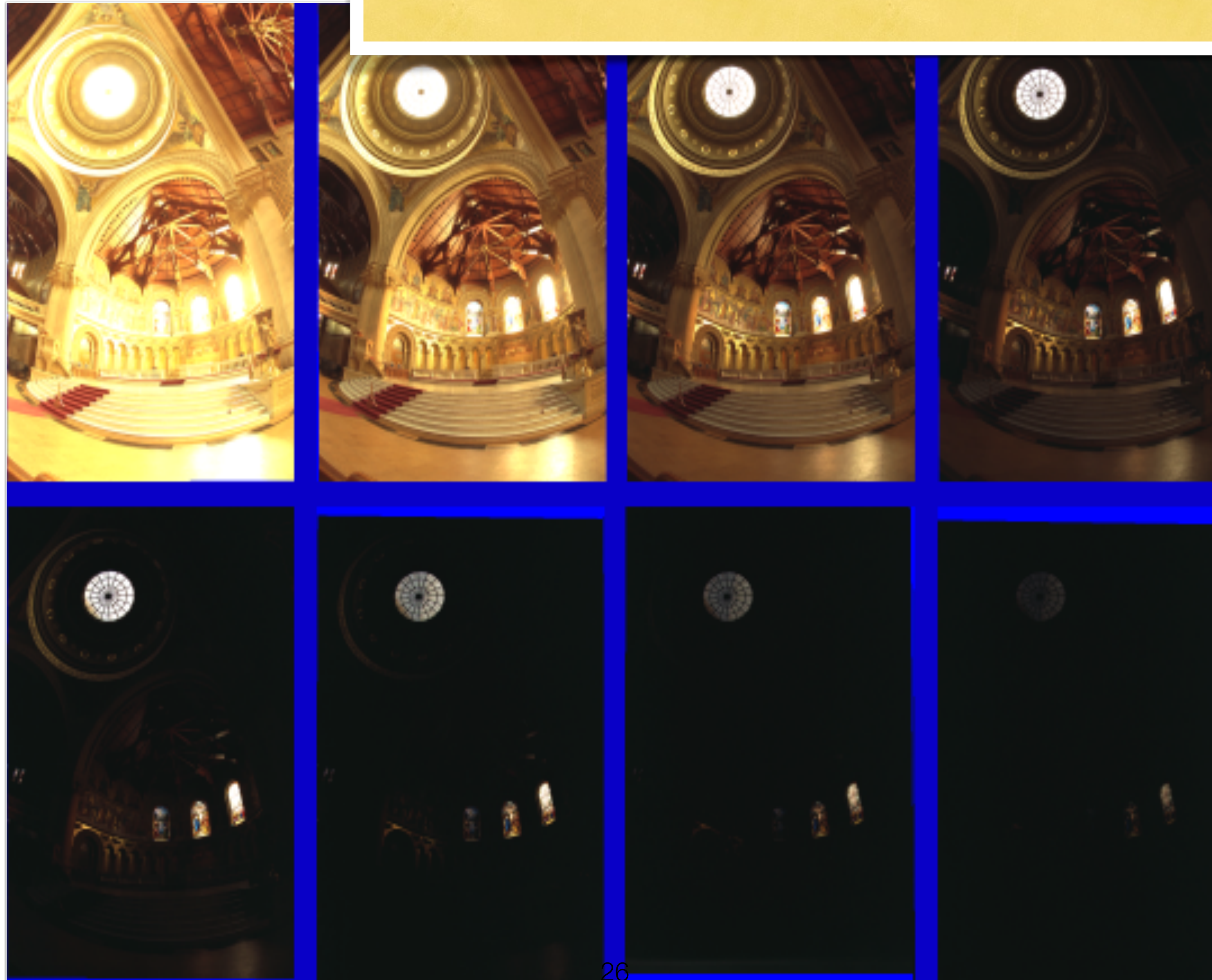
GIF-4105/7105 Photographie Algorithmique
Jean-François Lalonde

Varier l'exposition

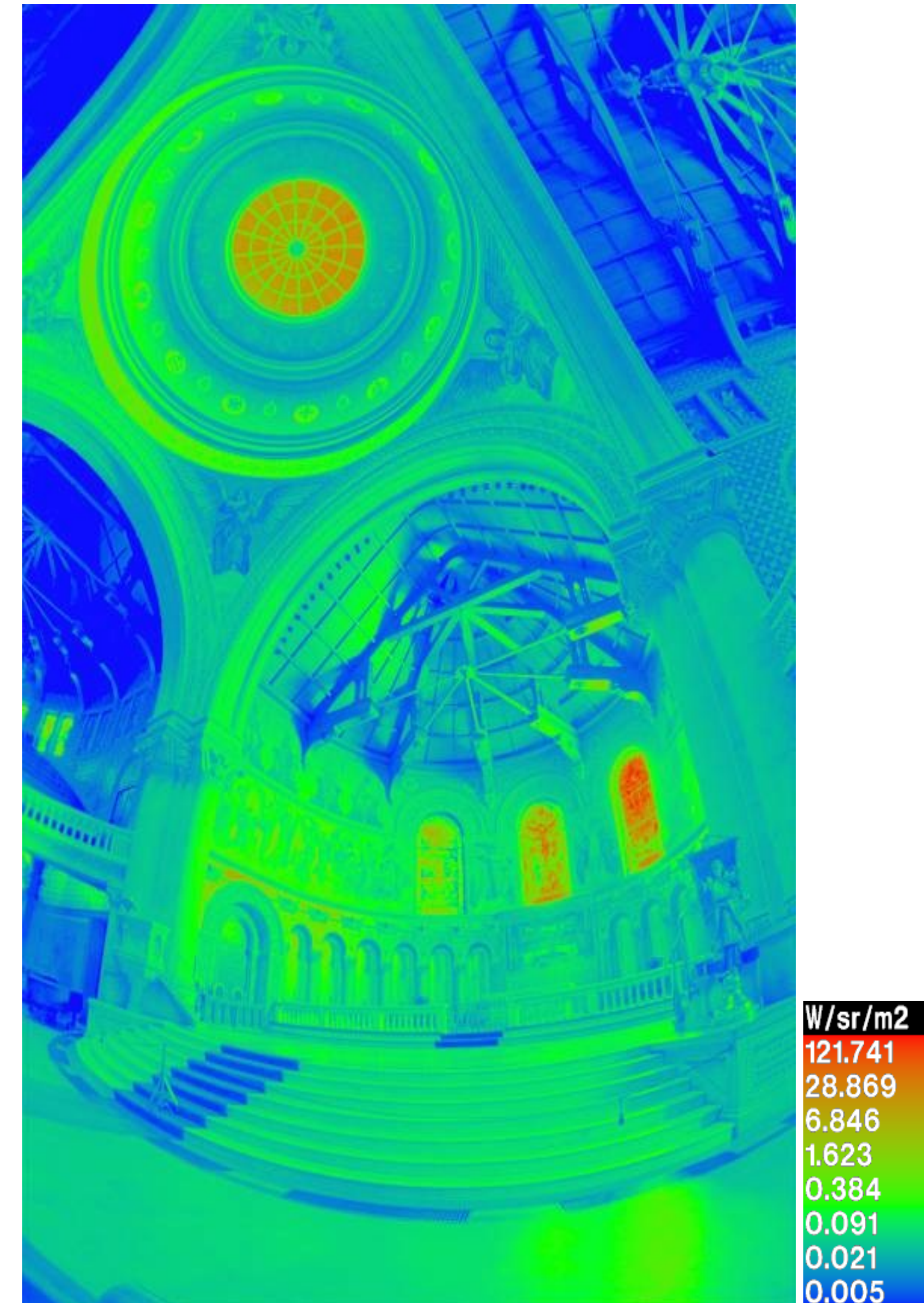
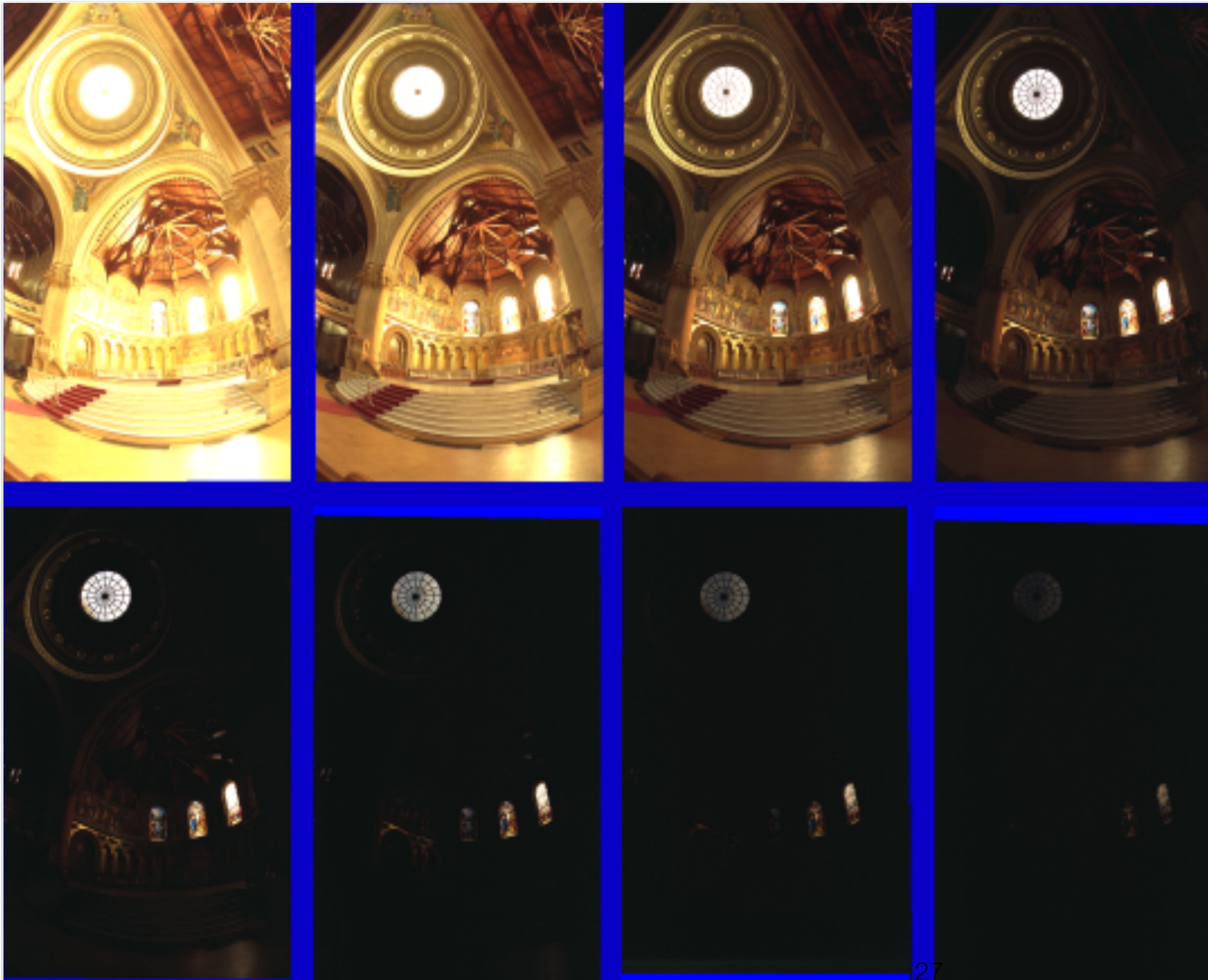
- 3 choix :
 1. Vitesse de l'obturateur (*shutter speed*)
 2. Ouverture (*f-number*)
 3. ISO

Images à plusieurs

Habituellement, on diminue la lumière d'un facteur 2
ex: $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{15}$, $\frac{1}{30}$, $\frac{1}{60}$, $\frac{1}{125}$, $\frac{1}{250}$, $\frac{1}{500}$, $\frac{1}{1000}$ s

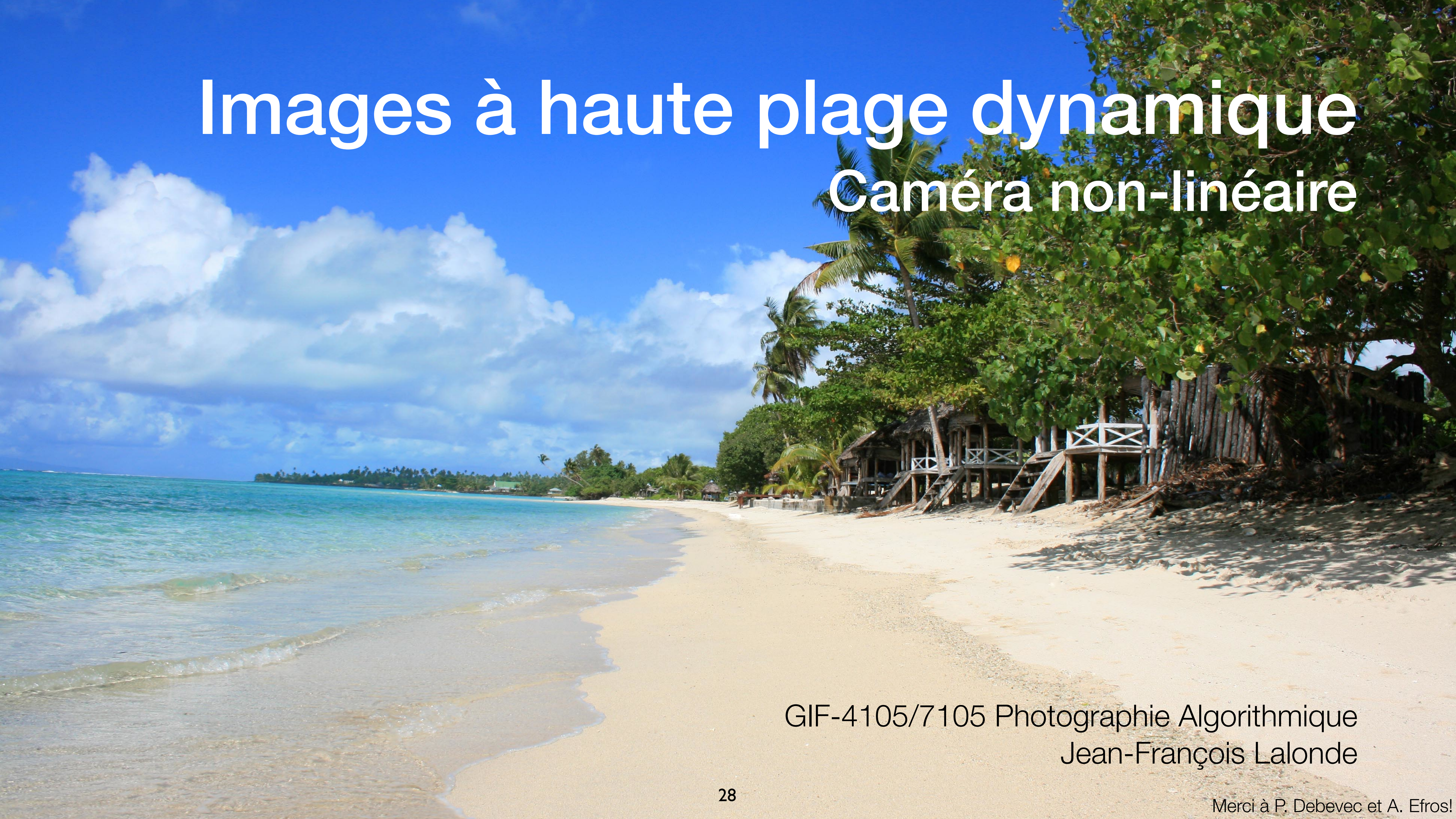


Images à plusieurs expositions



Images à haute plage dynamique

Caméra non-linéaire



GIF-4105/7105 Photographie Algorithmique
Jean-François Lalonde

Relation entre pixels et radiance

- Pour une caméra « linéaire »

$$\text{pixel} \propto \text{radiance} \times \Delta t$$

- Plus l'exposition (Δt) est longue, plus l'image est claire
- Ou encore

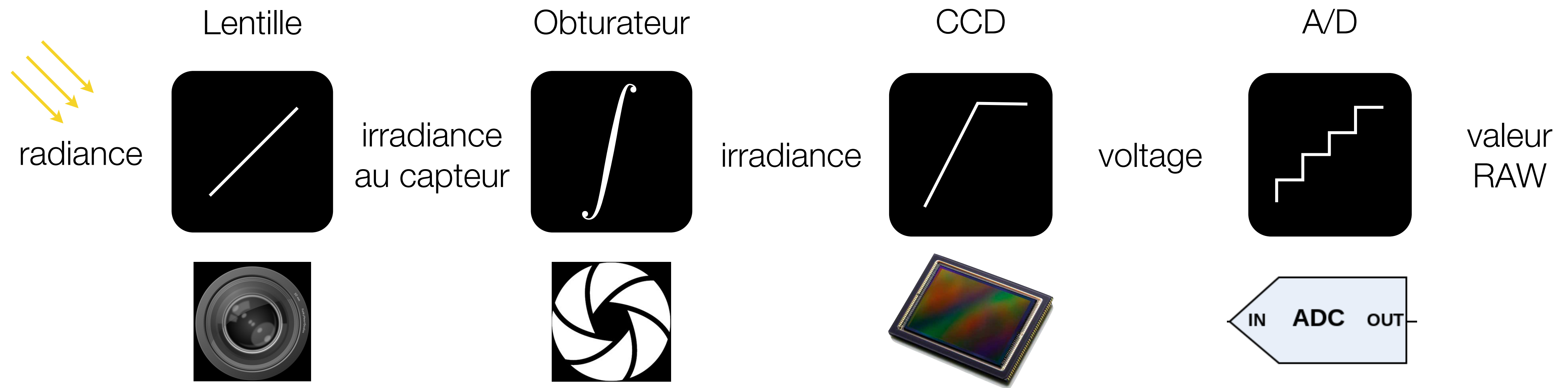
$$\text{radiance} \propto \frac{\text{pixel}}{\Delta t}$$

En pratique, les caméras ont également une fonction de réponse non-linéaire...
on y reviendra.

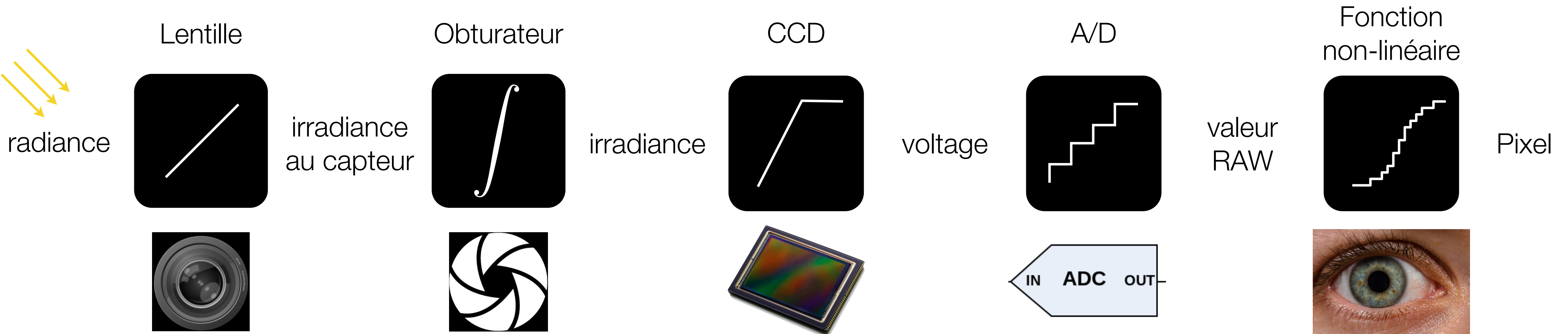
On y revient maintenant!

Dans une caméra...

Rappel!



Dans une caméra...



Dans une caméra...

Pourquoi la fonction non-linéaire?

Laquelle de ces deux images illustre une augmentation **constante** d'intensité?

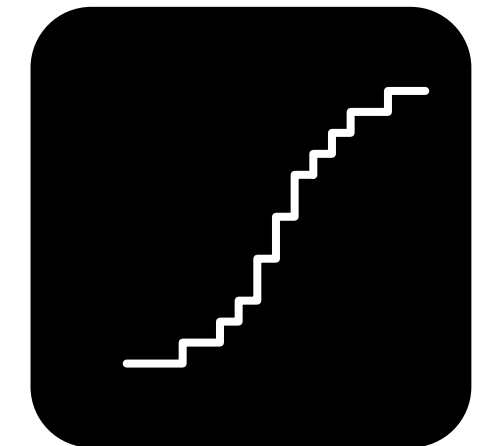
a)



b)



Fonction
non-linéaire



Pixel



Dans une caméra...

Pourquoi la fonction non-linéaire?

Laquelle de ces deux images illustre une augmentation **constante** d'intensité?

Augmentation constante d'intensité **émise**

a)

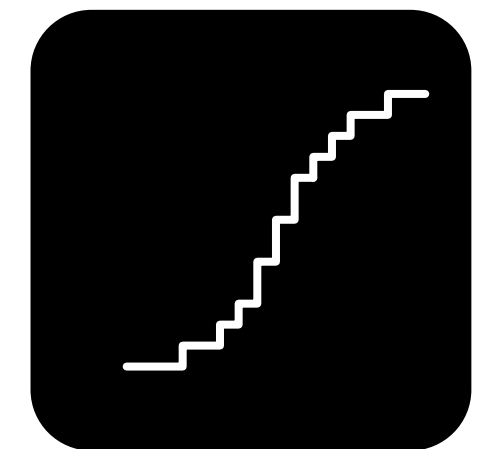


Augmentation constante d'intensité **perçue**

b)



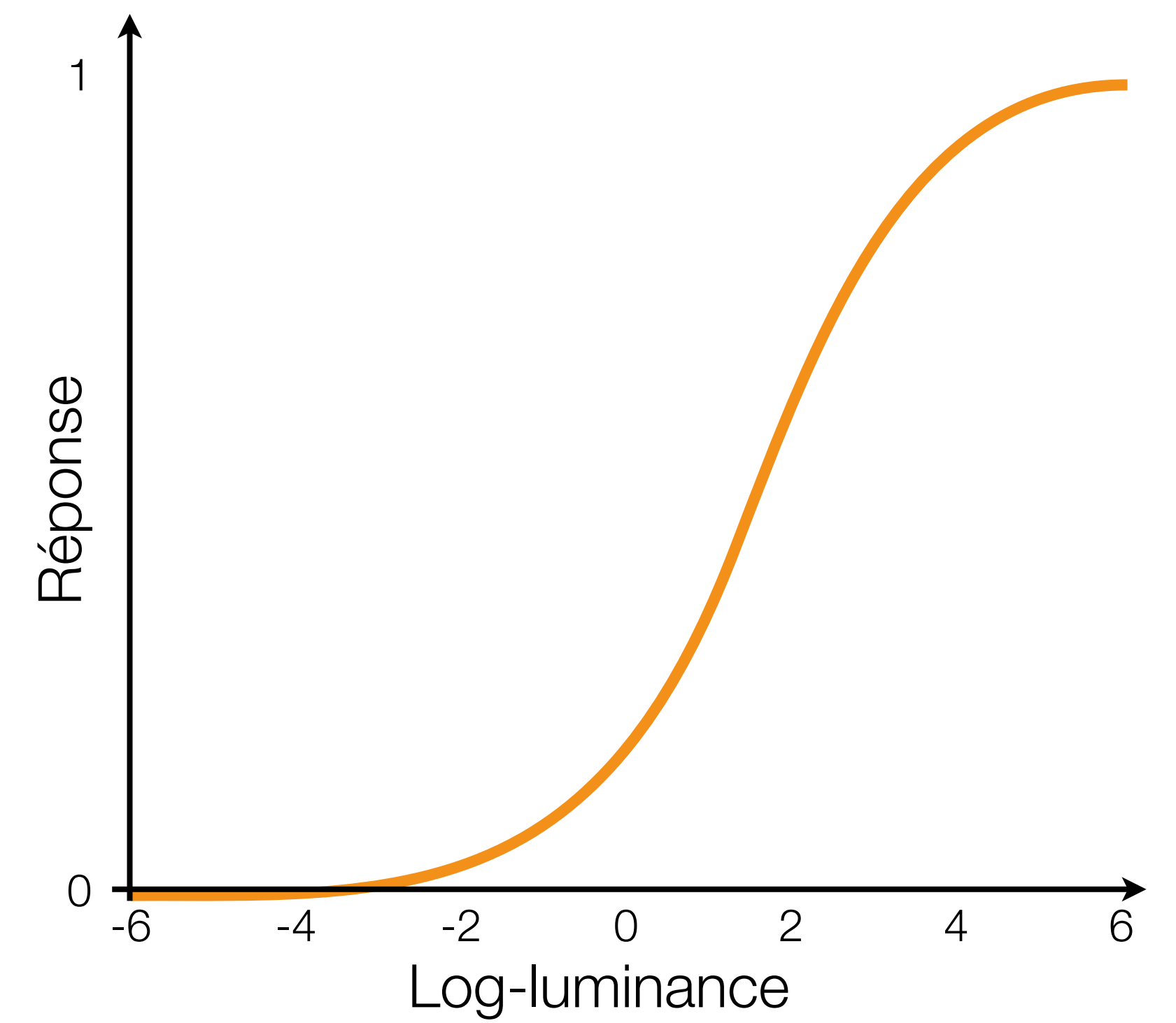
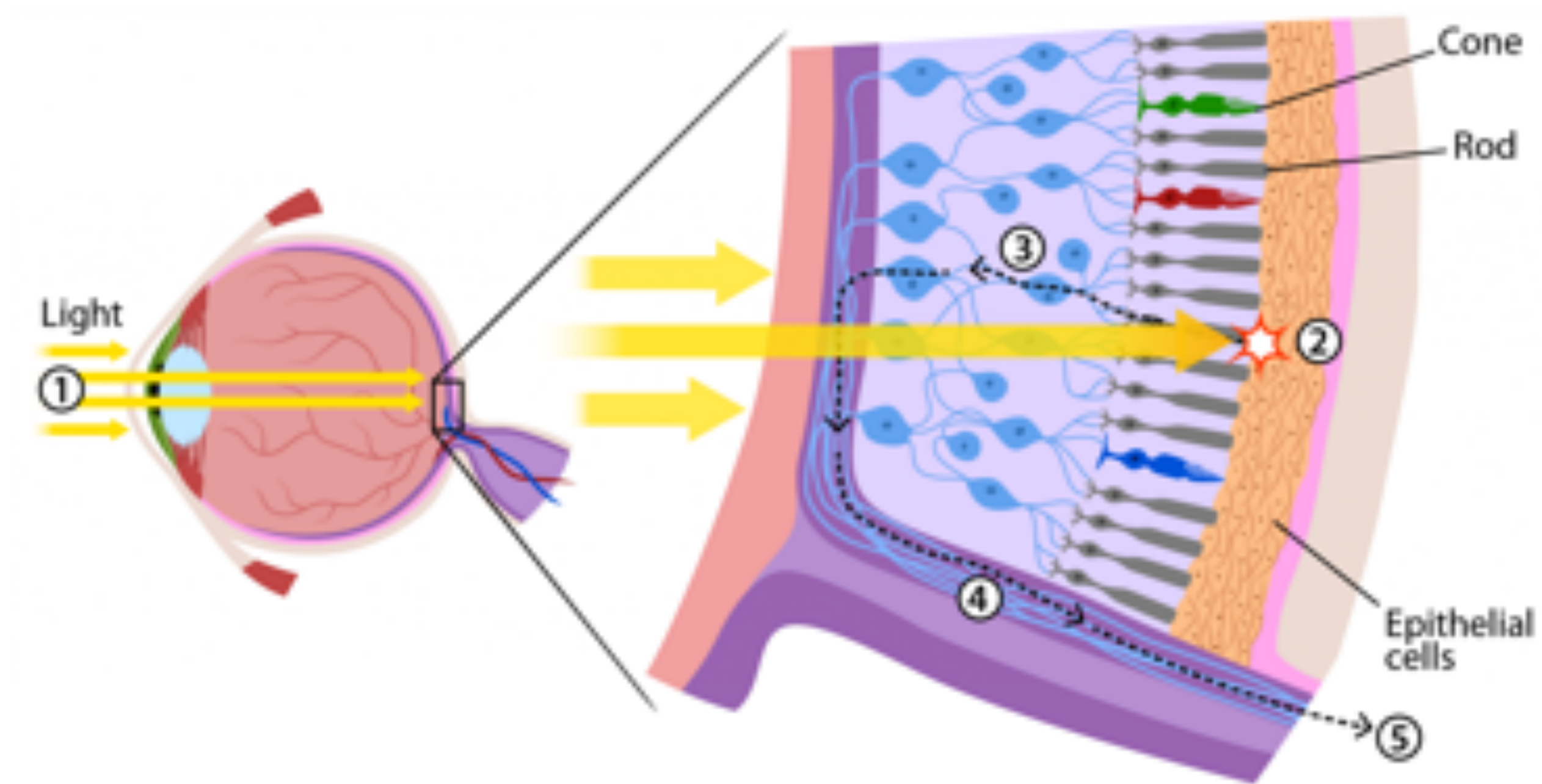
Fonction
non-linéaire



Pixel



Systeme visuel humain

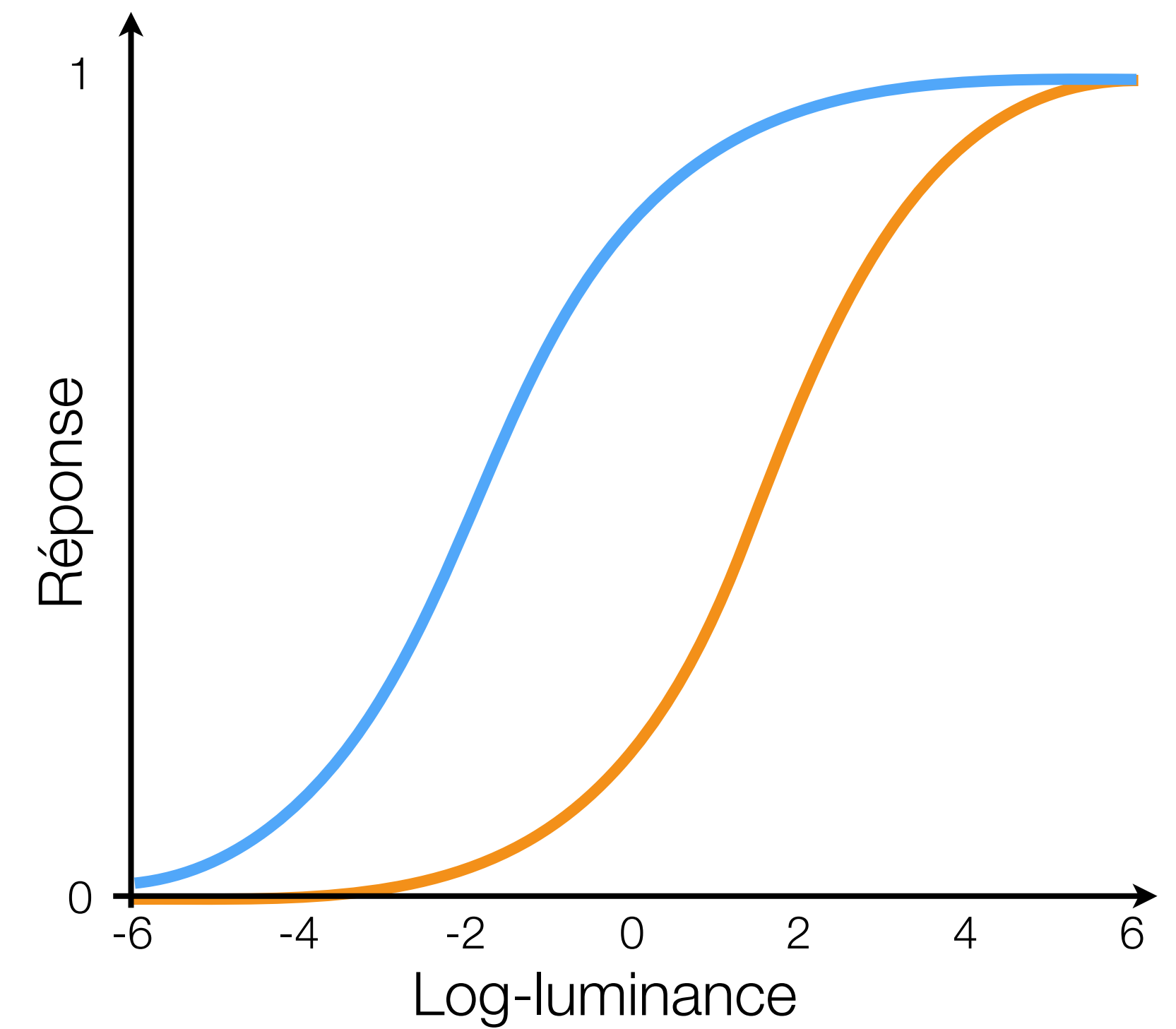


Adaptation : l'oeil n'est pas un photomètre!

Phares allumés, nuit



Phares allumés, jour



Images à haute plage dynamique

Calibrage radiométrique manuel



GIF-4105/7105 Photographie Algorithmique
Jean-François Lalonde

Calibrage

- Géométrie
 - Relation entre les coordonnées en pixel et les points dans le monde
- Photométrie
 - Relation entre les valeurs d'intensité des pixels et la radiance du monde

Dans une caméra...

Rappel!

Pourquoi la fonction non-linéaire?

Laquelle de ces deux images illustre une augmentation **constante** d'intensité?

Augmentation constante d'intensité **émise**

a)

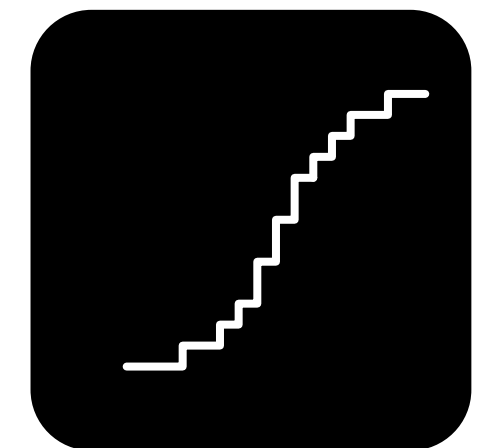


Augmentation constante d'intensité **perçue**

b)



Fonction non-linéaire



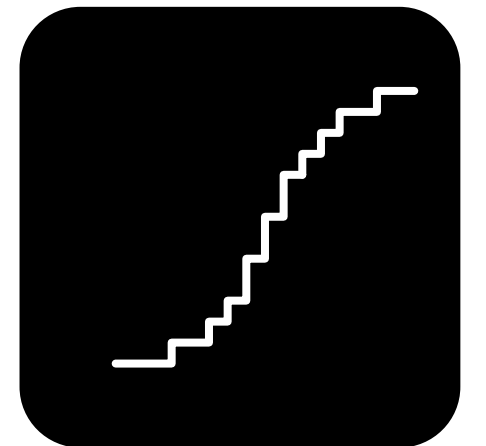
Pixel



Dans une caméra...

- Comment estimer cette fonction?
- Première option : utiliser une cible de calibrage radiométrique

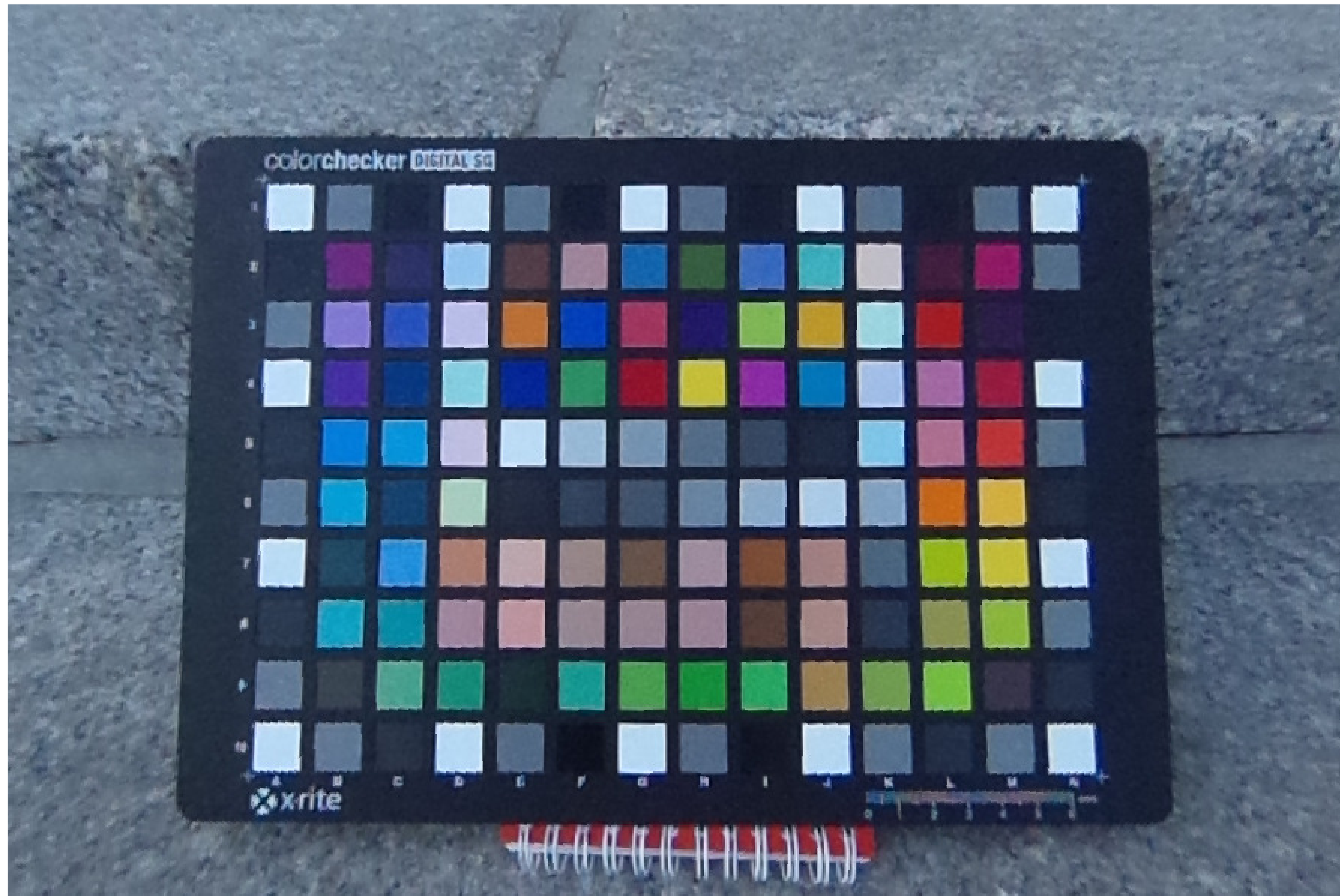
Fonction
non-linéaire



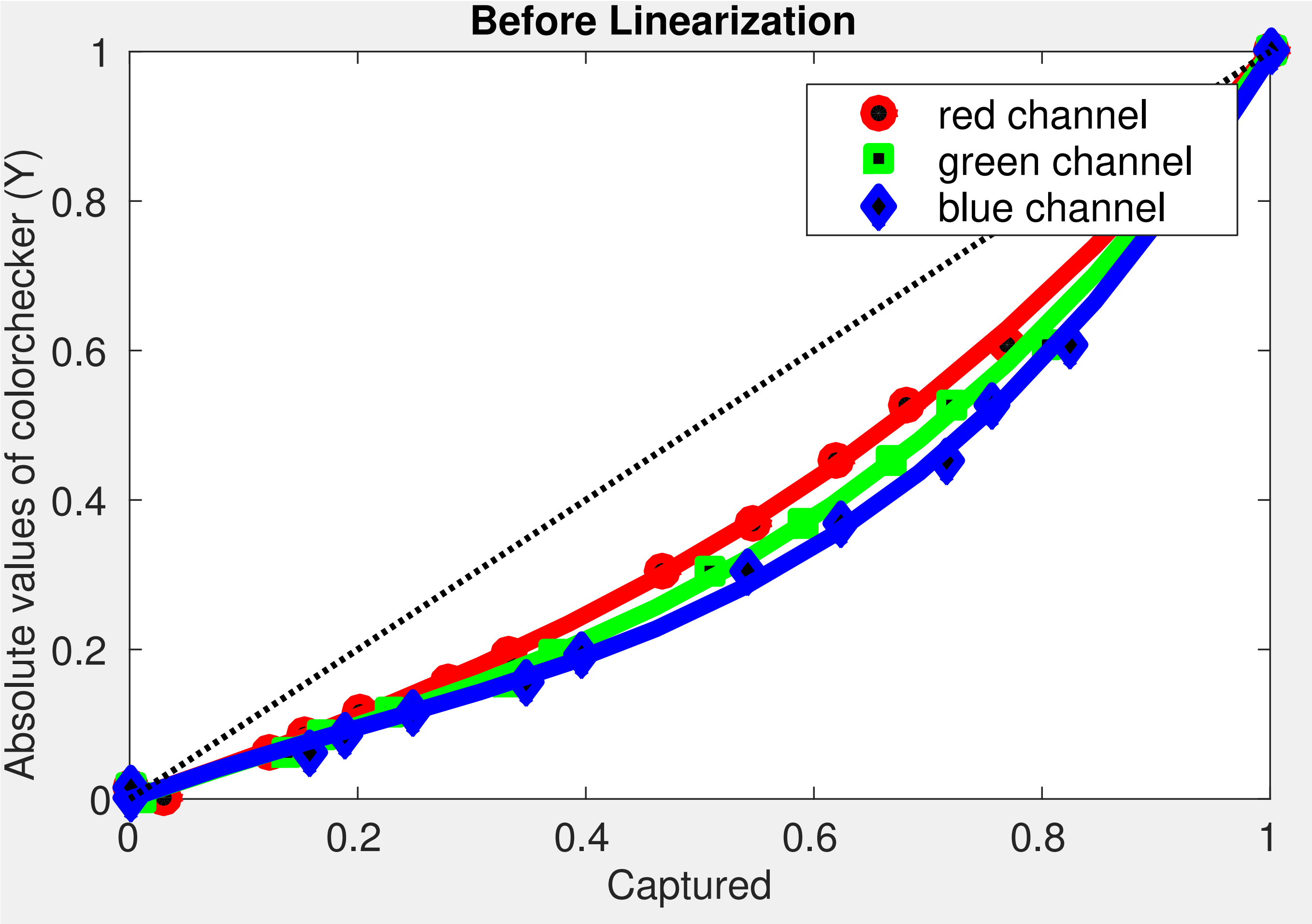
Pixel



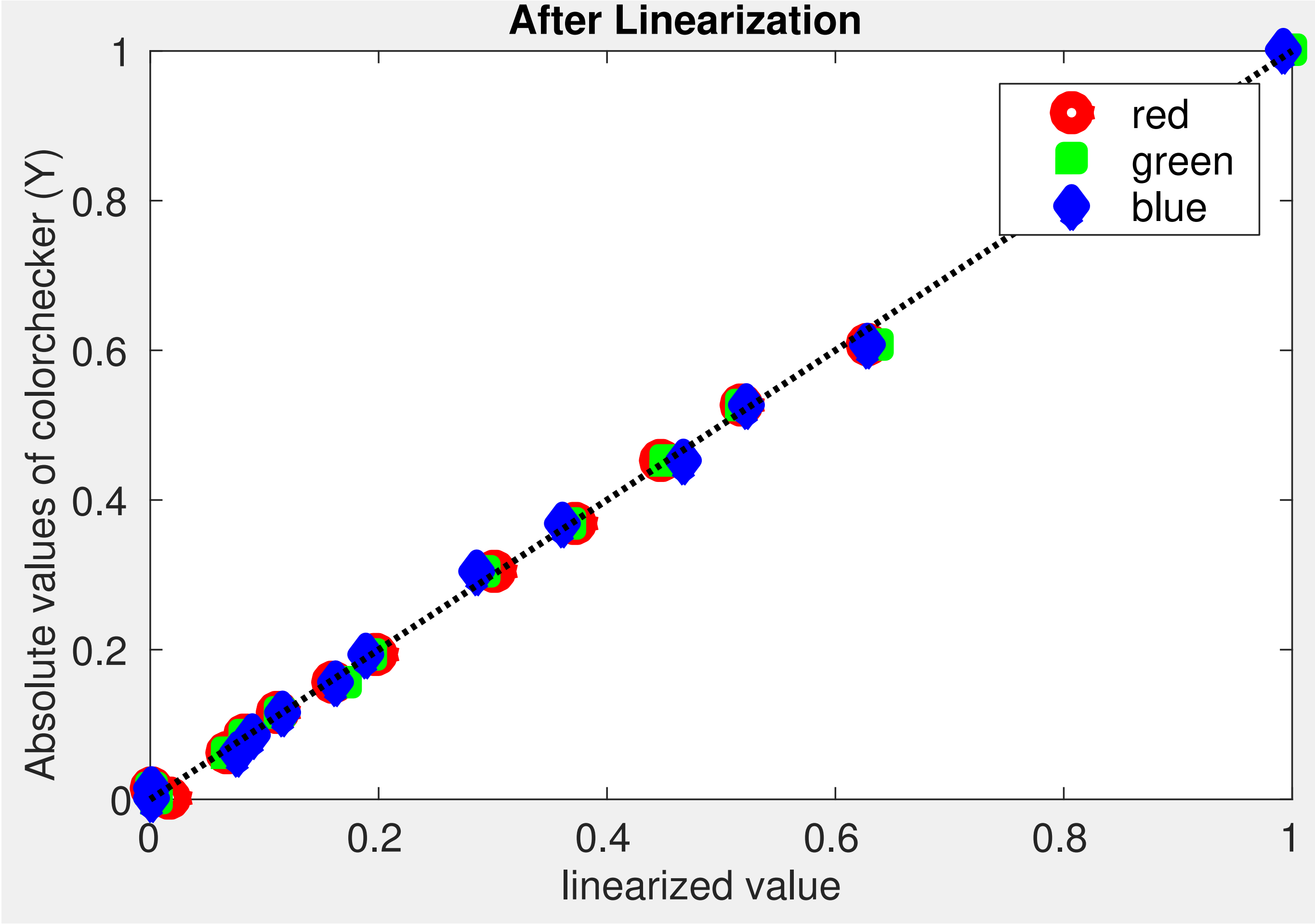
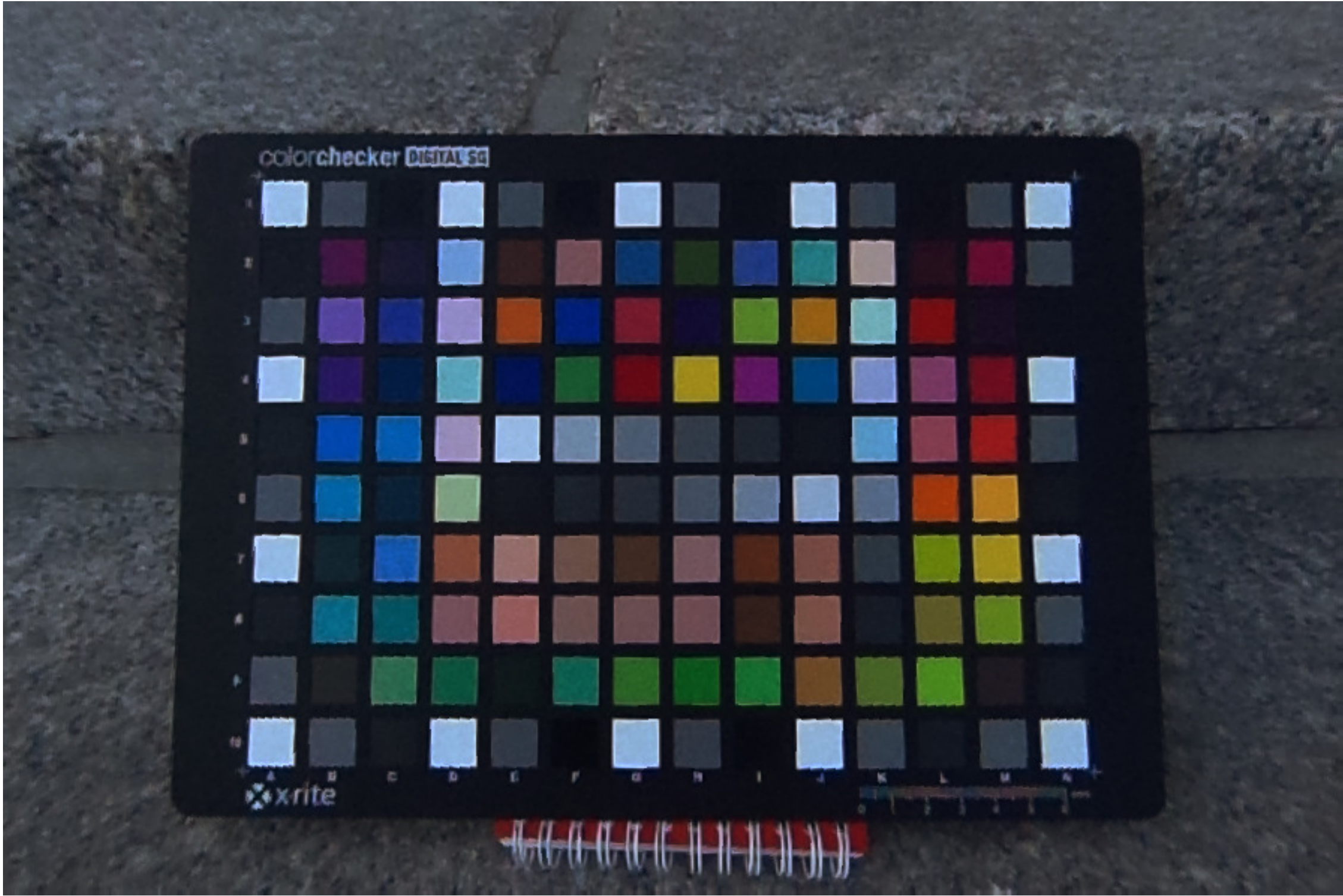
Calibrage radiométrique



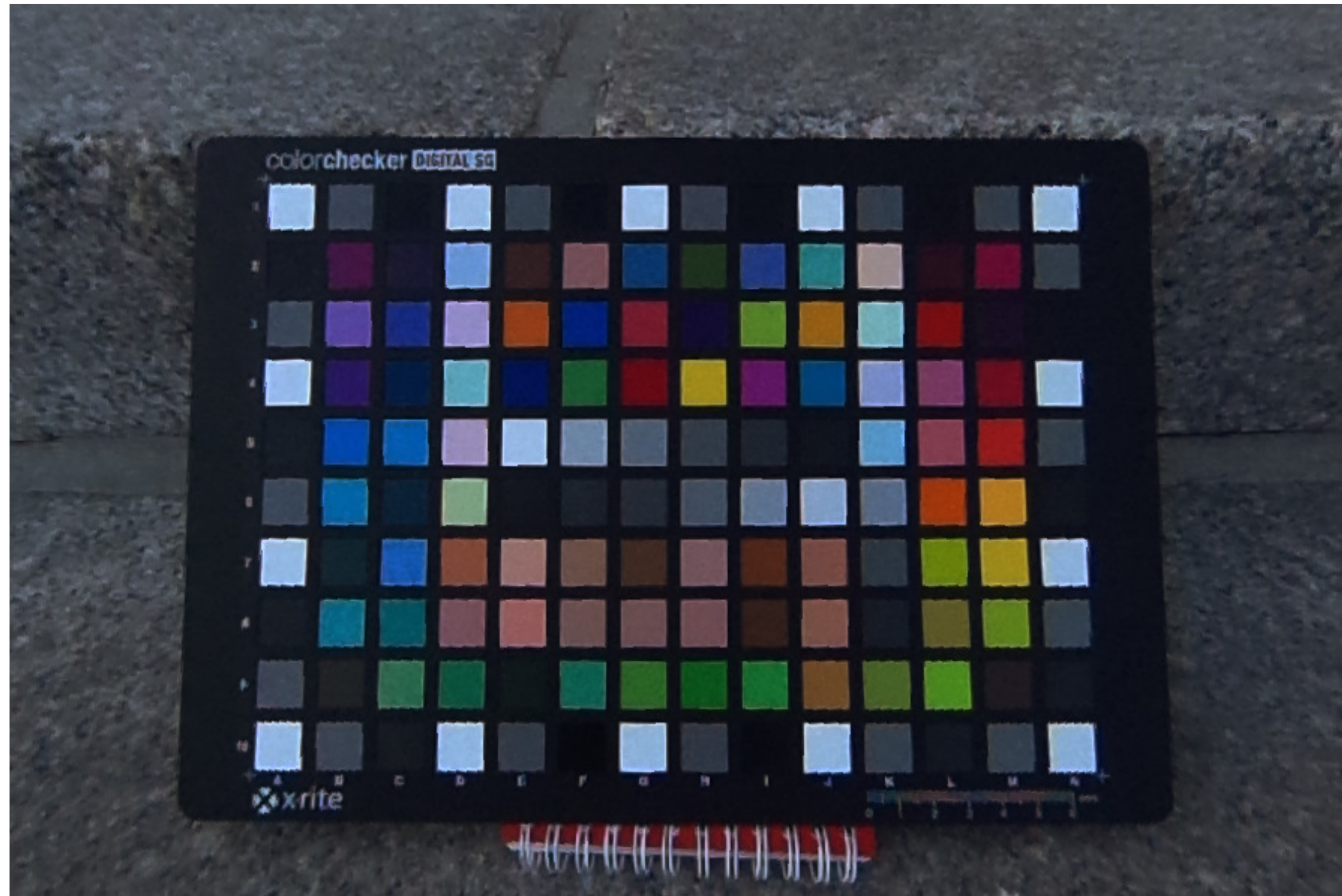
Calibrage radiométrique



Calibrage radiométrique



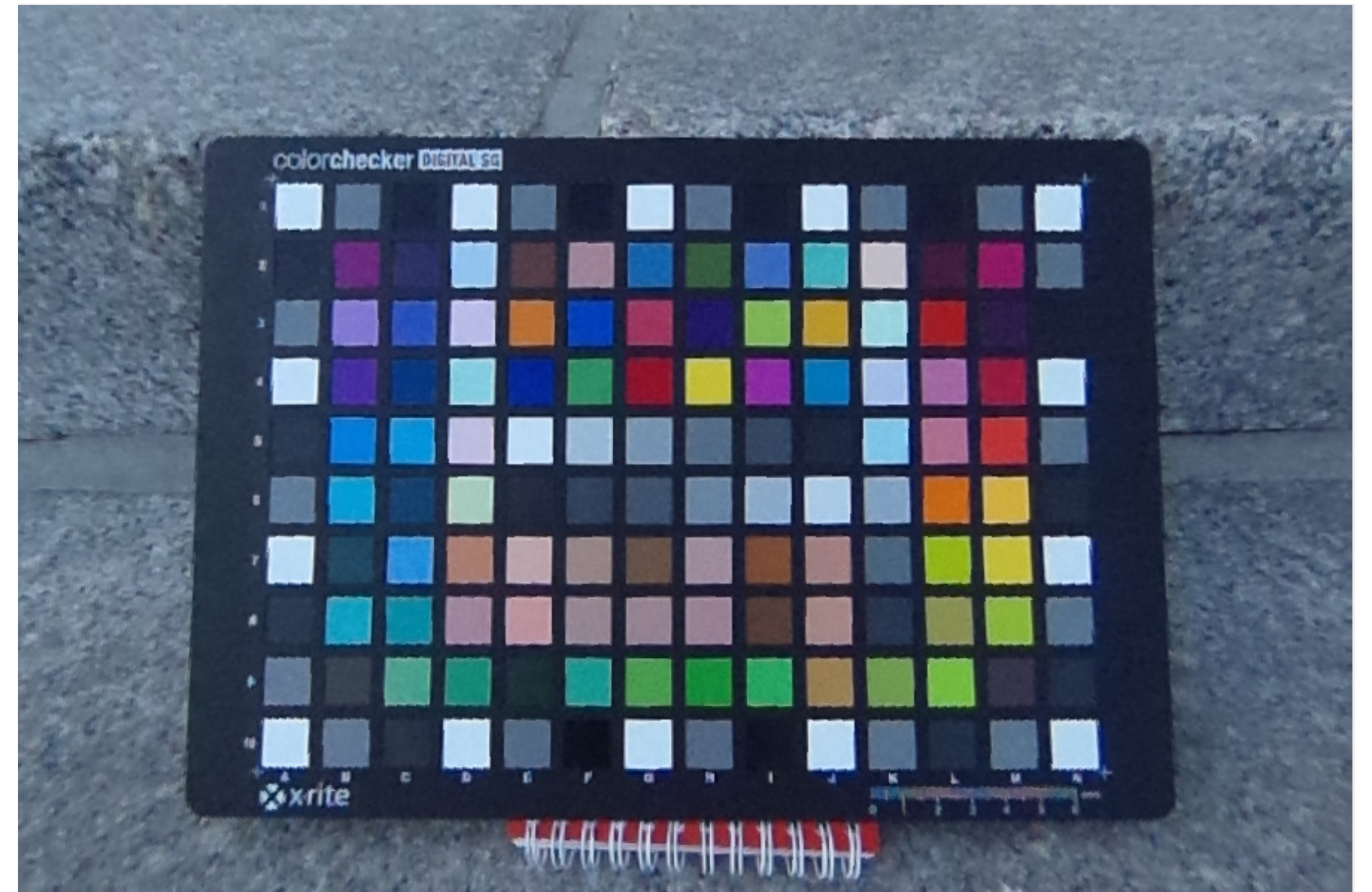
Calibrage radiométrique



Augmentation constante d'intensité **émise**



PHYSIQUE



Augmentation constante d'intensité **perçue**

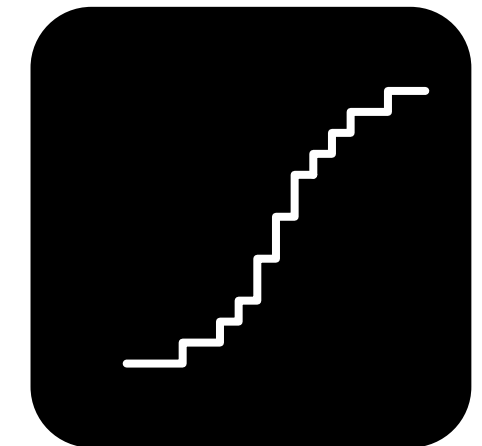


PERCEPTION

Dans une caméra...

- Comment estimer cette fonction?
- Première option
 - utiliser une cible de calibrage radiométrique
- Seconde option
 - l'estimer automatiquement à partir des images
 - article de P. Debevec (SIGGRAPH 1997)

Fonction
non-linéaire



Pixel



Images à haute plage dynamique

Calibrage radiométrique automatique

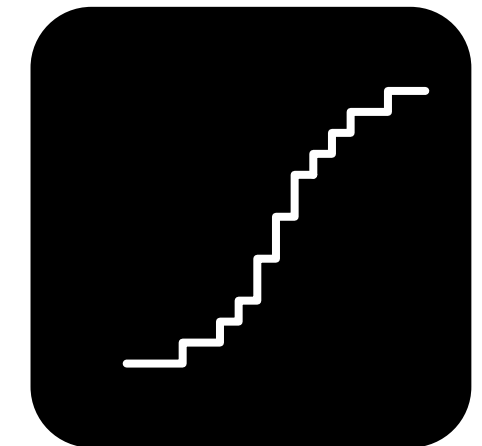


GIF-4105/7105 Photographie Algorithmique
Jean-François Lalonde

Dans une caméra...

- Comment estimer cette fonction?
- Première option
 - utiliser une cible de calibrage radiométrique
- Seconde option
 - l'estimer automatiquement à partir des images
 - article de P. Debevec (SIGGRAPH 1997)

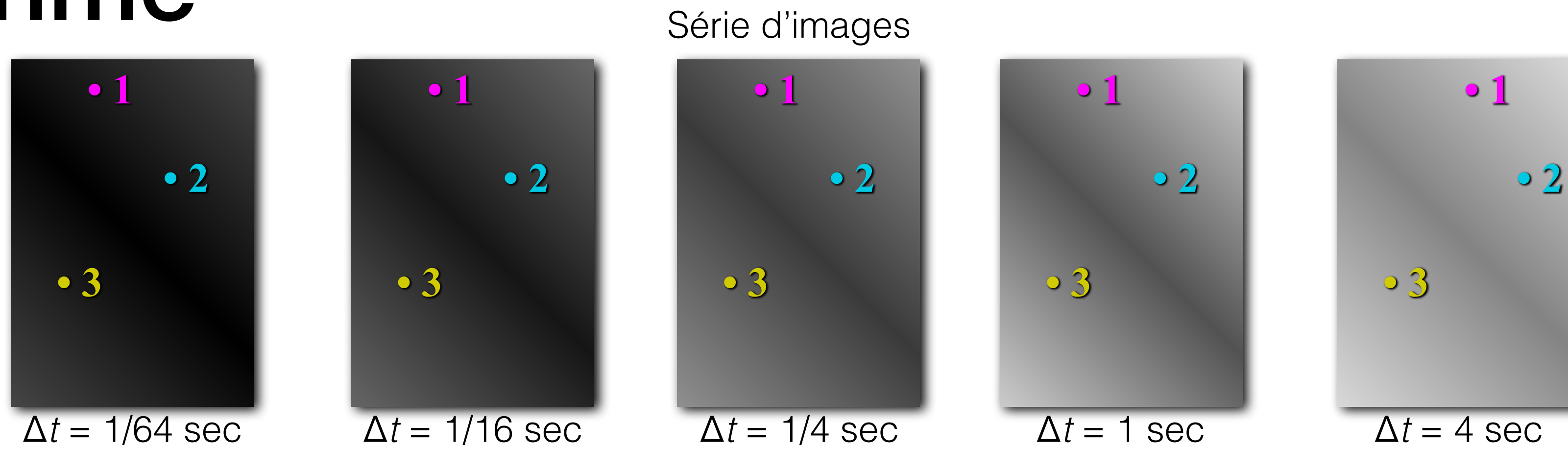
Fonction
non-linéaire



Pixel

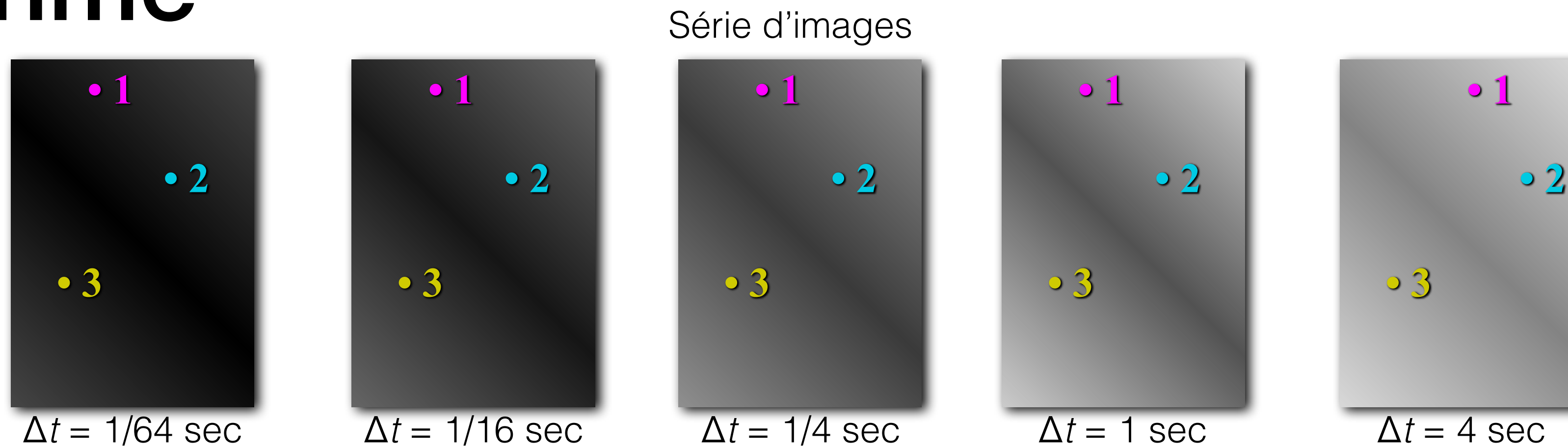


Algorithme



$$z = f(\text{radiance} \times \Delta t)$$

Algorithme

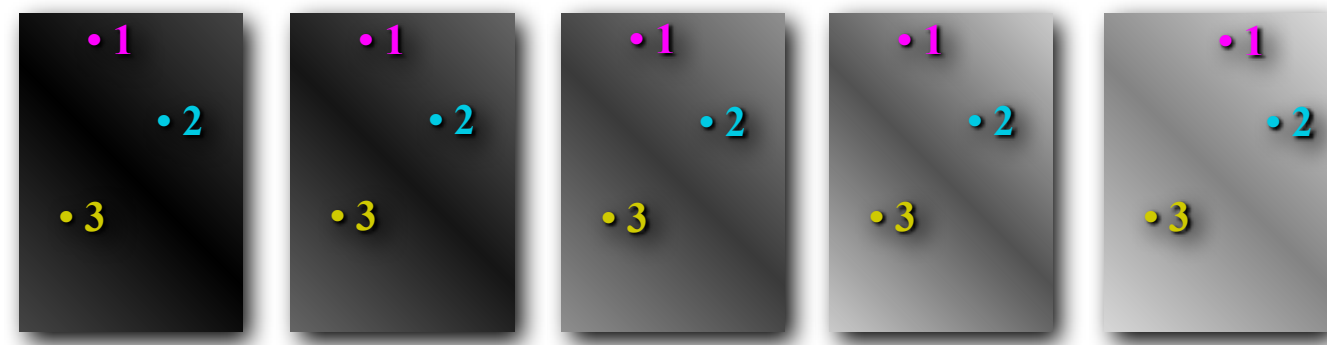


j = image
 i = pixel

$$z_{ij} = f(\text{radiance}_i \times \Delta t_j)$$

$$f^{-1}(z_{ij}) = \text{radiance}_i \times \Delta t_j$$

$$g(z_{ij}) = \log \text{radiance}_i + \log \Delta t_j$$

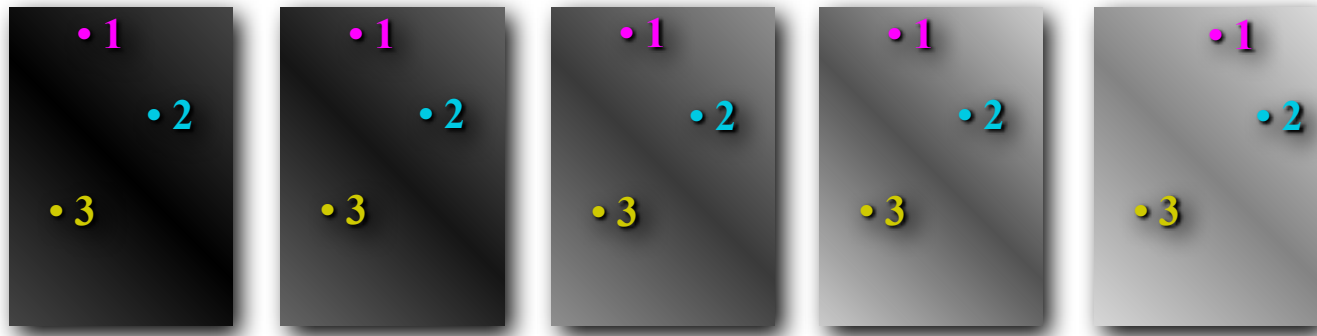


$$g(z_{ij}) = \log \text{radiance}_i + \log \Delta t_j$$

j = image
 i = pixel

Quels sont les connus/inconnus?

Astuce : discrétiser la fonction $g()$



$$g(z_{ij}) = \log \text{radiance}_i + \log \Delta t_j$$

$$g(z_{ij}) = r_i + t_j$$

$j = \text{image}$
 $i = \text{pixel}$

$$\begin{bmatrix} g(0) & g(1) & g(2) & g(3) & \cdots & g(255) & r_1 & r_2 & r_3 & \cdots & r_N \end{bmatrix} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} g(0) \\ g(1) \\ g(2) \\ g(3) \\ \vdots \\ g(255) \\ r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ \vdots \\ r_N \end{bmatrix} = \mathbf{b}$$

Comment trouver $\mathbf{x}$

- Nous avons un système d'équations linéaires de la forme

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$$

où $\mathbf{A}$ est « sous-contraint »

(car on peut ajouter n'importe quelle constante à $\mathbf{x}$!)

- En python, on peut le résoudre avec la fonction

```
from scipy import linalg  
x = linalg.lstsq(A, b)
```

qui trouve le $\mathbf{x}$ qui minimise $||\mathbf{Ax} - \mathbf{b}||_2$

Comment trouver $\mathbf{x}$

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$$

Autre façon de l'écrire :

$$\arg \min_{g,r} \sum_{i \in \text{pixels}} \sum_{j \in \text{images}} (r_i + t_j - g(z_{ij}))^2$$

Quel est le problème?

Que faire si, par exemple, aucun pixel ne possède la valeur 35?

Comment trouver x

Contrainte : courbe doit être lisse

$$\arg \min_{g,r} \sum_{i \in \text{pixels}} \sum_{j \in \text{images}} (r_i + t_j - g(z_{ij}))^2 + \lambda \sum_{z=0}^{255} g''(z)^2$$

Contrainte : courbe doit être lisse

$$+ \lambda \sum_{z=0}^{255} g''(z)^2$$

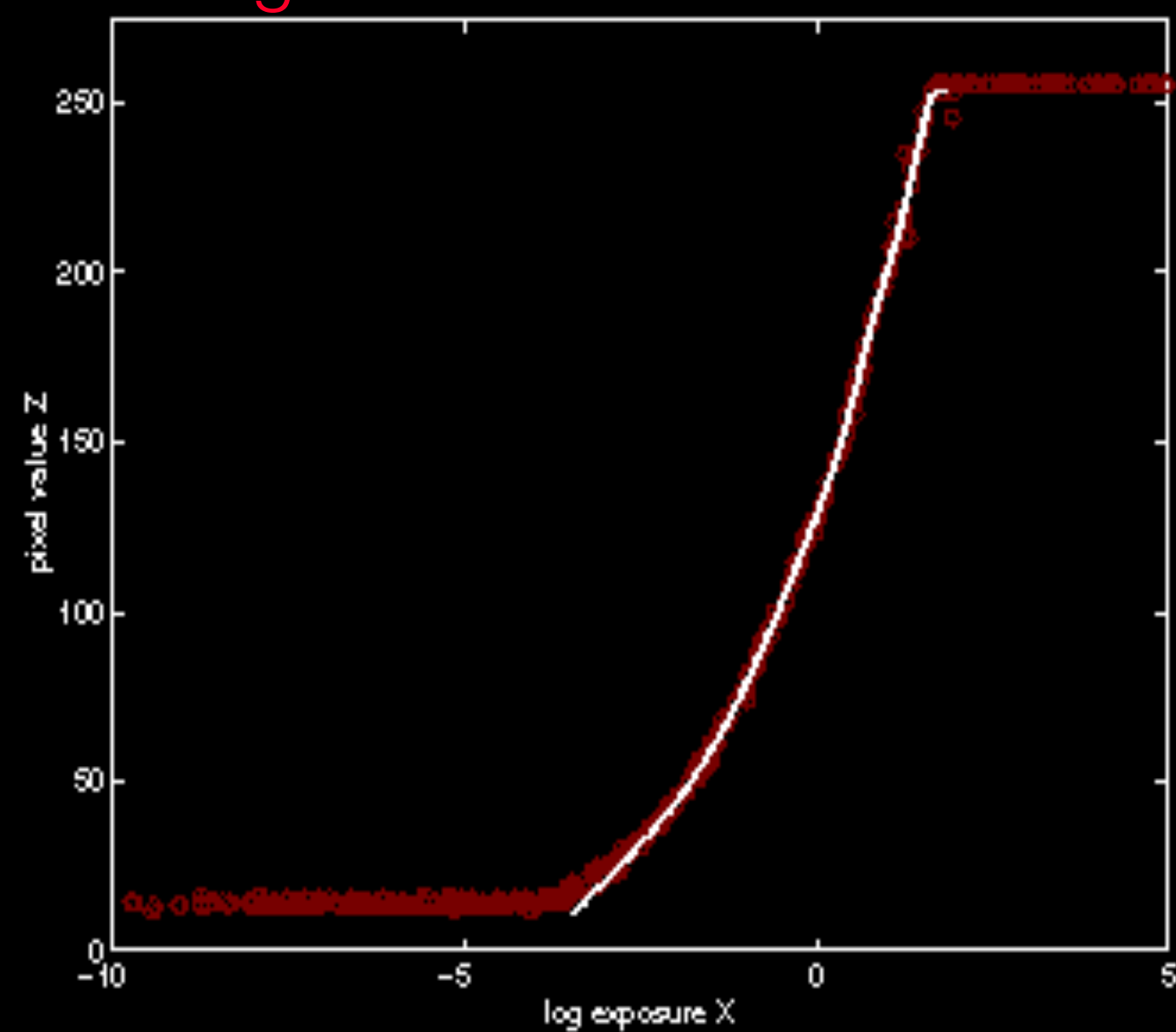
$$\begin{bmatrix} g(0) & g(1) & g(2) & g(3) & \cdots & g(255) & r_1 & r_2 & r_3 & \cdots & r_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g(0) \\ g(1) \\ g(2) \\ g(3) \\ \vdots \\ g(255) \\ r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ \vdots \\ r_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Résultats: couleur



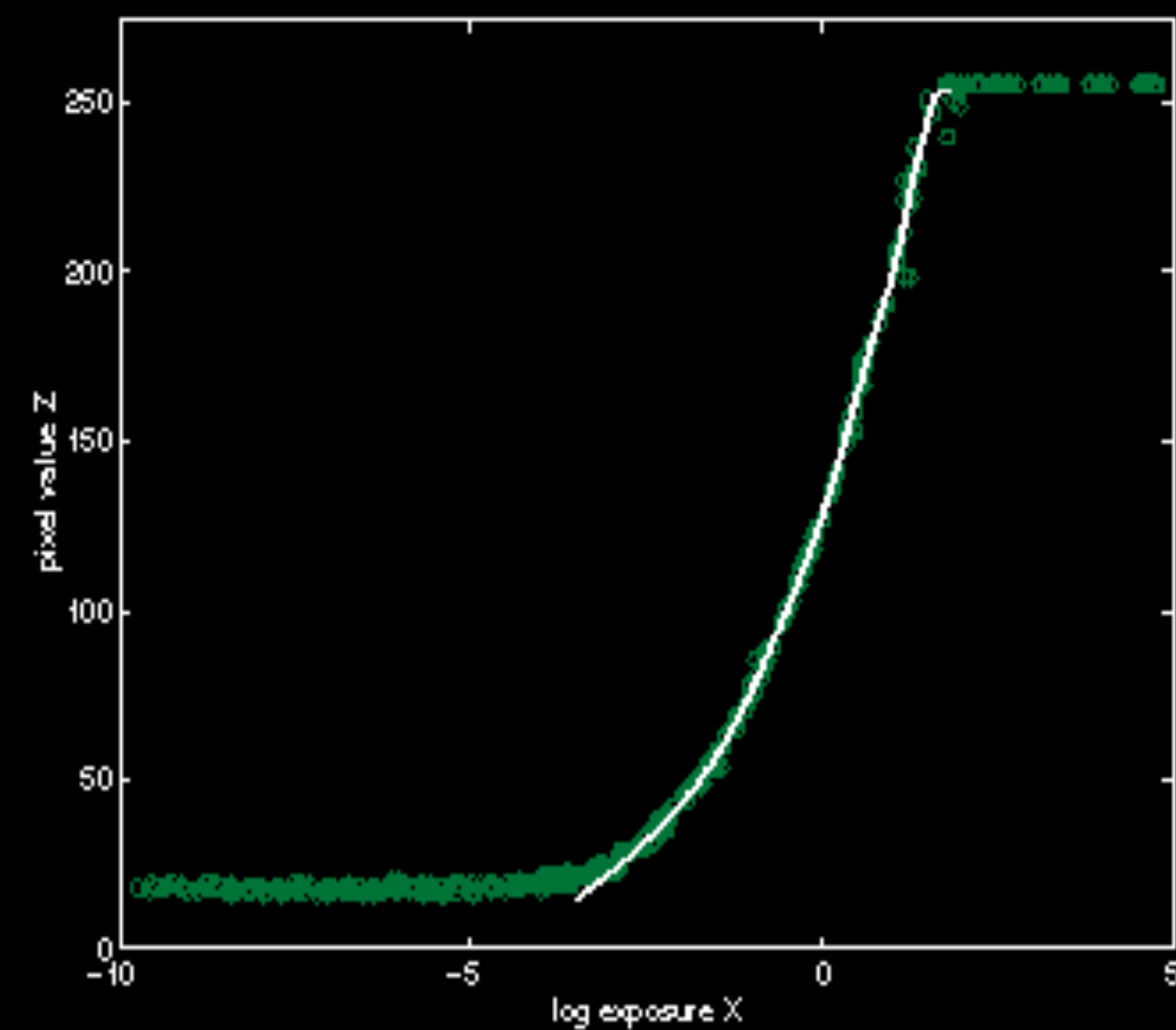
Rouge

Red



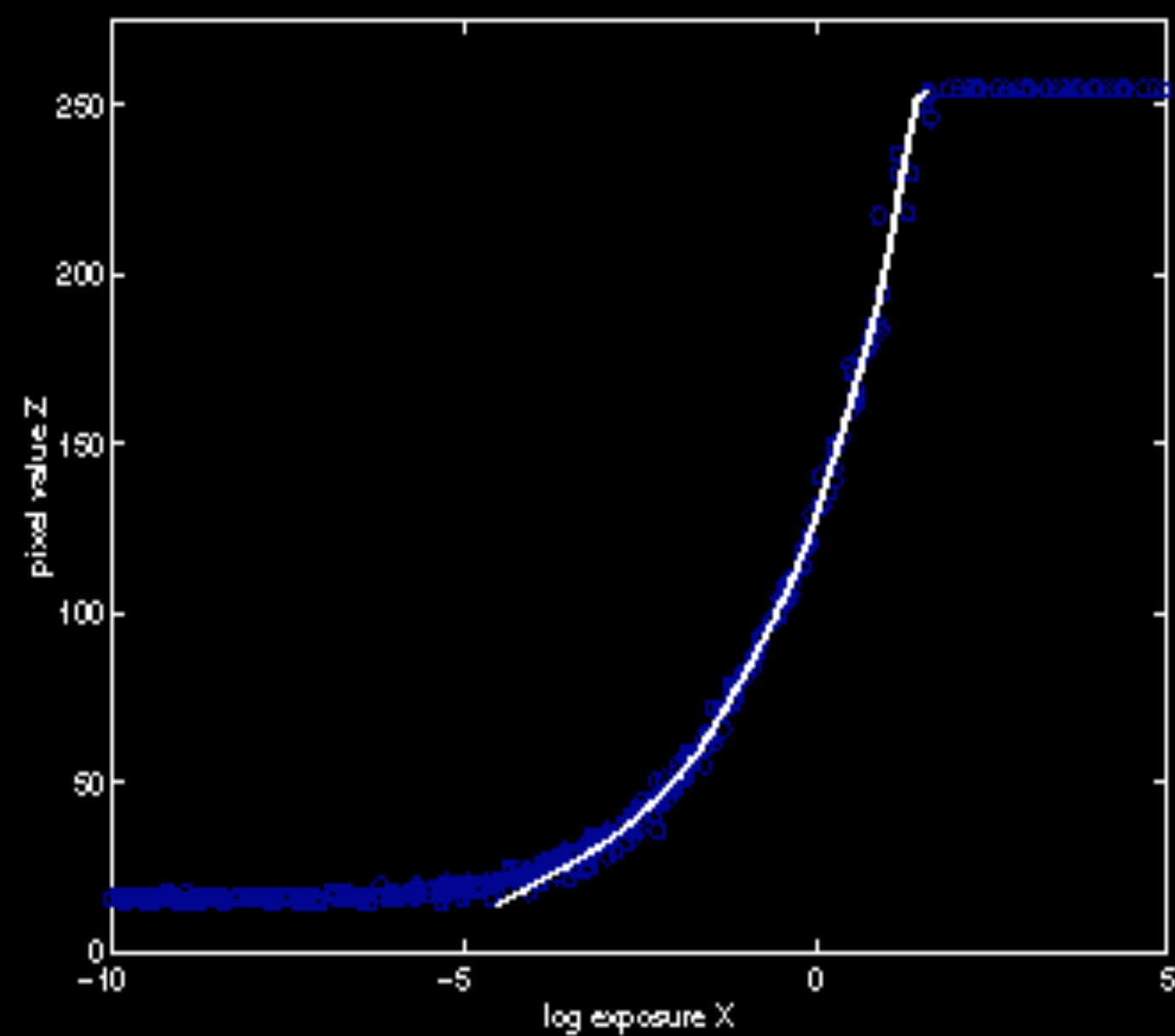
Green

Vert



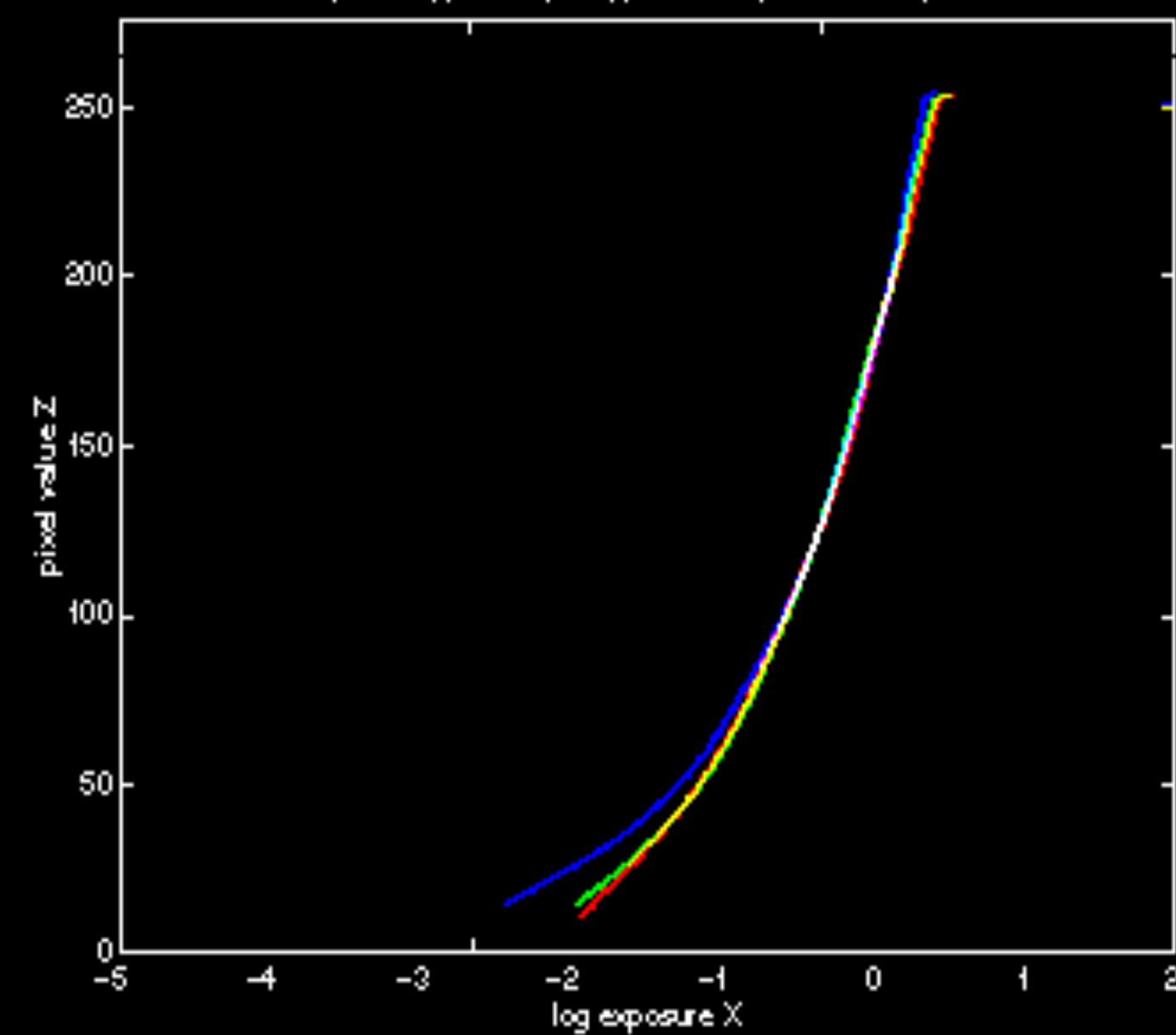
Bleu

Blue



RGB

Red (dashed), Green (solid), and Blue (dash-dotted) curves



Math

- Notons la (log-)fonction inverse discrétisée : $g(z)$
- Pour chaque pixel i dans une image j , nous avons :

$$g(z_{ij}) = \log \text{radiance}_i + \log \Delta t_j$$

$$g(z_{ij}) = r_i + t_j$$

- Système d'équations linéaires sur-contraint :

$$\sum_{i \in \text{pixels}} \sum_{j \in \text{images}} (r_i + t_j - g(z_{ij}))^2 + \lambda \sum_{z=0}^{255} g''(z)^2$$

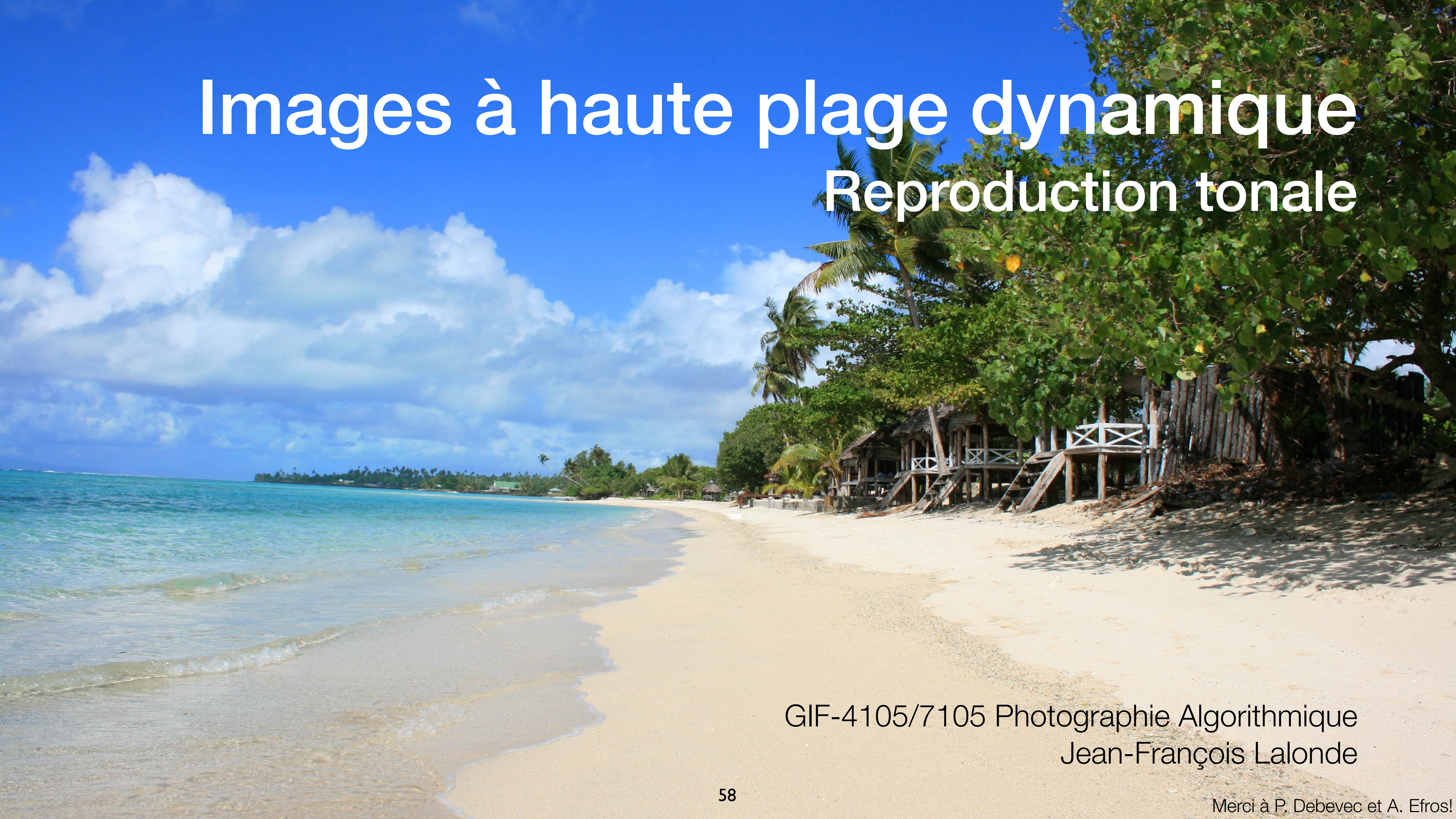
approximation des données

courbe lisse

- Permet d'estimer la radiance et la fonction de caméra simultanément!

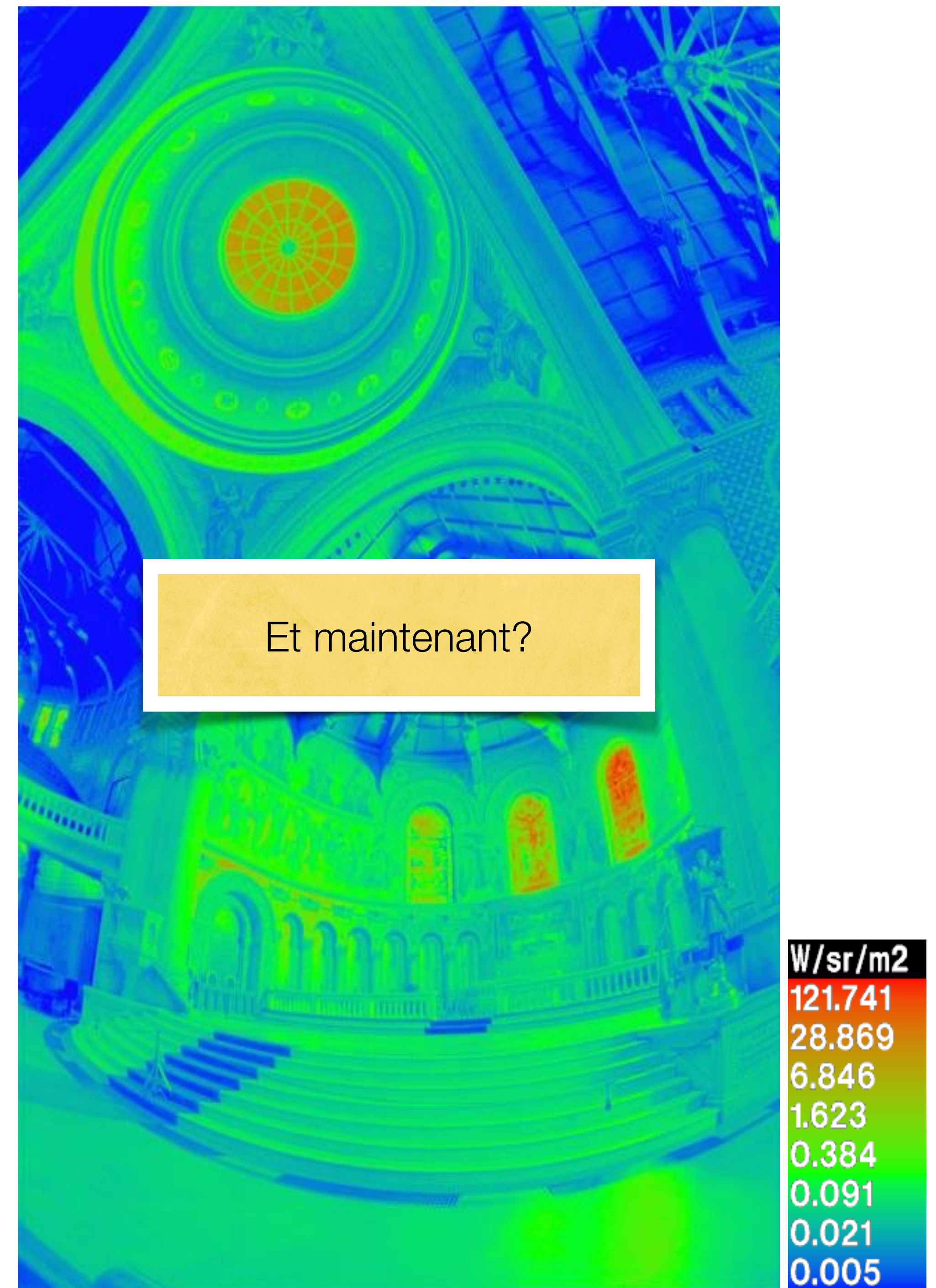
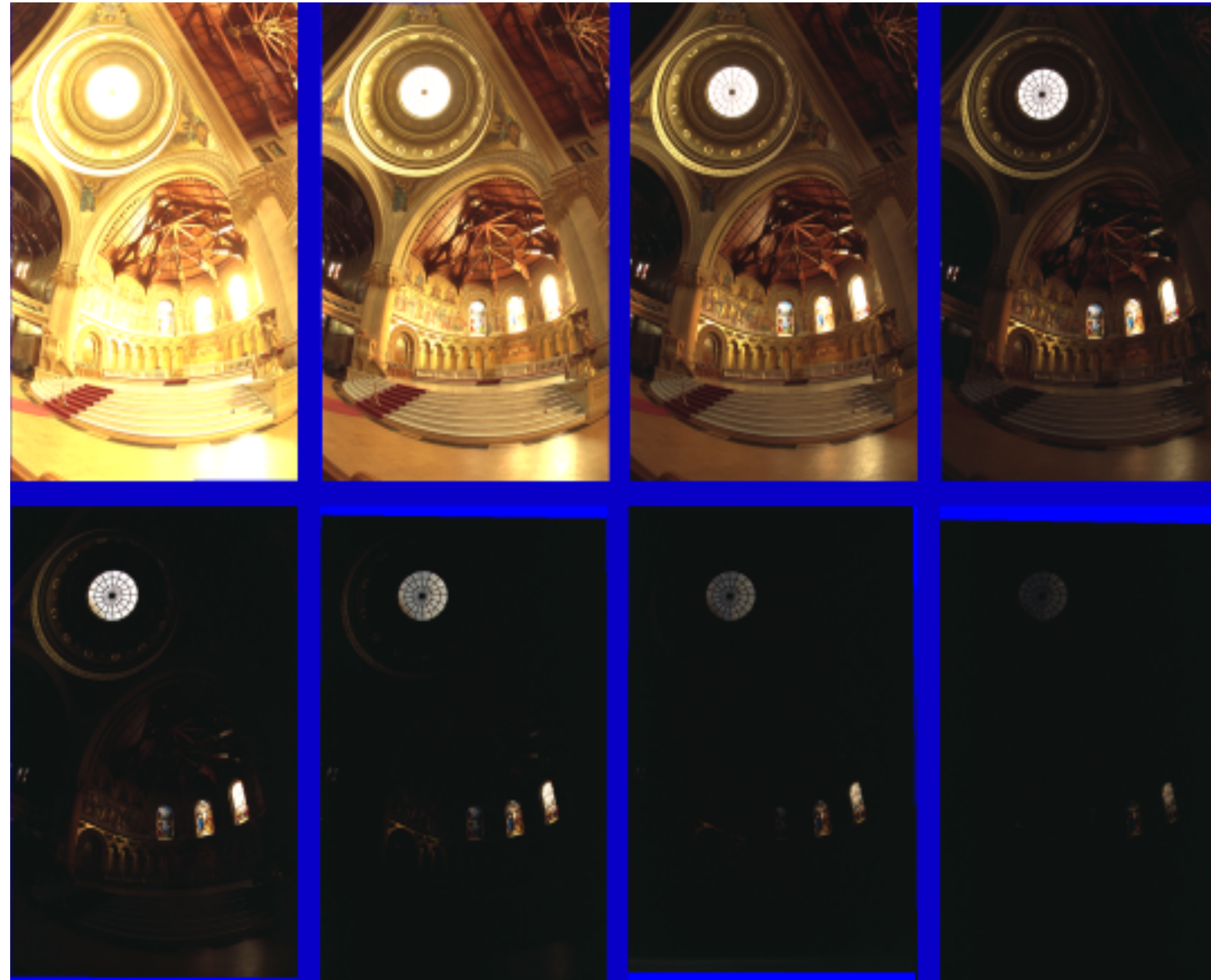
Images à haute plage dynamique

Reproduction tonale



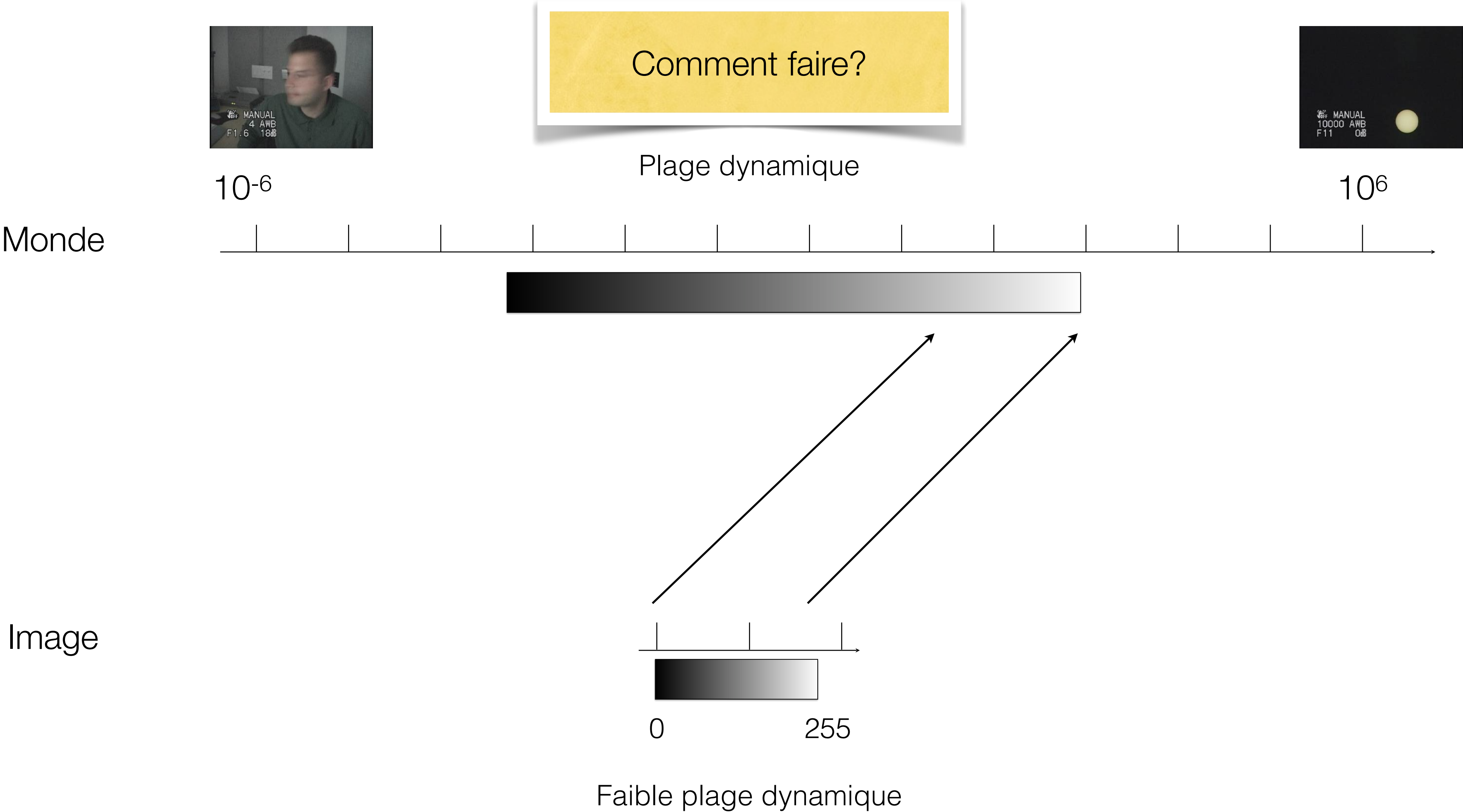
GIF-4105/7105 Photographie Algorithmique
Jean-François Lalonde

Radiance



Reproduction tonale

$\text{radiance} \propto \frac{\text{pixel}}{\Delta t}$



Reproduction tonale

- Problème typique :
 - Une caméra (de bonne qualité) peut capturer des valeurs d'intensité de 12 bits, mais nos écrans ne peuvent qu'en afficher 8 !

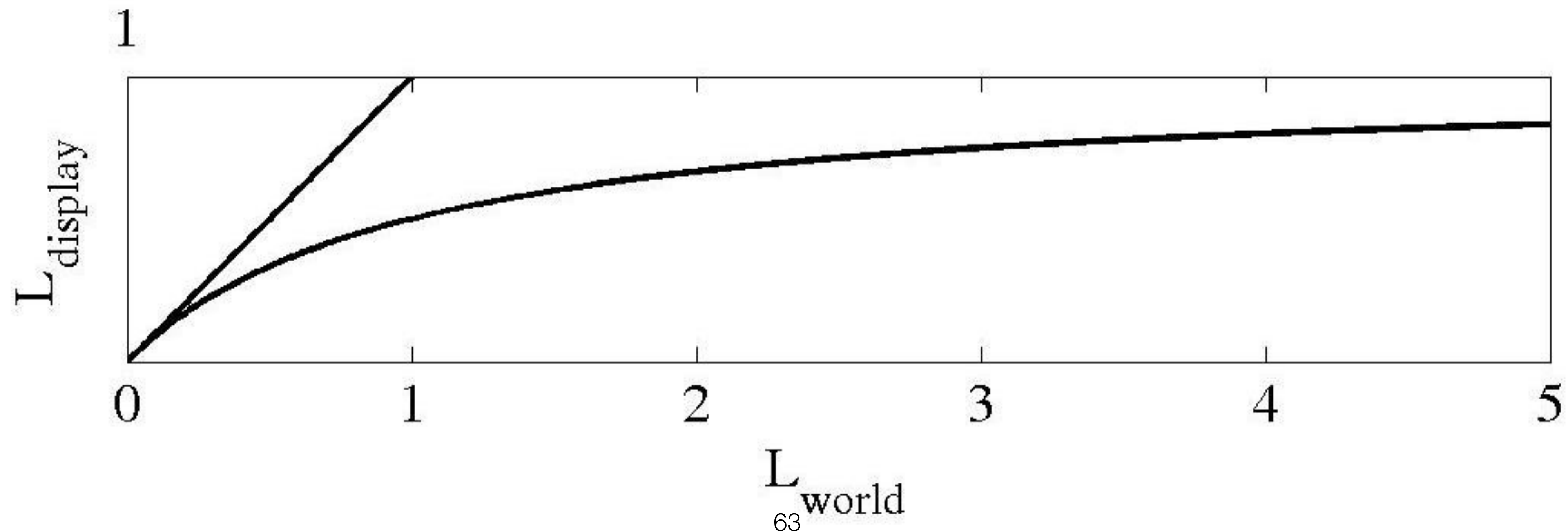
Opérateur global

- Déterminer une courbe qui :
 - Ramène le contenu du signal HDR dans une plage qui convient à un écran ou un projecteur
 - N'augmente pas les parties sombres
- Donc:
 - Asymptote à 255
 - Dérivée = 1 à 0

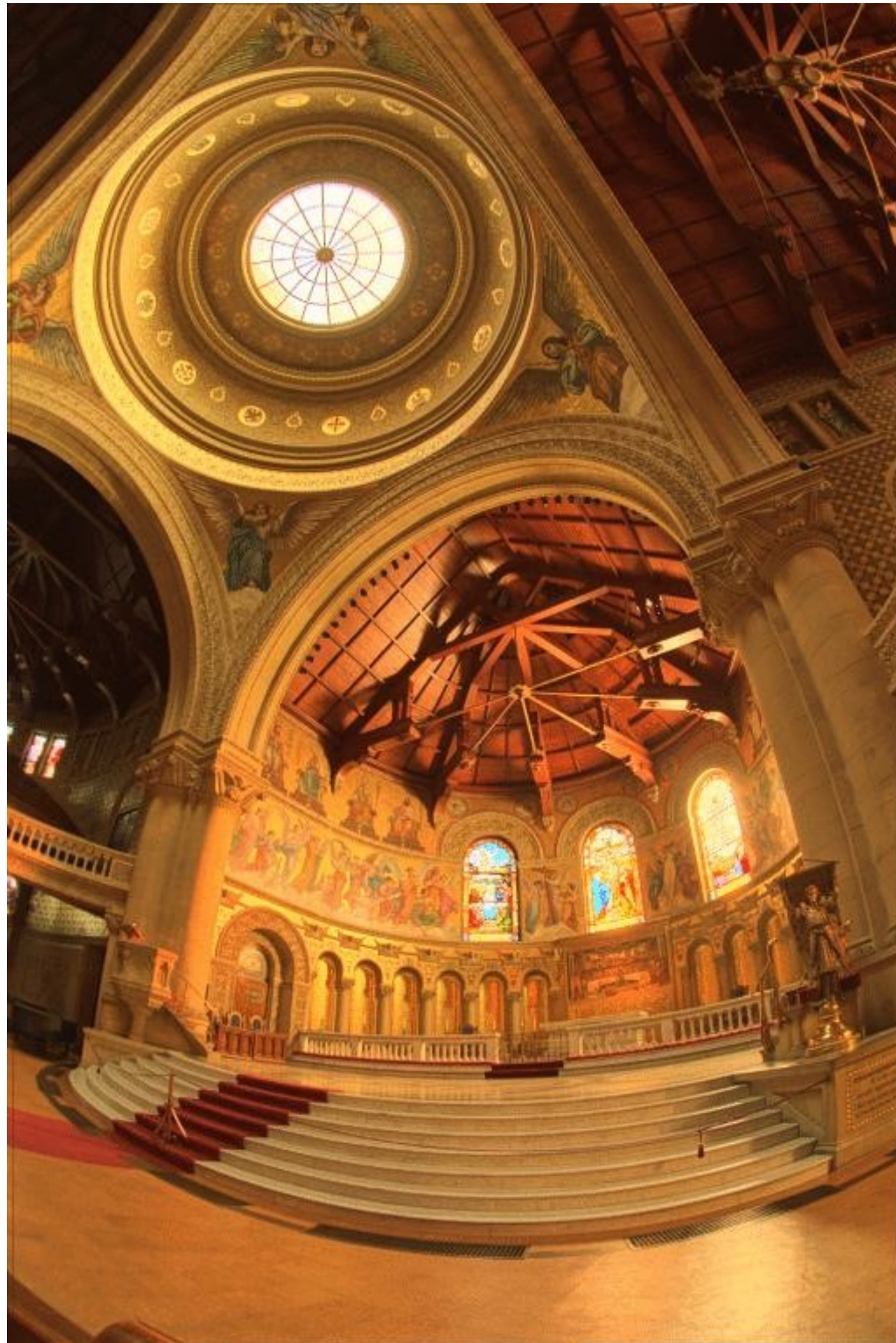
Idée 1 : opérateur global (Reinhard et al.)

- Solution simple : utiliser une transformée **non-linéaire**

$$L_{display} = \frac{L_{world}}{1 + L_{world}}$$



Non-linéaire



Reinhard



En fonction des pixels
les plus sombres

Idée 2 : utiliser le filtre bilatéral



filtre bilatéral



Filtre bilatéral : deux filtres gaussiens!

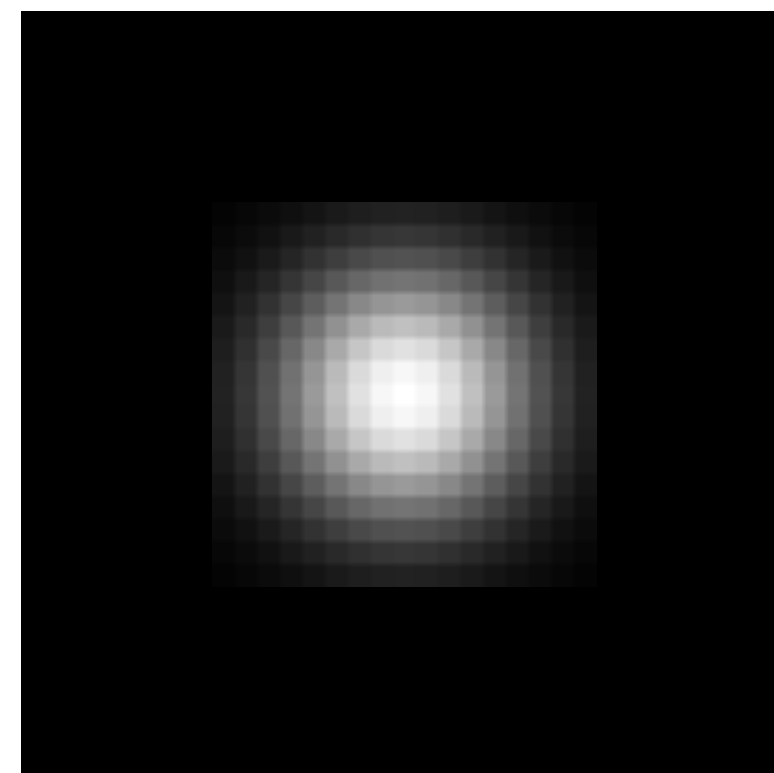
Rappel!

mais pas sur le même domaine!

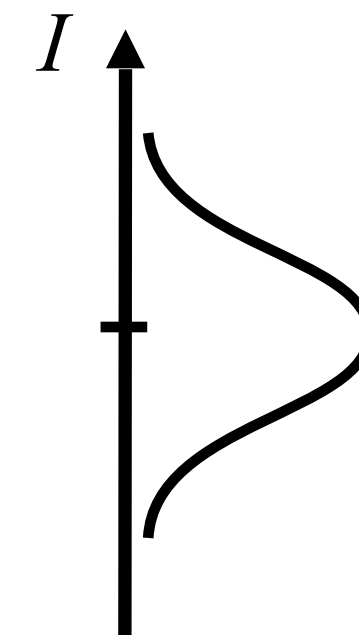
$$F[I]_{\mathbf{p}} = \frac{1}{W_{\mathbf{p}}} \sum_{\mathbf{q} \in S} G_{\sigma_s}(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|) G_{\sigma_r}(|I_{\mathbf{p}} - I_{\mathbf{q}}|) I_{\mathbf{q}}$$

normalisation

pondération spatiale



pondération en intensité



Idée 2 : filtre bilatéral



filtre bilatéral

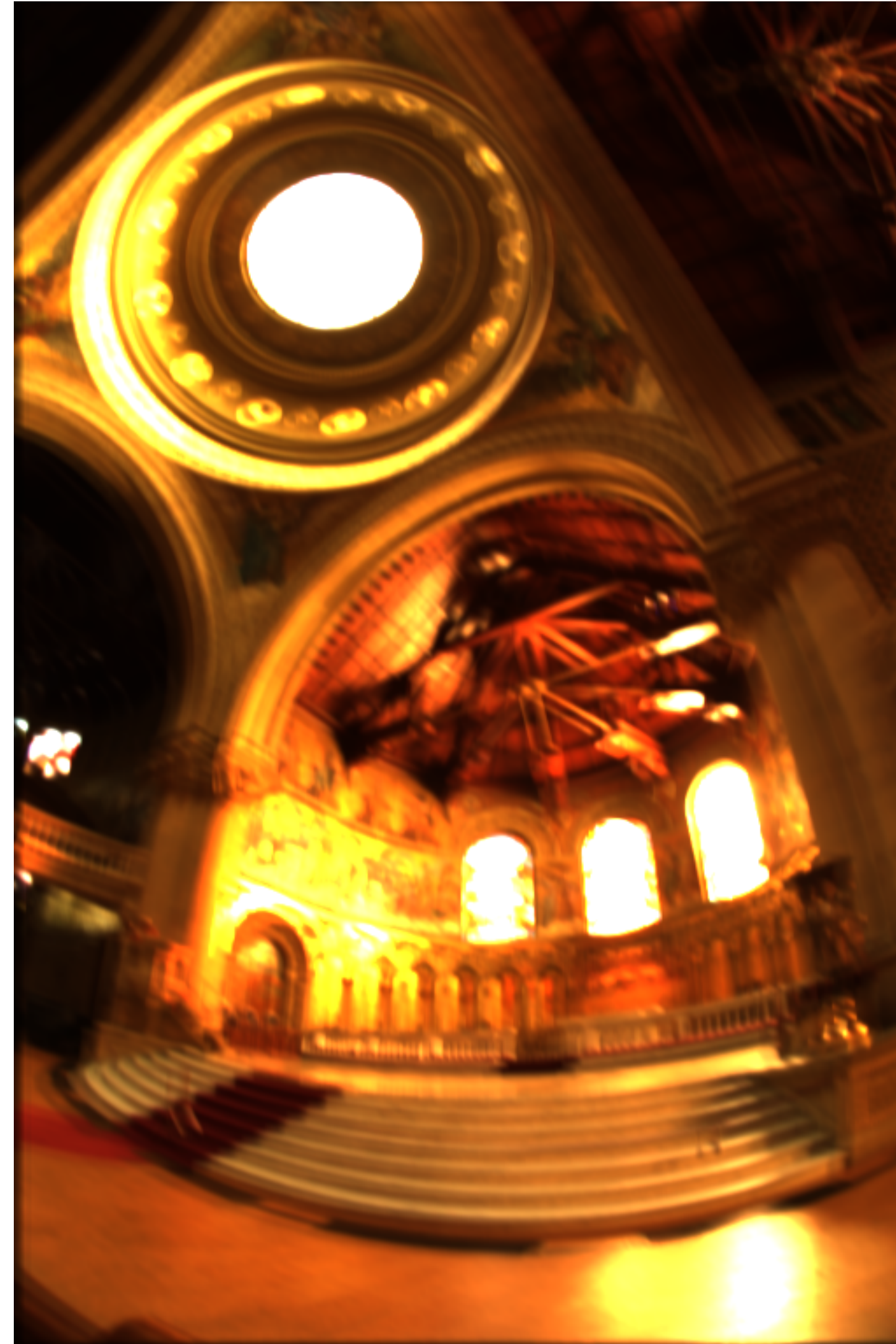


Idée 2 : filtre bilatéral

image originale



image filtrée (base)



détails = img / base



Idée 2 : filtre bilatéral

image originale



image filtrée (compressée)



détails = img / base



Idée 2 : filtre bilatéral

image originale



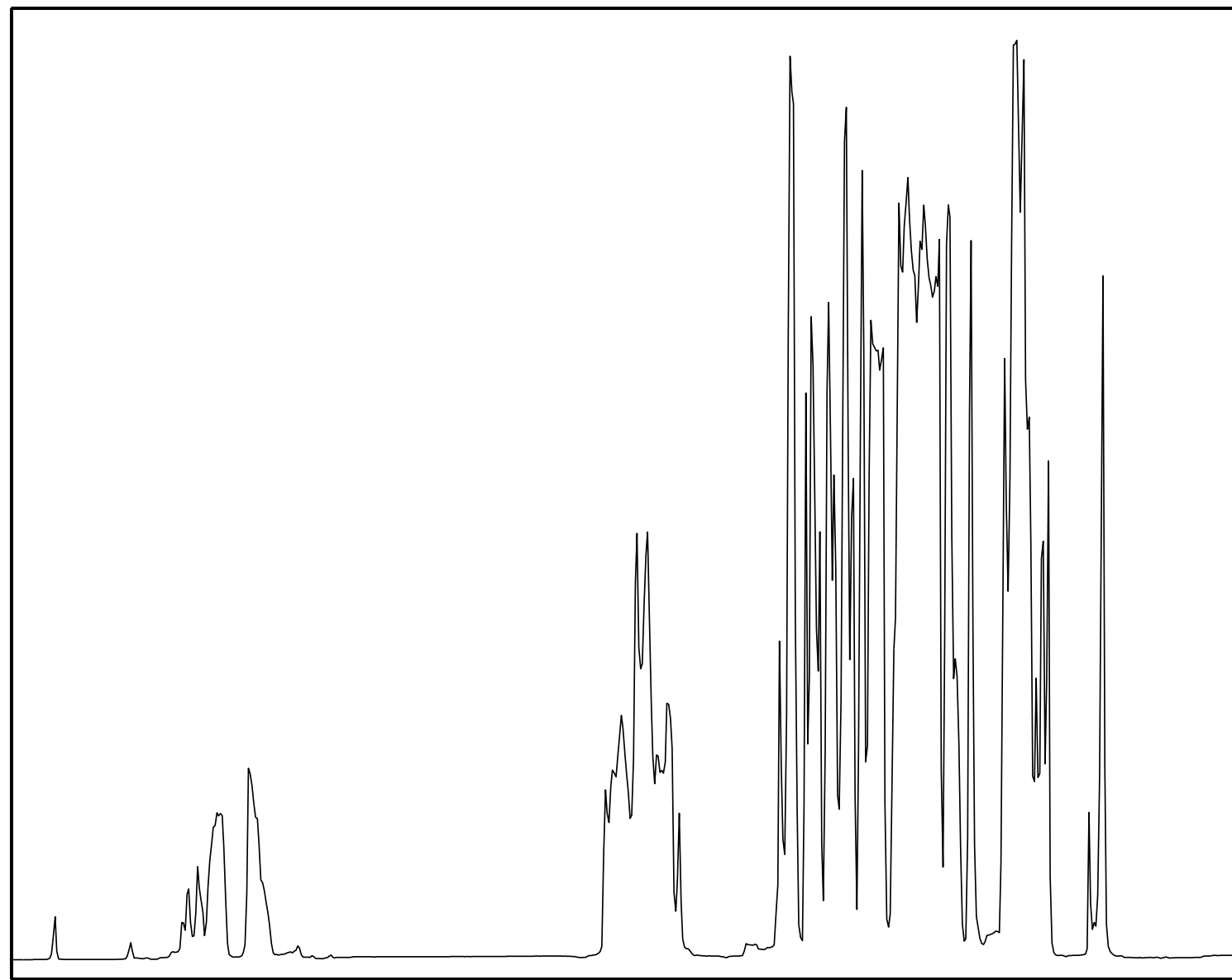
image filtrée (compressée)



détails = img / base

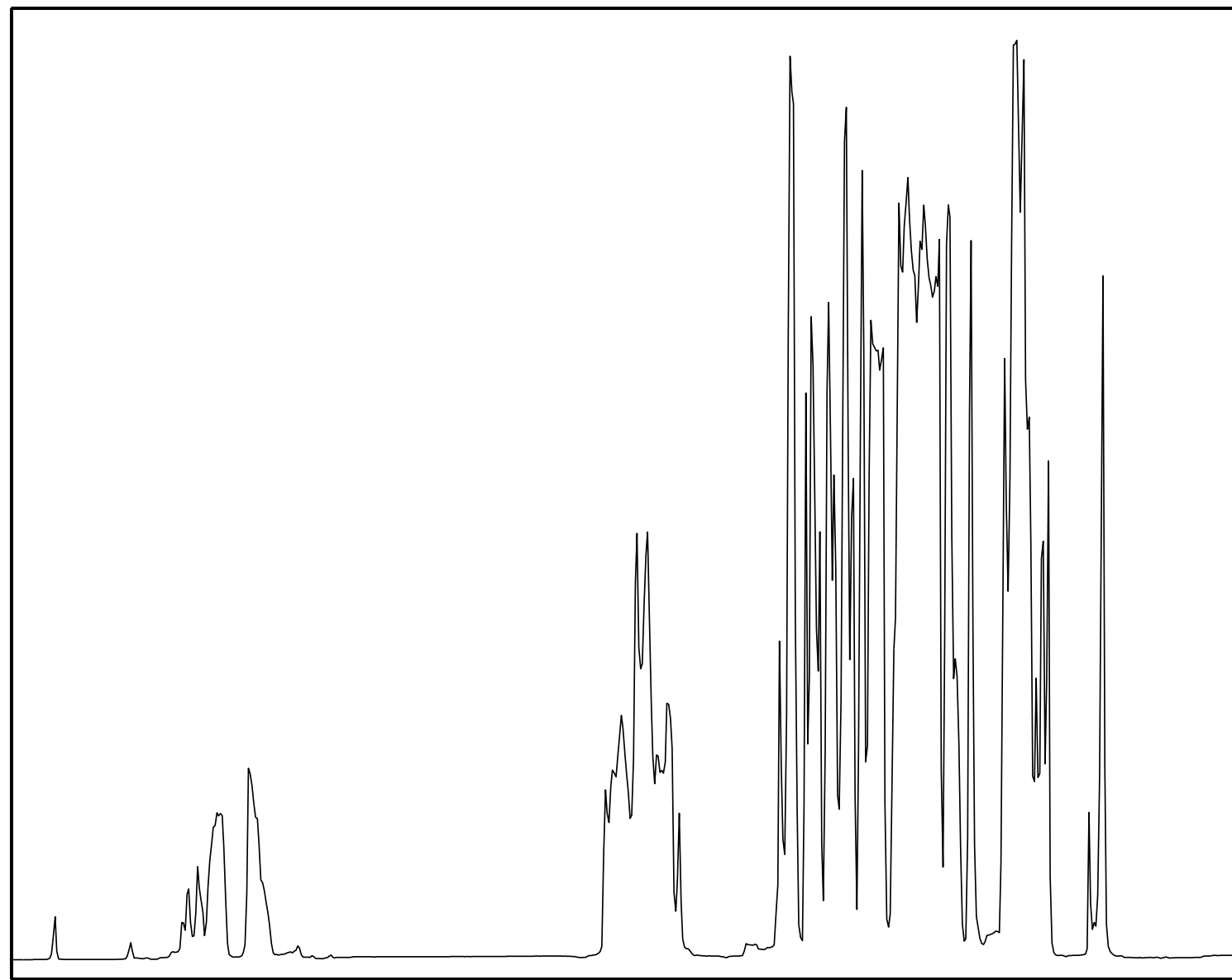


Idée 3 : utiliser les gradients

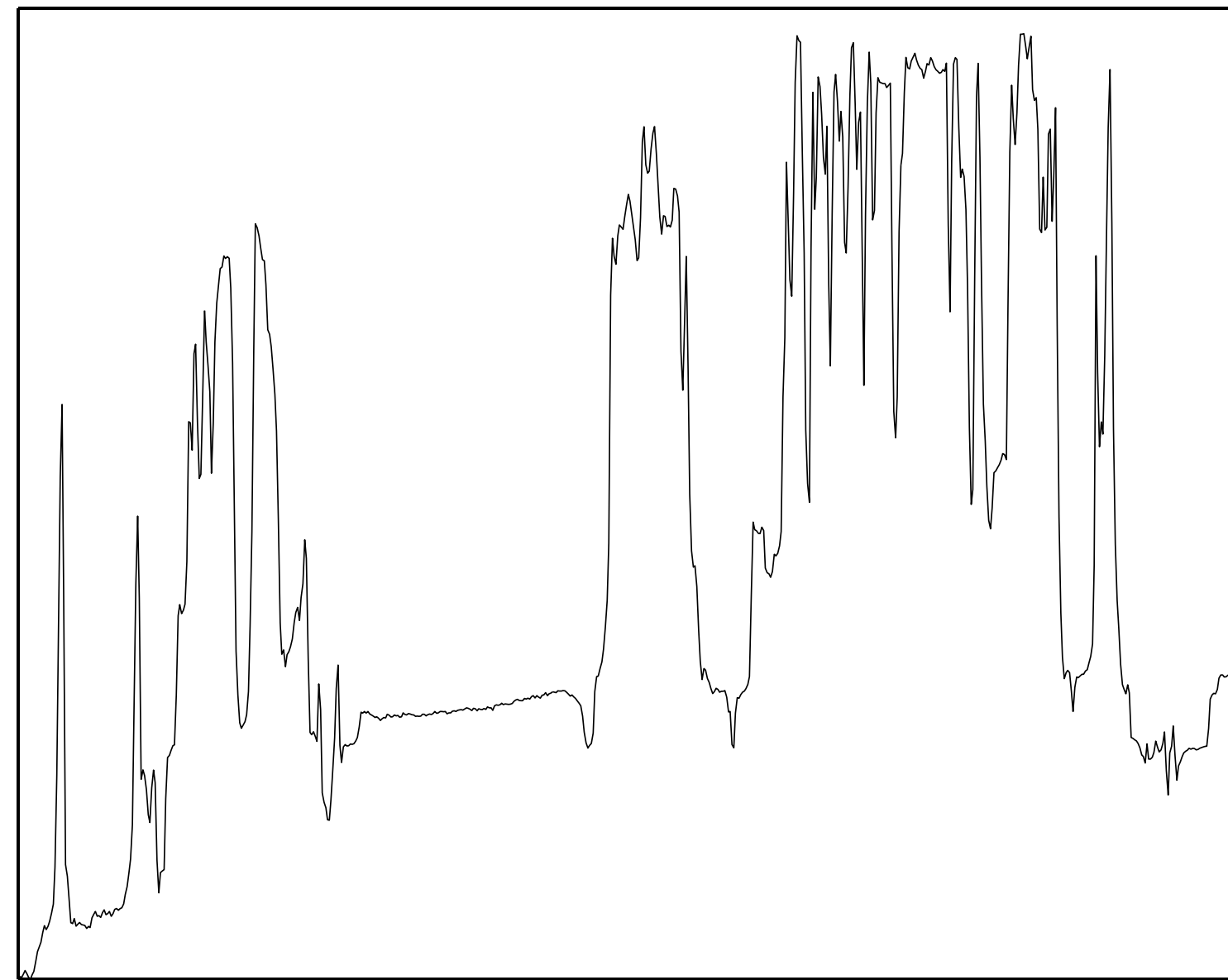


Signal HDR

Idée 3 : utiliser les gradients

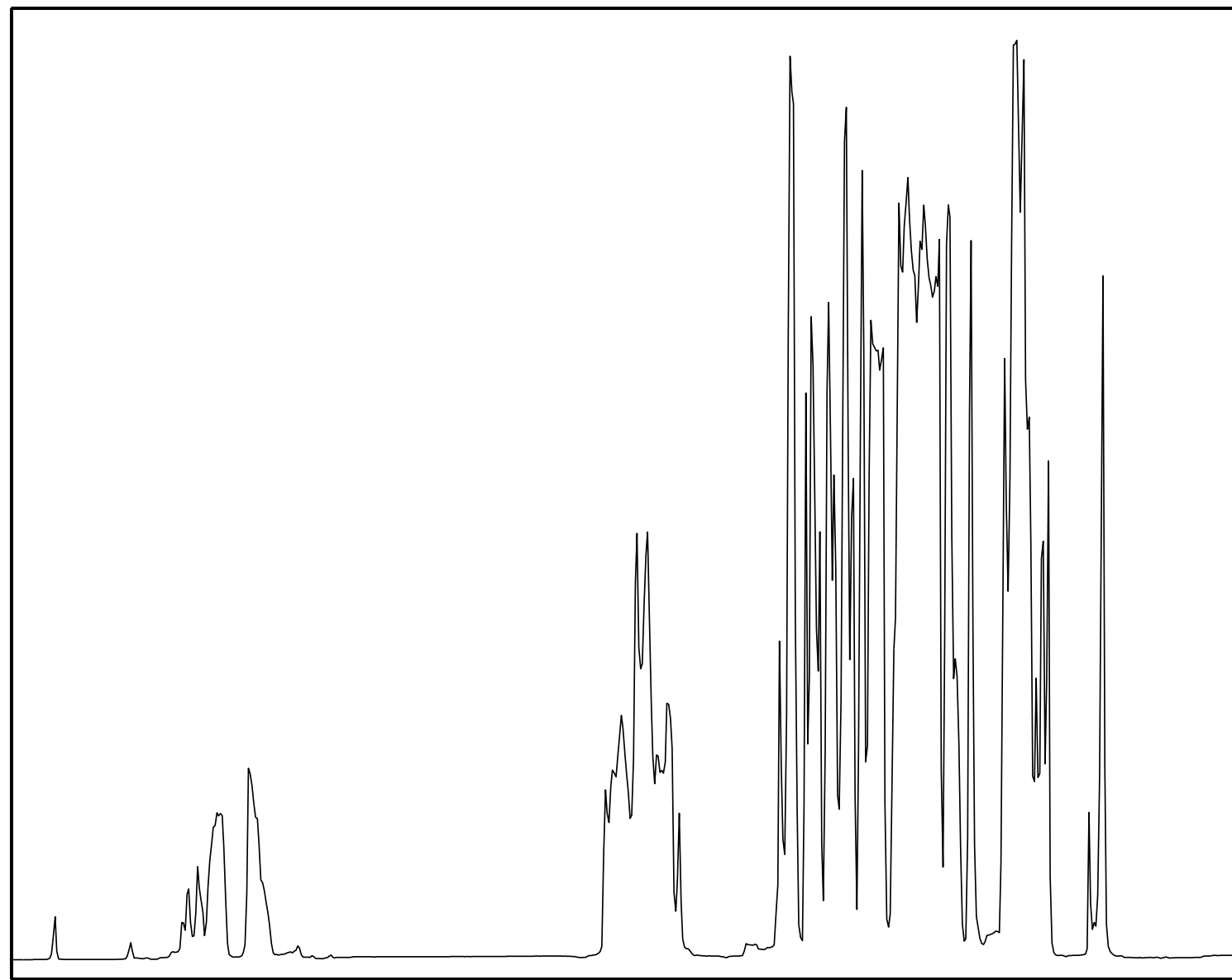


Signal HDR

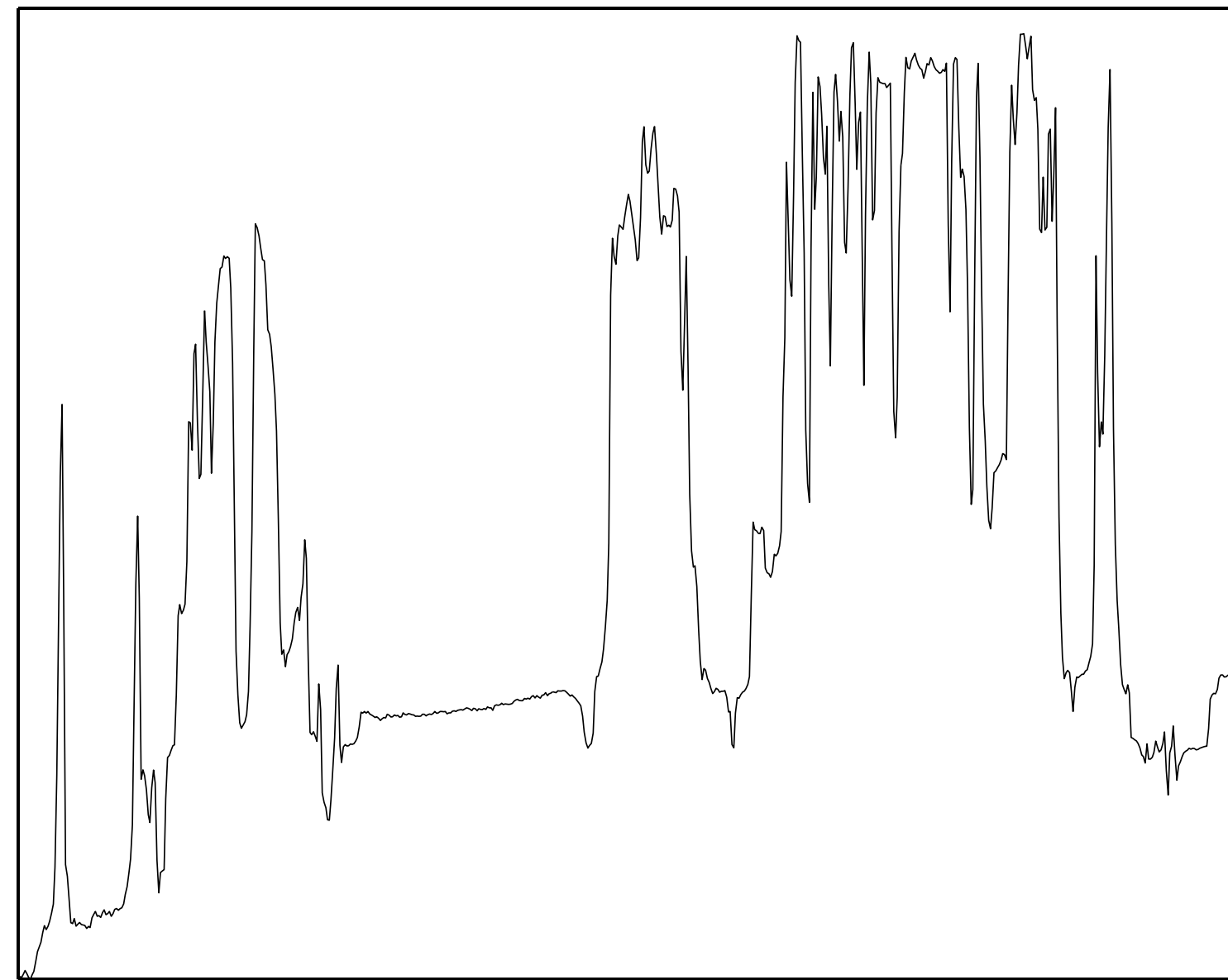


Log-signal HDR

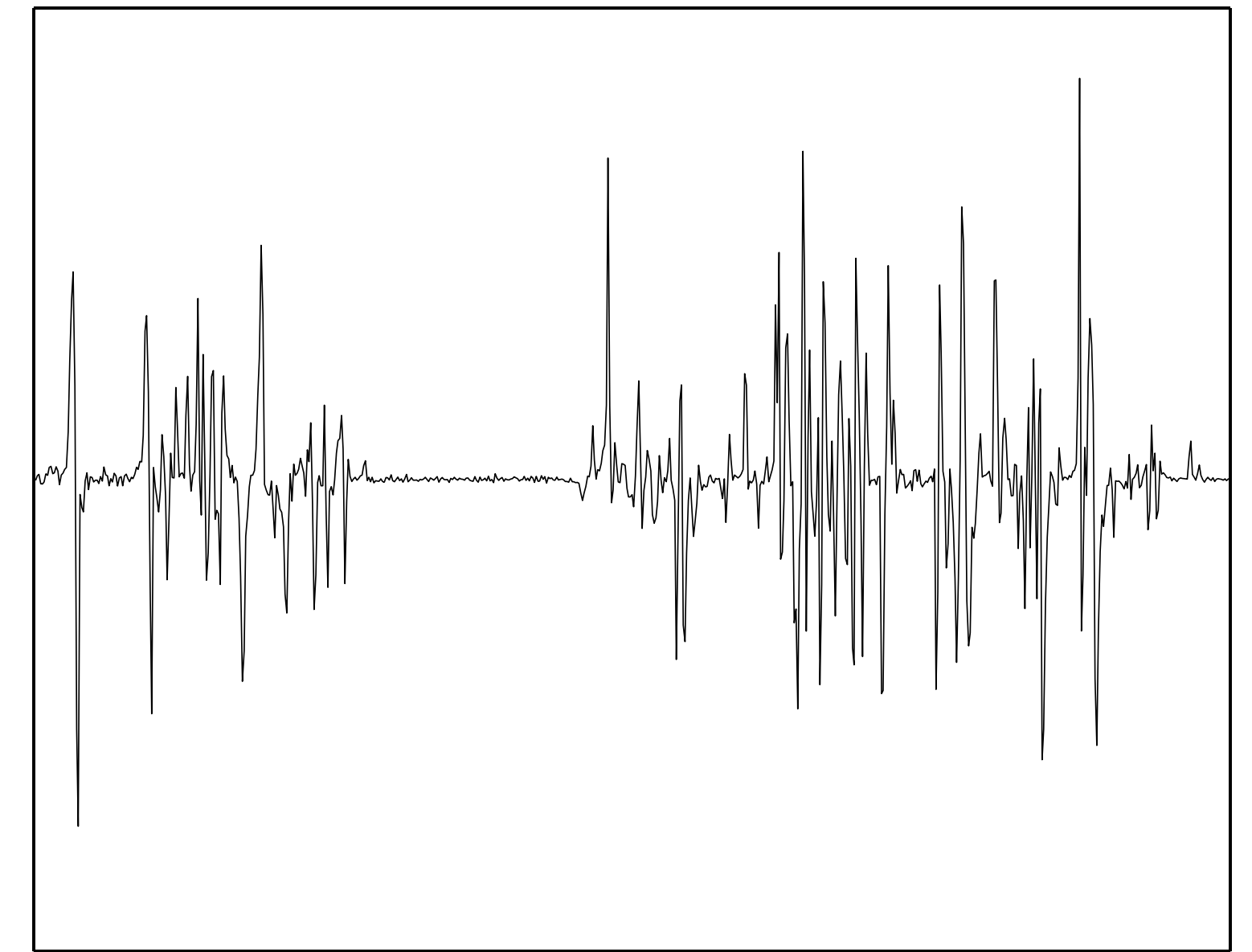
Idée 3 : utiliser les gradients



Signal HDR

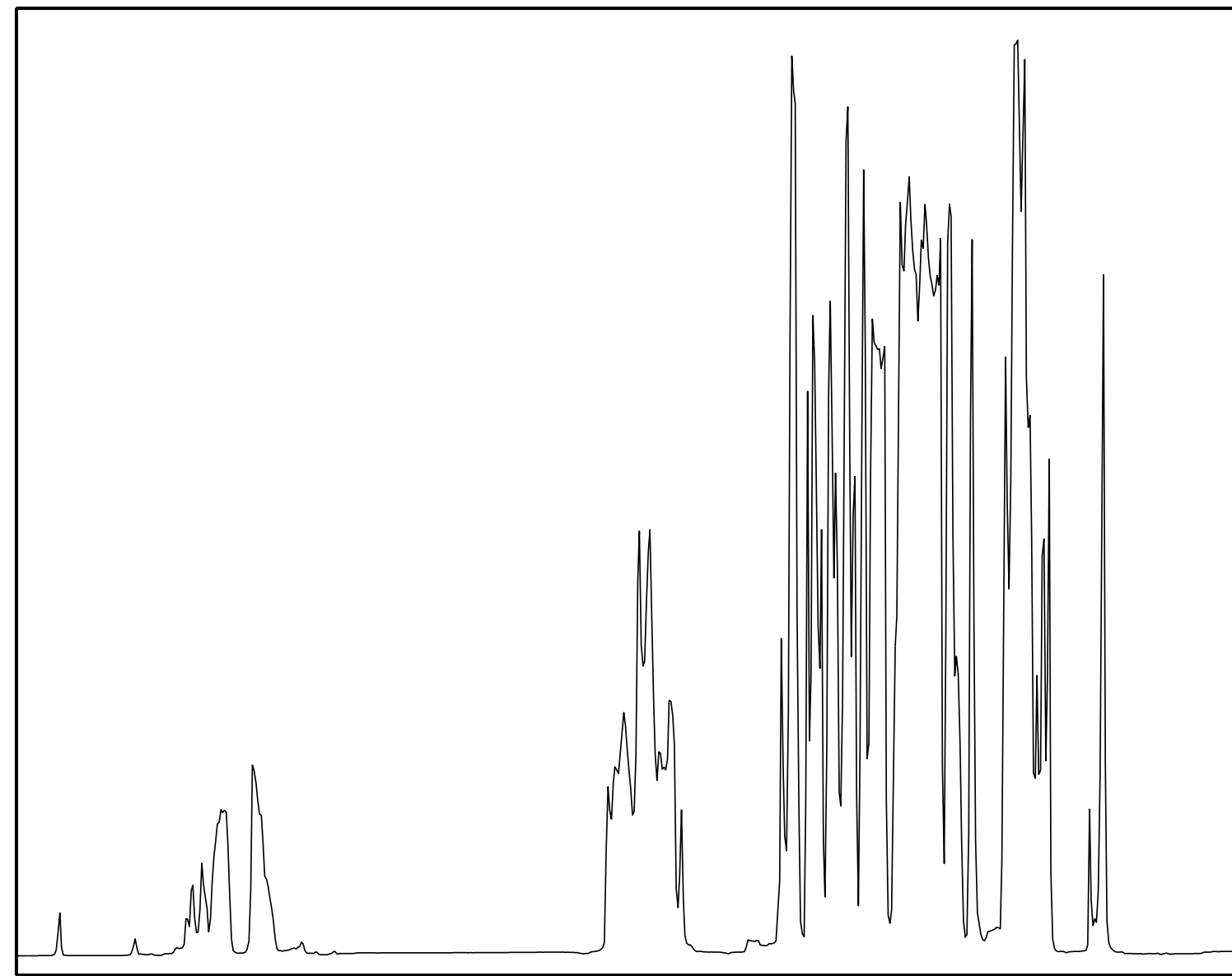


Log-signal HDR

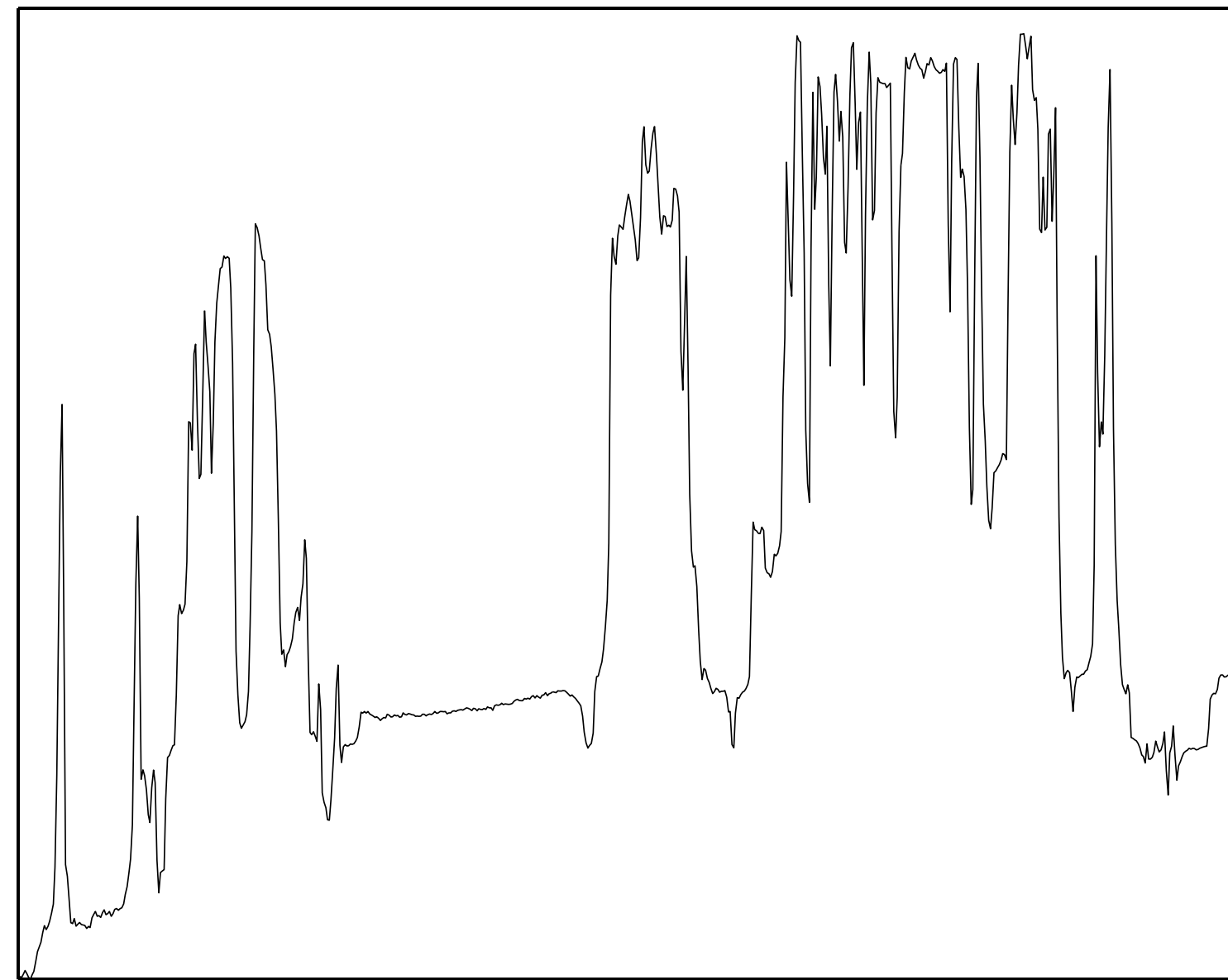


Dérivée du log-signal

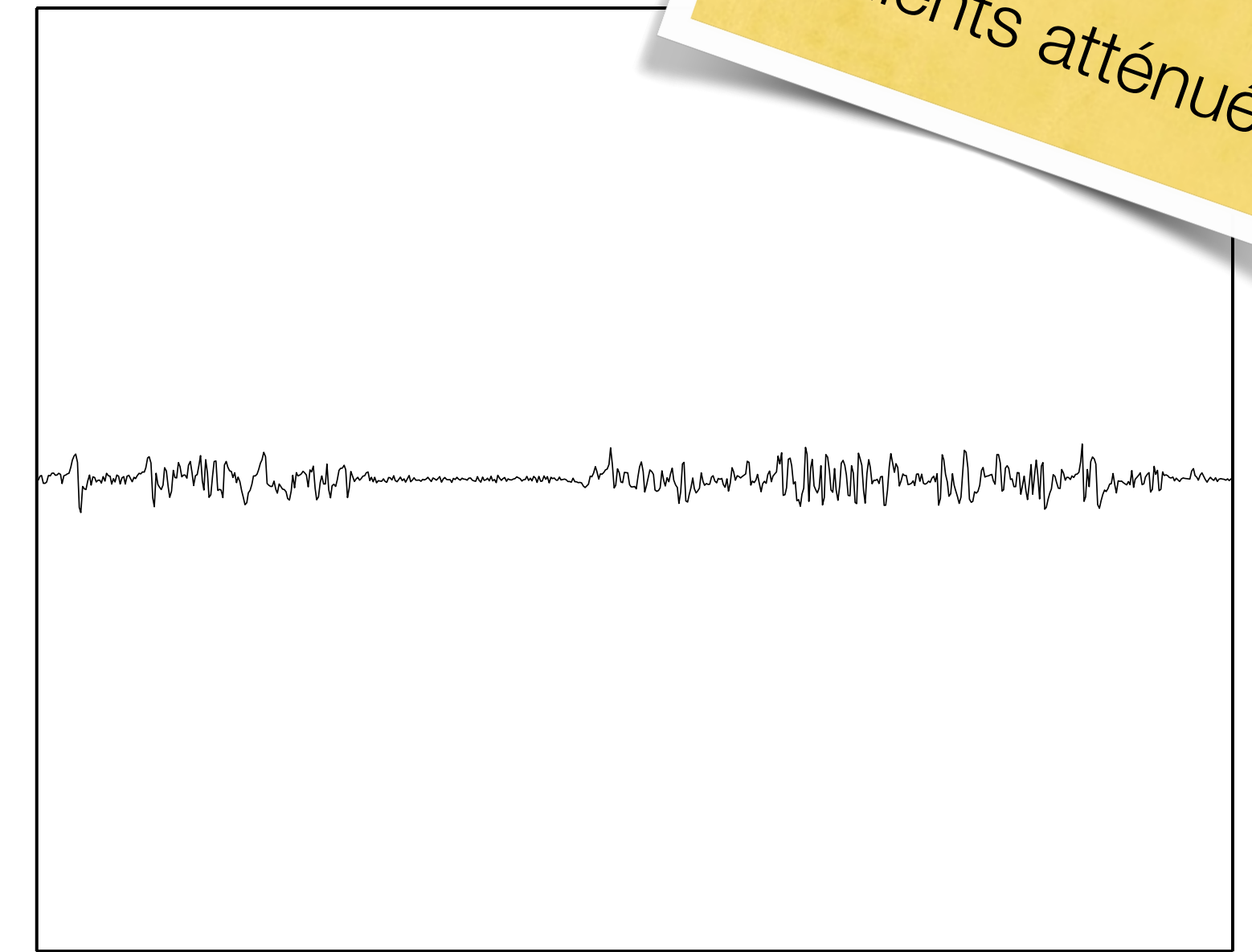
Idée 3 : utiliser les gradients



Signal HDR



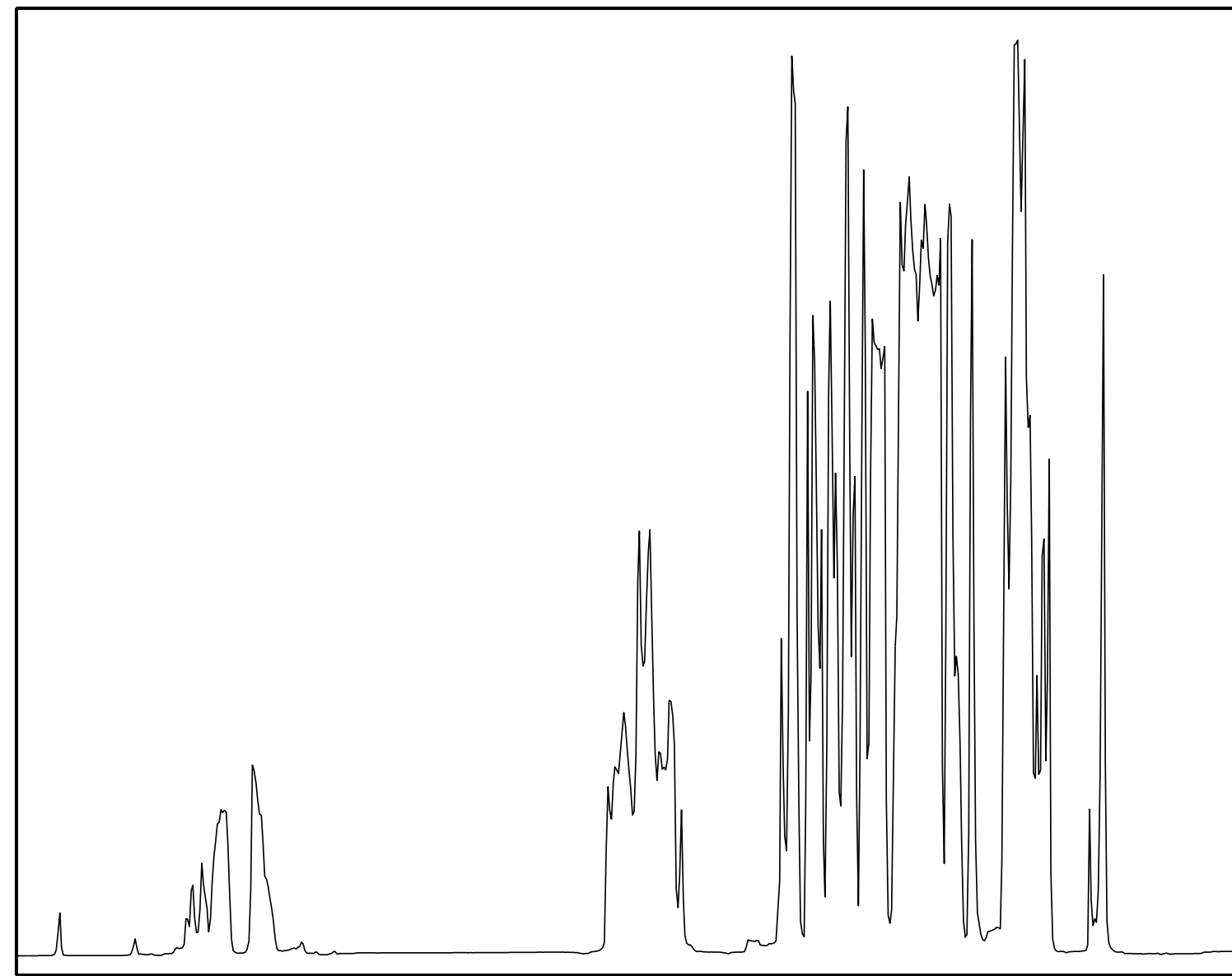
Log-signal HDR



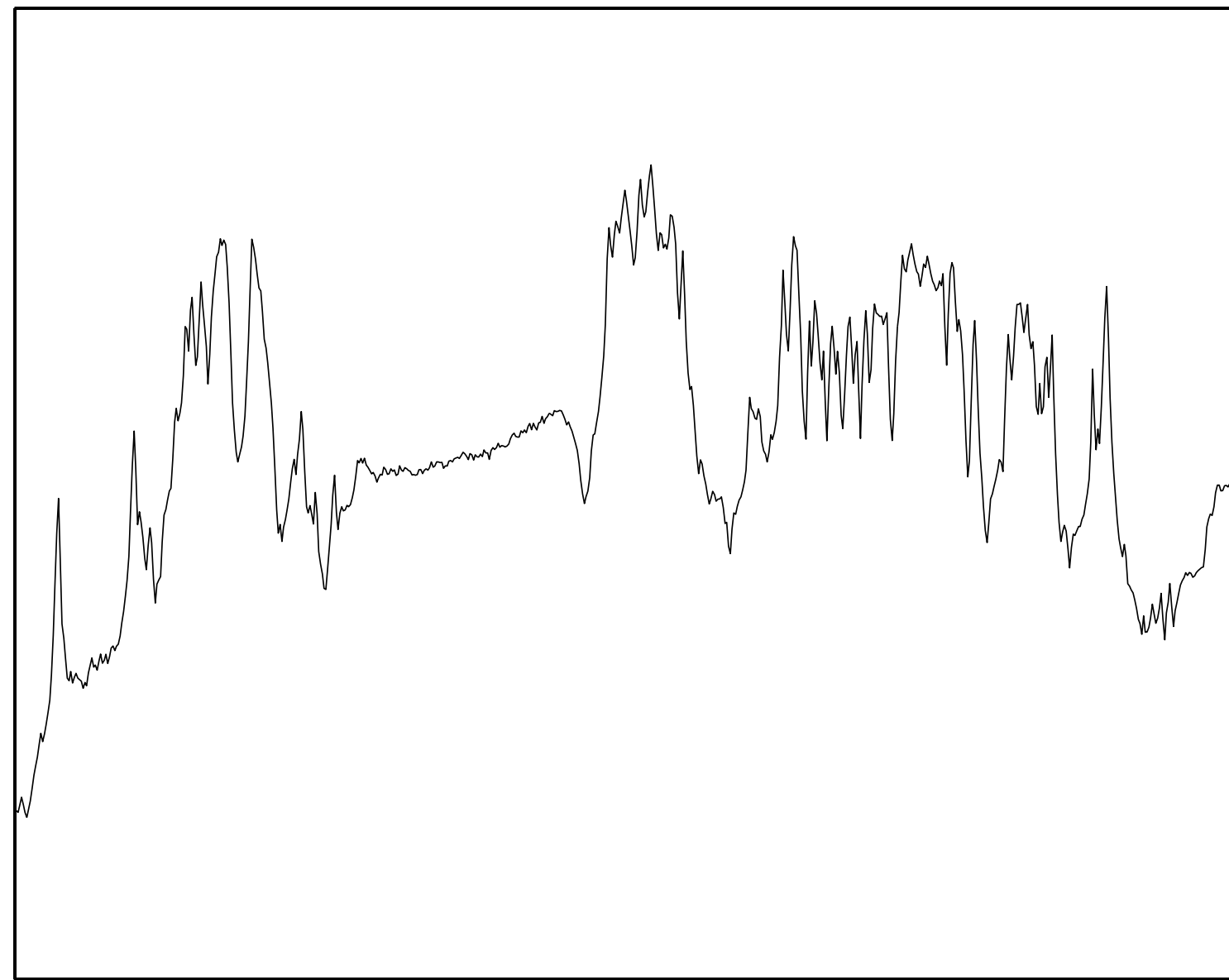
Dérivée du log-signal

Gradients atténués!

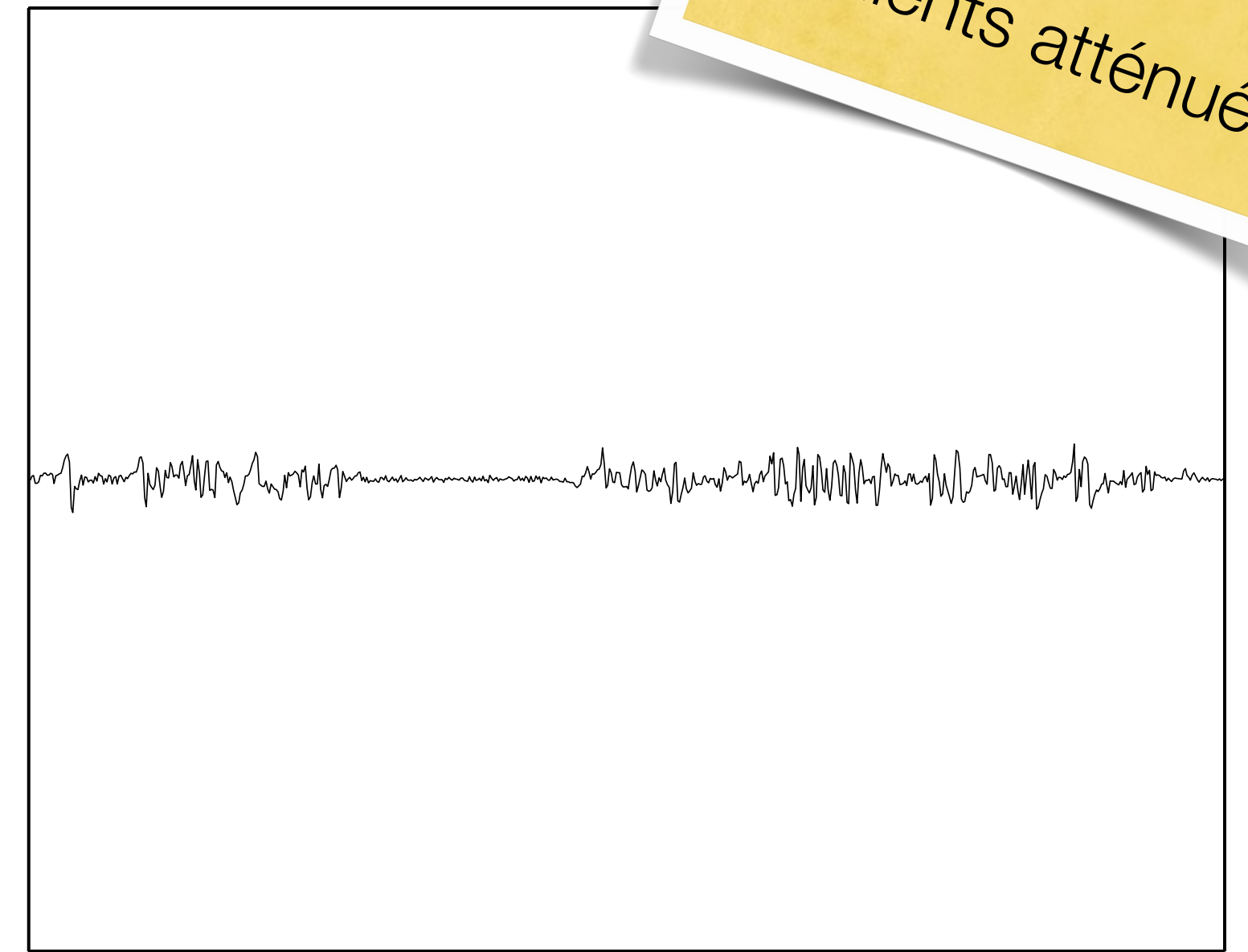
Idée 3 : utiliser les gradients



Signal HDR



Signal reconstruit!

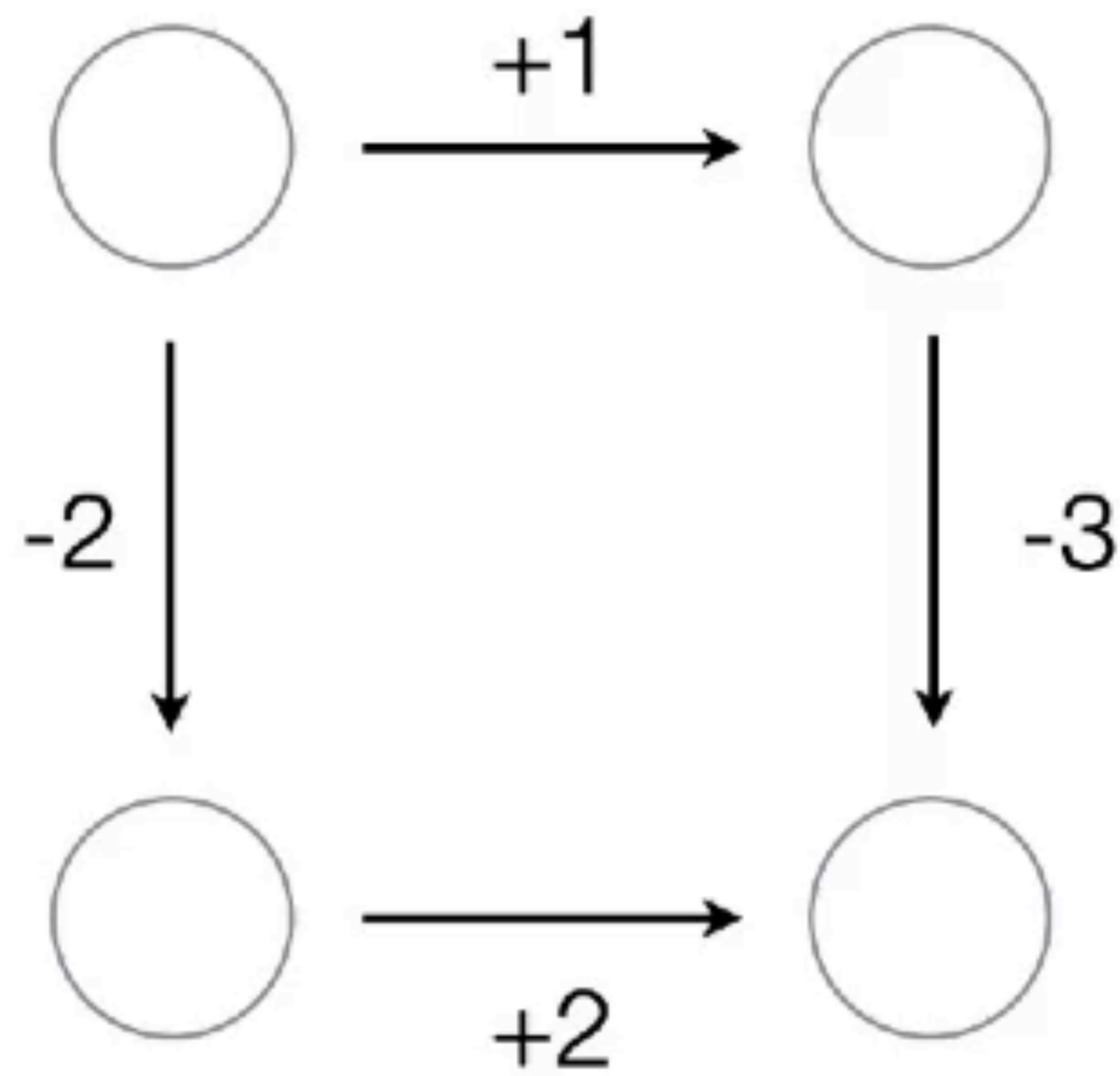


Dérivée du log-signal

Gradients atténués!

En 2D? Pas si facile...

Rappel!



Perceptuel (Reinhard et al.)



Filtre bilatéral (Durand et Dorsey)



Gradients (Fattal et al.)



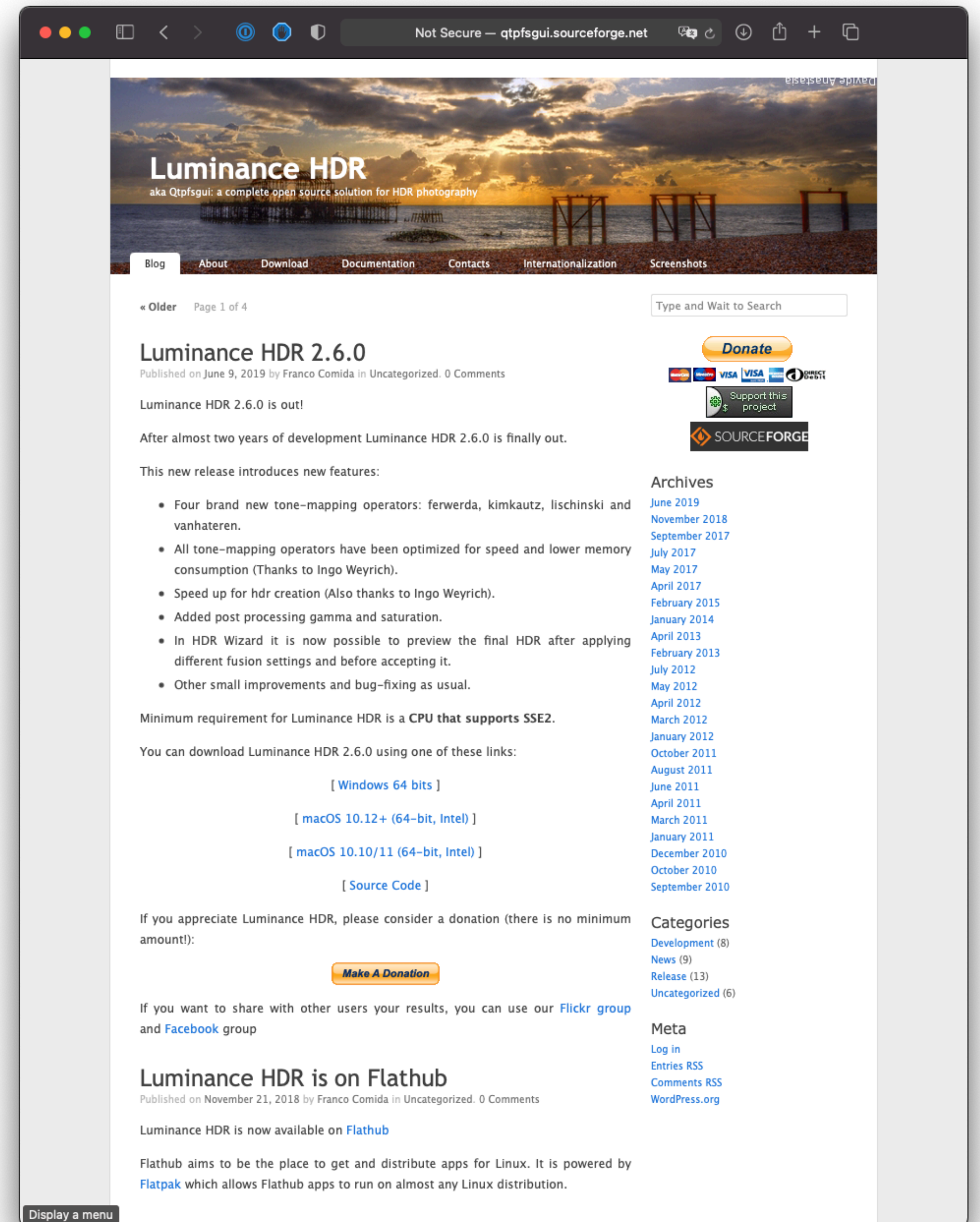


Mais n'en mettez pas trop!



Luminance HDR

- Visualiser HDR
- Expérimenter avec opérateurs de reproduction tonale



Mode HDR?



Mode HDR?

