

Master Sciences de l'Ingénieur  
**Ingénierie des Systèmes Intelligents  
(ISI)**

Sorbonne Université

---

Vision Bio-Inspirée  
**Compte-Rendu TP : Caractérisation de  
capteurs optiques**

---

**Étudiants (Groupe A+B) :**

Edouard Aboudaoud  
Massin Assoul  
Jessy Azizi  
Haitem Bensalah  
Amir Wail Bouhedja  
Tony Cao  
Benjamin Dukatar  
Mohamed Mammeri



Année académique 2024-2025

# 1 Introduction

Dans ce rapport, on essaye d'étudier la réponse spectrale et d'analyser le bruit (spécialement temporel et spatial) d'un capteur d'image type CMOS ou CCD. Les expériences sont faites avec le logiciel Synergie, avec tout l'équipement nécessaire pour mesurer.

## Comment Reconnaître un Capteur CMOS ou CCD ?

On peut différencier les capteurs CMOS des capteurs CCD juste en regardant leurs caractéristiques physiques et la construction :

- **Capteur CMOS :**
  - Les capteurs CMOS intègrent des circuits analogiques et numériques directement sur la matrice des pixels, ce qui rend leur structure plus complexe et visuellement encombrée.
  - Leur conception compacte inclut souvent des composants électroniques directement autour de la matrice.
- **Capteur CCD :**
  - Les capteurs CCD présentent une structure plus épurée, car les circuits associés sont situés à l'extérieur de la matrice.
  - Leur surface peut être réfléchissante, souvent métallisée, en raison des matériaux spécifiques utilisés dans leur fabrication.
- **Positionnement sur le marché :**
  - Les capteurs CCD sont majoritairement utilisés dans les caméras haut de gamme nécessitant une qualité d'image supérieure.
  - Les capteurs CMOS sont largement répandus dans les technologies modernes grâce à leur faible coût et leur polyvalence.

## Comment Reconnaître un Capteur noir/Blanc et de couleur ?

- **Capteur Noir/Blanc :** Les capteurs noir et blanc CMOS et CCD utilisent une matrice de photodétecteurs pour convertir la lumière en signal électrique.
- **Capteur Couleur :** Pour les capteurs couleur CMOS et CCD, une matrice de photodétecteurs est également utilisée, mais chaque photodétecteur capte uniquement une composante de couleur (rouge, vert ou bleu) grâce à un filtre de Bayer superposé à la matrice. Pour éviter les interférences dues au proche infrarouge, qui pourrait être capté par les photodétecteurs et altérer la fidélité des couleurs, un filtre passe-bas infrarouge est généralement ajouté à la lentille du capteur.

# 2 Etude de la réponse spectrale du détecteur et de la caméra

## 2.1 Détecteur Calibré et Réponse Spectrale

Avec le détecteur calibré, on mesure un courant  $I_1(\lambda)$  en ampères (A) et la réponse spectrale  $R_{dc}(\lambda)$  est en (A/W). On fait pareil pour la tension  $V_1(\lambda)$  mesurée en volts (V), avec une réponse spectrale en (V/W). On utilise une diode en silicium type UDS100.

## 2.2 Mesures avec le banc de test

Le banc de test illustré est conçu pour mesurer la réponse d'un capteur sous test à une lumière monochromatique. La source lumineuse émet de la lumière qui est dirigée vers un monochromateur, lequel sélectionne une longueur d'onde spécifique avant de la transmettre à une sphère intégrante. Cette dernière diffuse la lumière de manière homogène sur sa surface interne, assurant ainsi une mesure uniforme de l'intensité lumineuse sous tous les angles. Le capteur sous test est placé à la sortie de la sphère intégrante, on place aussi un détecteur calibré mesure l'intensité lumineuse émise par la sphère.

Pour effectuer la mesure, nous utilisons le logiciel Synergie pour configurer le banc en fonction de notre expérience. Nous lançons ensuite une mesure en faisant varier la longueur d'onde de 400 nm à 900 nm, par incréments de 10 nm, tout en observant les résultats à l'intérieur de la sphère intégrante. (voir Figure 1 et Annexe).

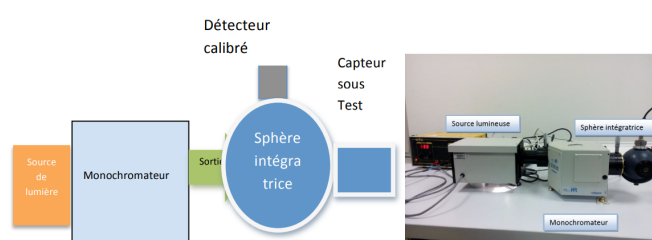


FIGURE 1 – Schéma du banc de mesure.

## 2.3 Prises d'Images

Ensuite, nous positionnons le capteur sur la deuxième sortie de la sphère. À l'aide de *Pixel Cockpit*, nous réglons la caméra et observons l'histogramme. Nous avons observé des interférences de second ordre (voir Figure 2), ce qui nous permet de détecter des couleurs au-delà de 750 nm, donc dans la plage du proche infrarouge, en dehors du spectre visible.

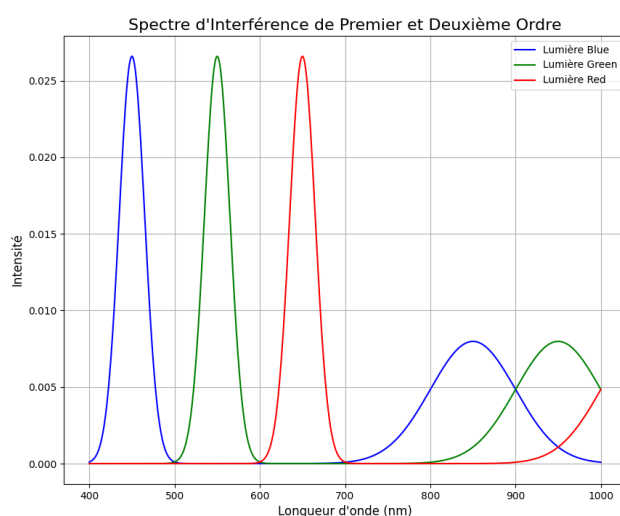


FIGURE 2 – Spectre d'interférence, 1er et 2e ordre pour les lumières bleues, vertes et rouges.

## 2.4 Temps d'Exposition

Nous ajustons les longueurs d'onde dans la plage de [400 nm, 700 nm] et modifions les paramètres pour éviter la saturation. À l'aide de l'histogramme (voir Figure 3), nous effectuons les réglages du temps d'exposition et du Frame Rate de la caméra de manière à avoir le pic centré. Les paramètres sont ensuite sauvegardés dans un fichier `.ini`. Dans notre cas, le pic de réponse se situait autour de 590 nm.

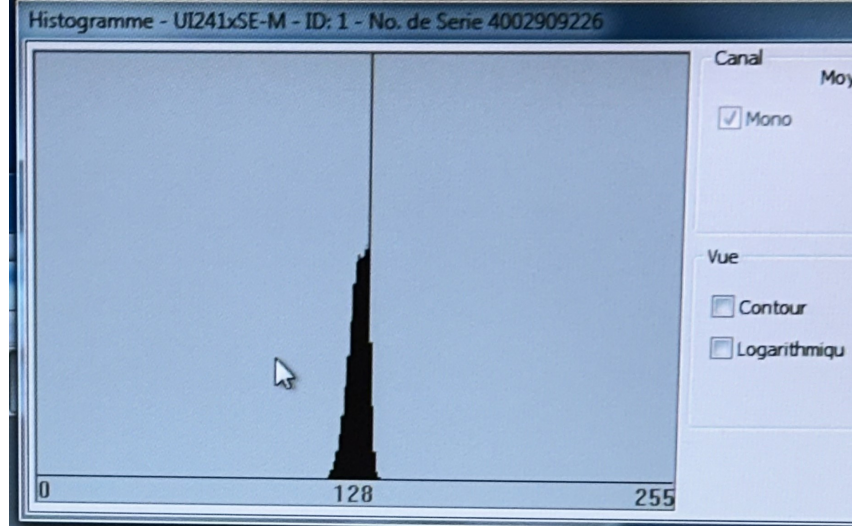


FIGURE 3 – Histogramme typique d'une image.

## 2.5 Mesures de la Réponse Spectrale

Une fois les paramètres de la caméra et du banc de test initialisés, environ 30 images sont enregistrées pour chaque longueur d'onde dans l'intervalle [400 nm - 750 nm] avec un pas de 10 nm. De plus, avec le logiciel Synergie, le courant mesuré par le détecteur est enregistré, ce qui permet de calculer ensuite la puissance lumineuse. Ces données, combinées aux images, permettront de déterminer la réponse spectrale de la caméra.

Tout d'abord, avec un premier algorithme, on récupère les mesures de courant pour tracer la puissance lumineuse en sortie de la sphère,  $\Phi_{\text{sortie } 1}(\lambda) = \frac{I_1(\lambda)}{R_{\text{dc\_UDS100}}(\lambda)}$  (voir la Figure 4).

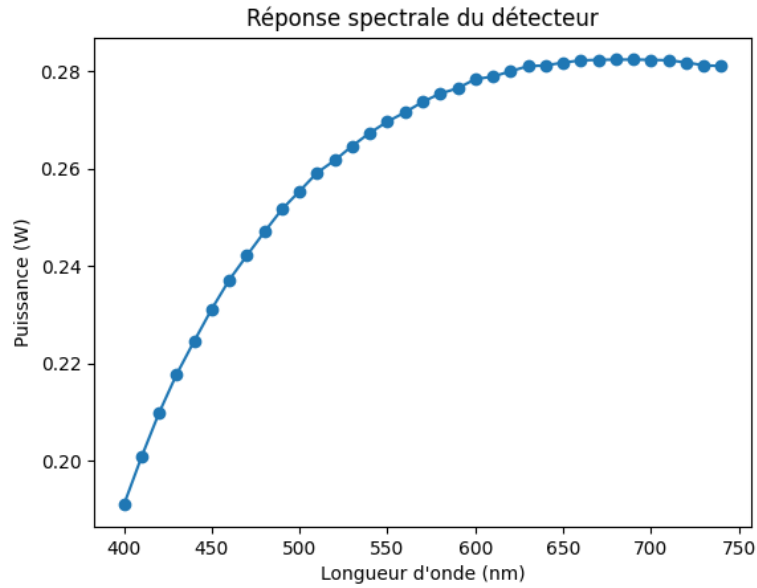


FIGURE 4 – Puissance lumineuse (détecteur calibré) vs longueur d’onde.

On observe que la puissance augmente d’abord de 400 nm à 650 nm, puis se stabilise autour de 700 nm.

Ensuite, on calcule la moyenne des images pour chaque longueur d’onde et on affiche la réponse spectrale de la caméra en fonction de la longueur d’onde (voir la Figure 5).

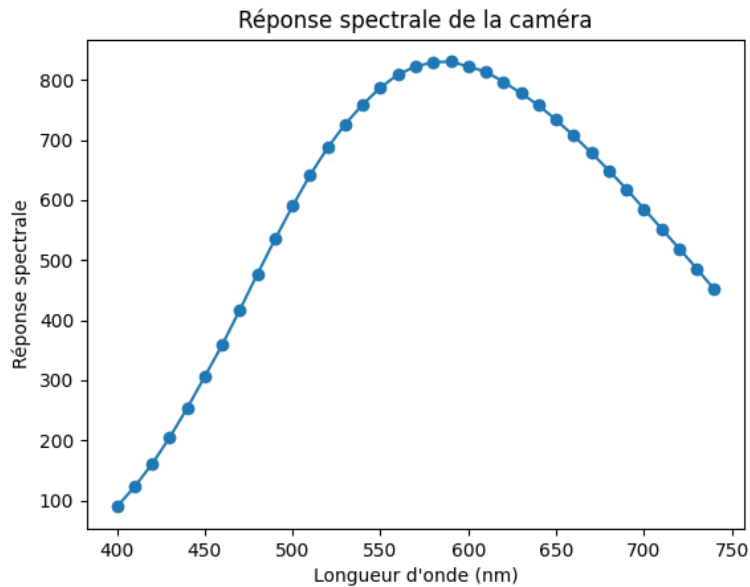


FIGURE 5 – Courbe de la puissance lumineuse en fonction de la longueur d’onde de la caméra.

On observe que la caméra présente une réponse particulièrement marquée dans la plage de longueurs d’onde comprises entre 550 nm et 600 nm, correspondant à la lumière verte. Cette sensibilité accrue dans cette gamme spectrale est typique des capteurs qui

sont optimisés pour capturer efficacement la lumière visible, en particulier dans la région du spectre où l'œil humain est le plus sensible.

La sensibilité diminue dans les régions infrarouges en raison de limitations physiques de l'absorption des photons dans les matériaux semi-conducteurs. La décroissance indique également que la caméra n'est pas conçue pour capturer des détails précis dans l'infrarouge.

### 3 Étude du Bruit

Dans cette partie, nous étudierons le bruit temporel et spatial de notre caméra avec notre banc de test.

On effectue des réglages sur les fentes d'entrée et de sortie du monochromateur et aussi des réglages sur le temps d'exposition de la caméra comme précédemment. Ensuite, on enregistre une centaine d'image à l'entrée de la sphère.

#### 3.1 Valeurs Moyennes et Bruits

Pour visualiser le bruit temporel, on trace la valeur d'un pixel en fonction du temps pour voir son évolution (cf. Figure 6).

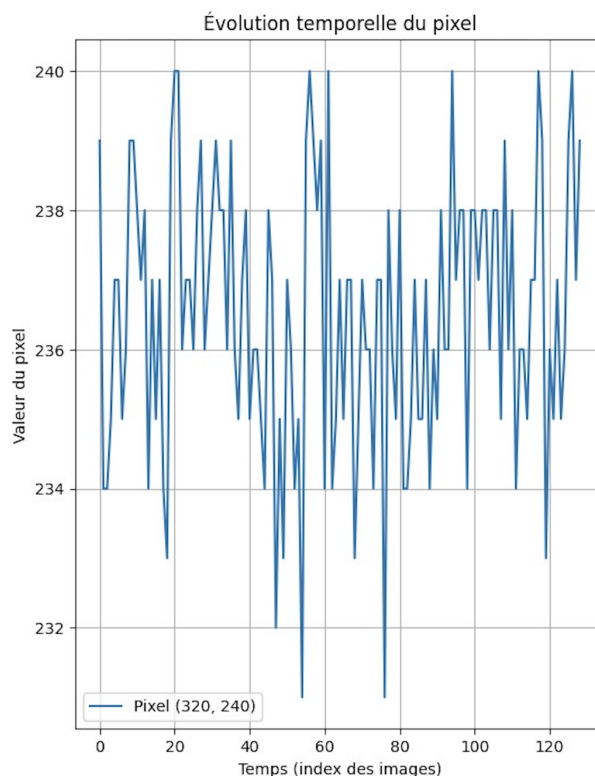
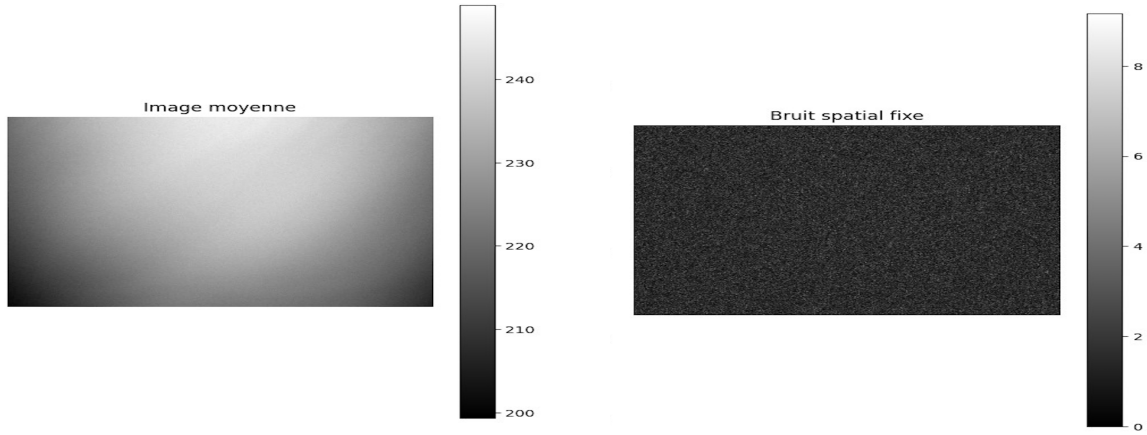


FIGURE 6 – Valeur d'un pixel dans le temps (bruit temporel).

La valeur du pixel sélectionné présente des variations de l'ordre de  $\pm 10$ , ce qui constitue une fluctuation significative. Bien que ces variations puissent être dues au bruit électronique ou à d'autres facteurs externes, elles sont suffisamment marquées pour influencer les mesures. Cela souligne l'importance de procéder à des ajustements et à des

moyennes sur plusieurs images pour minimiser l'impact de ces variations et obtenir des résultats plus fiables.

Pour traiter le bruit spatial, nous créons une nouvelle image correspondant à la moyenne des 100 images (cf. Figure 7a). Ensuite, nous soustrayons cette image de moyenne à une image de référence afin d'extraire le bruit spatial fixe (cf. Figure 7b).



(a) Image moyenne.

(b) Bruit spatial fixe.

L'image montre une intensité moyenne, calculée pour chaque pixel à partir de 100 captures d'images. On peut voir des motifs fixes qui correspondent à ce qu'on appelle le bruit spatial. Le bruit spatial est dû à des différences dans la sensibilité des pixels.

Cette méthode permet de mettre en évidence les variations de bruit qui ne changent pas au fil du temps, facilitant ainsi l'analyse des défauts ou irrégularités qui pourraient être présents dans les images. En isolant ce bruit, nous pouvons mieux comprendre ses caractéristiques et prendre des mesures pour le réduire ou l'atténuer dans les analyses ultérieures.

Malgré la présence du bruit, il est possible de reconstruire une image 3D qui met en évidence la forme de la sphère placée devant la caméra.

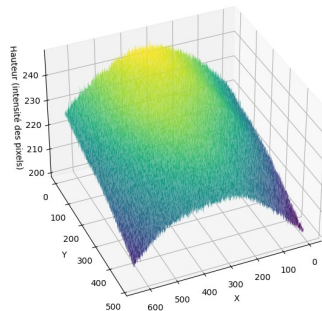


FIGURE 8 – Image Moyenne 3D.

## 4 Conclusion

Au cours de cette étude, nous avons analysé la réponse spectrale d'un capteur à différentes longueurs d'onde en utilisant un banc de test dédié. Nous avons d'abord procédé à la mesure de l'intensité lumineuse à travers un monochromateur, en ajustant les paramètres de la caméra et du détecteur pour minimiser les erreurs liées au bruit temporel et spatial. En traitant les images obtenues, nous avons pu atténuer le bruit à l'aide de moyennes et de soustractions d'images de référence, permettant ainsi une reconstruction précise de l'image 3D de l'objet observé.

Cette étude démontre l'importance de la calibration et du traitement d'images pour garantir des mesures fiables et précises dans les systèmes de détection optique.



## Annexe : Table des longueurs d'onde et observations

| Wavelength (nm) | Observation              |
|-----------------|--------------------------|
| 400             | Violet                   |
| 410             | Violet clair             |
| 420             | Violet/Bleu              |
| 430             | Bleu foncé               |
| 440             | Bleu                     |
| 450             | Bleu                     |
| 460             | Bleu/Bleu ciel           |
| 470             | Cyan/Turquoise           |
| 480             | Presque vert             |
| 500             | Vert                     |
| 510             | Vert clair               |
| 520             | Jaune clair              |
| 530             | Jaune                    |
| 540             | Jaune foncé              |
| 550             | Jaune/Orange             |
| 560             | Orange clair             |
| 570             | Orange                   |
| 580             | Orange foncé             |
| 590             | Orange coucher de soleil |
| 600             | Orange                   |
| 610             | Rouge léger              |
| 620             | Rouge                    |
| 630             | Rouge                    |
| 640             | Rouge flamme             |
| 650             | Rouge/Bordeaux           |
| 660             | Rouge/Bleu               |
| 670             | Rouge/Bleu               |
| 680             | Presque bleu             |
| 690             | Rose foncé               |
| 700             | Rose foncé               |
| 710             | Rose vers violet         |
| 720             | Rose vers violet         |
| 730             | Rose vers violet         |
| 740             | Violet                   |
| 750             | Violet (presque éteint)  |
| 760             | Violet (presque éteint)  |
| 770             | Violet (presque éteint)  |
| 780             | Violet (presque éteint)  |
| 790             | Violet (presque éteint)  |