

**le thème de la journée du mardi 13/06/2023:  
“La spectroscopie proche-infrarouge. Comment bien mesurer ?”**

Ryad Bendoula & équipe COMiC (Daphné, Silvia, Florent, Jean Michel, Arnaud, Maxime, Belal, Shérif)

Unité Mixte de Recherche

**ITAP**

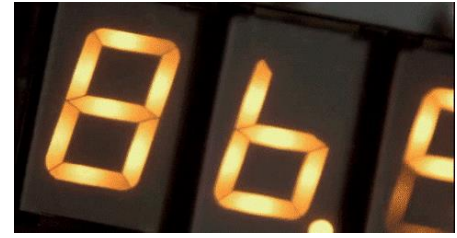
Technologies & méthodes  
pour les agricultures  
de demain

INRAE - Montpellier SupAgro



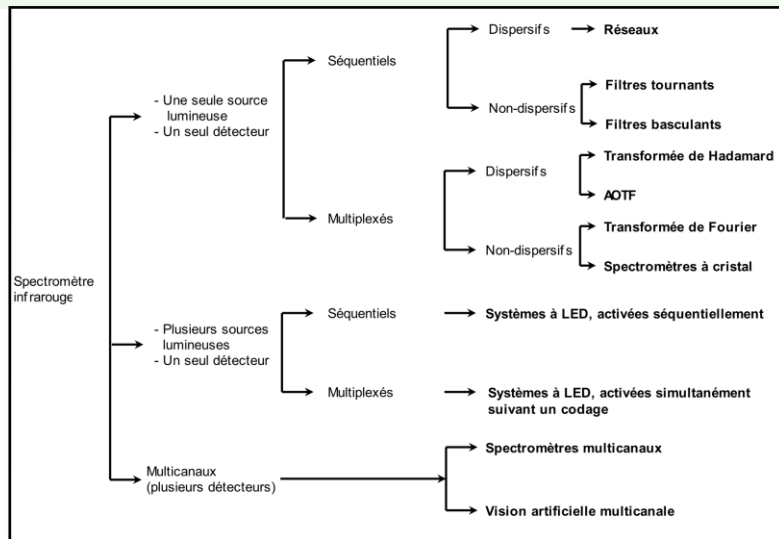
27 novembre 2012: 13<sup>ème</sup> rencontres

“La métrologie de la spectrométrie PIR – mieux mesurer les spectres”

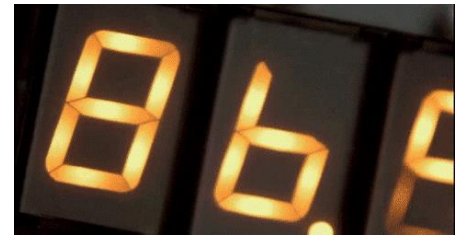


# Conception des spectromètres proche infrarouge

Dominique Bertrand  
**data\_frame**



27 novembre 2012: 13<sup>ème</sup> rencontres  
 “La métrologie de la spectrométrie PIR – mieux mesurer les spectres”



# Conception des spectromètres proche infrarouge

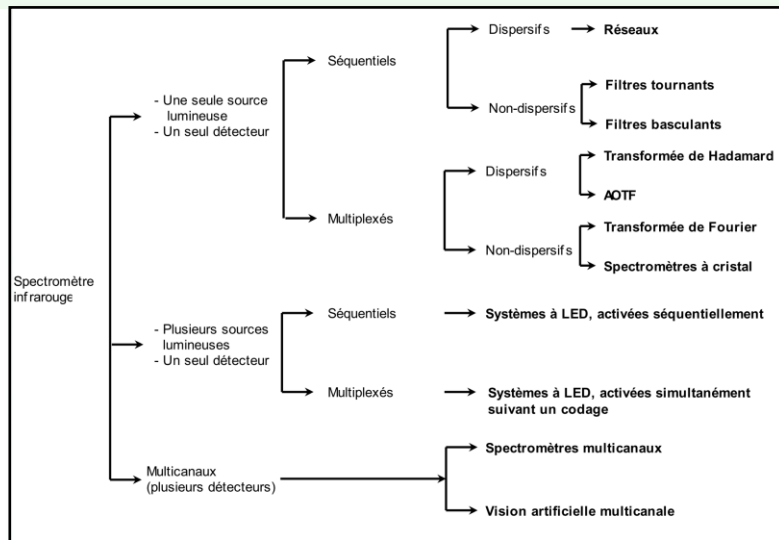
Dominique Bertrand  
**data\_frame**

+

## 2 présentations:

**Sarah Bellini:** Adding /doubling : une première méthode de mesure d'un spectre pour séparer l'absorption et la diffusion

**Fabien Chauchard :** SRS-TRS : d'autres méthodes de mesure d'un spectre pour séparer l'absorption et la diffusion



**Spatially Resolved Spectroscopy (SRS - 1989)**

**Retro-diffusion Measurements**

**Transmission Measurements**

**Signal**

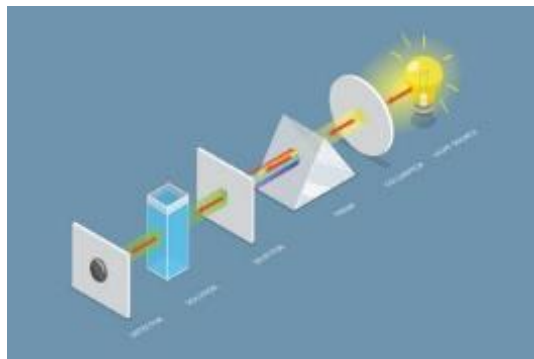
**Spectrum (nm)**

**Positions**

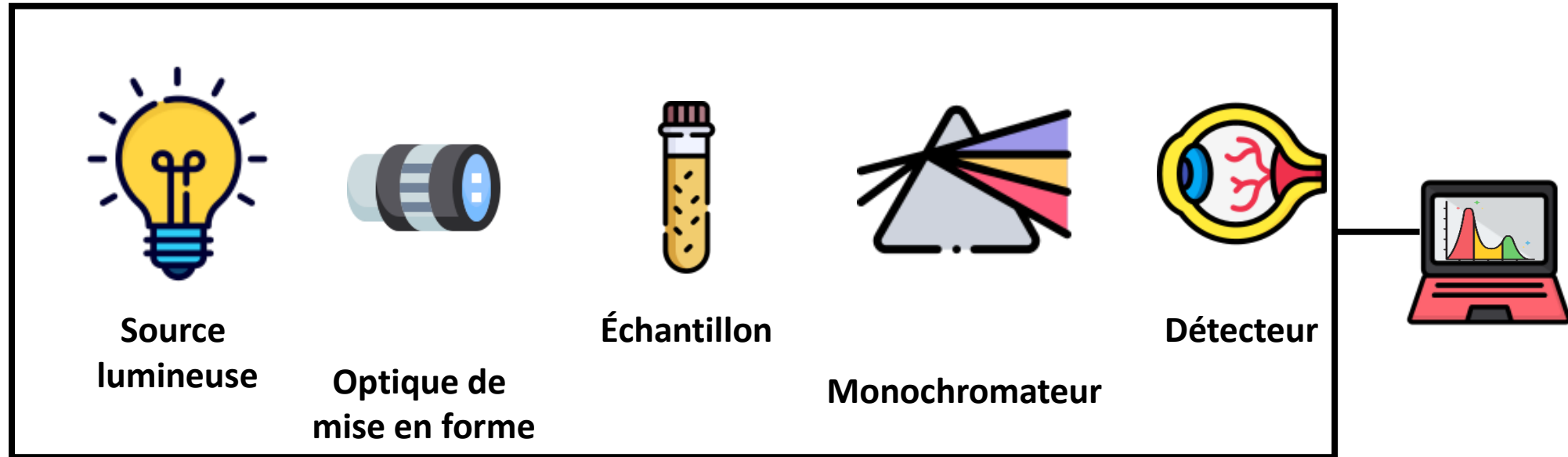
- SRS :
  - Measurements at different distances
  - Measurement in transmission and reflection
- Main benefits for :
  - Scattering products
  - Heterogeneous Products, e.g. multi-layered/ coated products

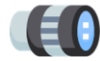
**le thème de la journée du mardi 13/06/2023:  
“La spectroscopie proche-infrarouge. Comment bien mesurer ?”**

**Une des pistes: mieux connaitre son équipement et ces limites!**



# Éléments constitutifs d'un spectromètre optique





## Quelques exemples de sources lumineuses

	HPX-2000	DH-IDIL	DH-2000	HL-2000		
Bulb	Xenon	Deuterium (D), Tungsten Halogen (W)		Tungsten Halogen		
Output mode	Continuous	Continuous		Continuous		
Spectral range	185-2000 nm	215-2500 nm		350-2500 nm		
Nominal bulb power	75W	3.8W (D) 1.2W (W)	25W (D) 20W (W)	4.75W (LL) 20W (HP)		
Typical output power	6.13mW	0.2 $\mu$ W (D) 7 $\mu$ W (W)	194 $\mu$ W (D) 615 $\mu$ W (W)	4.7mW (LL) 8.8mW (HP)		
Optical shutter	Yes	Yes		Option		
Life time	2000 hours	1500 hours	1000 hours	1500 hours		
Size	14.5 x 16.5 x 26 mm	180 x 103 x 53 mm	150 x 135 x 319 mm	62 x 60 x 150 mm		
Weight	6kg	570g	3.8kg	0.5kg		



## Quelques exemples de sources lumineuses



	HPX-2000	DH-IDIL	DH-2000	HL-2000		
Bulb	Xenon	Deuterium (D), Tungsten Halogen (W)		Tungsten Halogen		
Output mode	Continuous	Continuous		Continuous		
Spectral range	185-2000 nm	215-2500 nm		350-2500 nm		
Nominal bulb power	75W	3.8W (D) 1.2W (W)	25W (D) 20W (W)	4.75W (LL) 20W (HP)		
Typical output power	6.13mW	0.2 $\mu$ W (D) 7 $\mu$ W (W)	194 $\mu$ W (D) 615 $\mu$ W (W)	4.7mW (LL) 8.8mW (HP)		
Optical shutter	Yes	Yes		Option		
Life time	2000 hours	1500 hours	1000 hours	1500 hours		
Size	14.5 x 16.5 x 26 mm	180 x 103 x 53 mm	150 x 135 x 319 mm	62 x 60 x 150 mm		
Weight	6kg	570g	3.8kg	0.5kg		

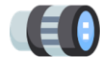


## Quelques exemples de sources lumineuses



	HPX-2000	DH-IDIL	DH-2000	HL-2000		
Bulb	Xenon	Deuterium (D), Tungsten Halogen (W)		Tungsten Halogen		
Output mode	Continuous	Continuous		Continuous		
Spectral range	185-2000 nm	215-2500 nm		350-2500 nm		
Nominal bulb power	75W	3.8W (D) 1.2W (W)	25W (D) 20W (W)	4.75W (LL) 20W (HP)		
Typical output power	6.13mW	0.2 $\mu$ W (D) 7 $\mu$ W (W)	194 $\mu$ W (D) 615 $\mu$ W (W)	4.7mW (LL) 8.8mW (HP)		
Optical shutter	Yes	Yes		Option		
Life time	2000 hours	1500 hours	1000 hours	1500 hours		
Size	14.5 x 16.5 x 26 mm	180 x 103 x 53 mm	150 x 135 x 319 mm	62 x 60 x 150 mm		
Weight	6kg	570g	3.8kg	0.5kg		





## Quelques exemples de sources lumineuses

		HPX-2000	DH-IDIL	DH-2000	HL-2000		
Bulb		Xenon	Deuterium (D), Tungsten Halogen (W)		Tungsten Halogen		
Output mode		Continuous	Continuous		Continuous		
Spectral range		185-2000 nm	215-2500 nm		350-2500 nm		
Nominal bulb power		75W	3.8W (D) 1.2W (W)	25W (D) 20W (W)	4.75W (LL) 20W (HP)		
Typical output power		6.13mW	0.2µW (D) 7µW (W)	194µW (D) 615µW (W)	4.7mW (LL) 8.8mW (HP)		
Optical shutter		Yes	Yes		Option		
Life time		2000 hours	1500 hours	1000 hours	1500 hours		
Size		14.5 x 16.5 x 26 mm	180 x 103 x 53 mm	150 x 135 x 319 mm	62 x 60 x 150 mm		
Weight		6kg	570g	3.8kg	0.5kg		

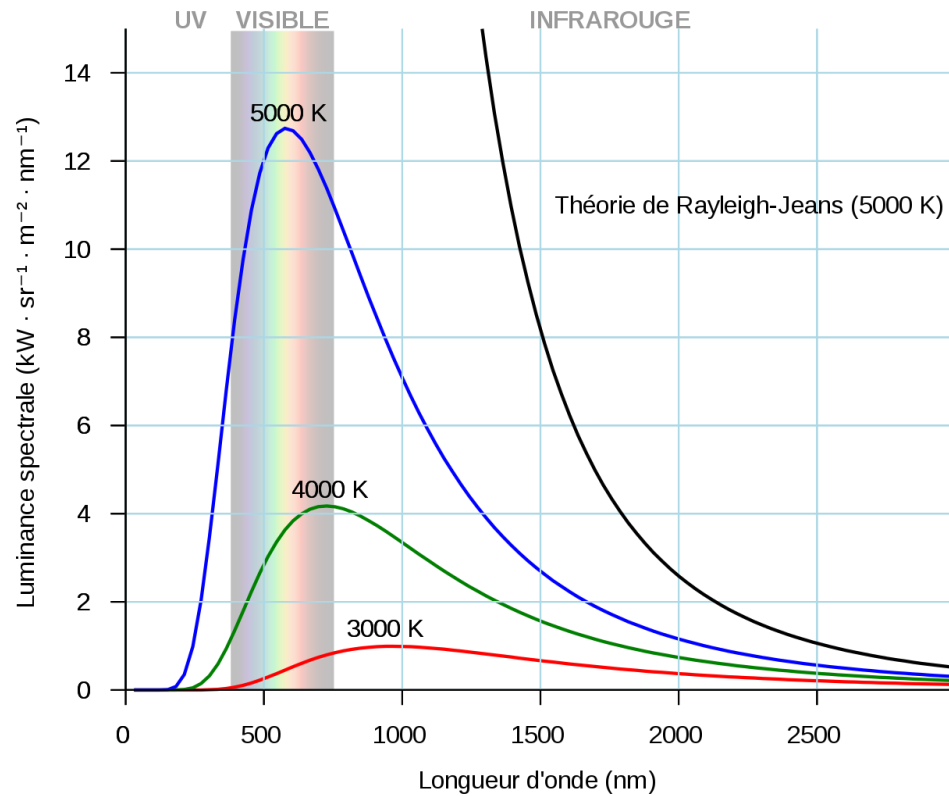


## Quelques exemples de sources lumineuses

		HPX-2000	DH-IDIL	DH-2000	HL-2000		
→ Bulb		Xenon	Deuterium (D), Tungsten Halogen (W)		Tungsten Halogen		
Output mode		Continuous	Continuous		Continuous		
→ Spectral range		185-2000 nm	215-2500 nm		350-2500 nm		
Nominal bulb power		75W	3.8W (D) 1.2W (W)	25W (D) 20W (W)	4.75W (LL) 20W (HP)		
→ Typical output power		6.13mW	0.2μW (D) 7μW (W)	194μW (D) 615μW (W)	4.7mW (LL) 8.8mW (HP)		
Optical shutter		Yes	Yes		Option		
→ Life time		2000 hours	1500 hours	1000 hours	1500 hours		
Size		14.5 x 16.5 x 26 mm	180 x 103 x 53 mm	150 x 135 x 319 mm	62 x 60 x 150 mm		
Weight		6kg	570g	3.8kg	0.5kg		



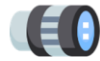
## Choix de la source: Halogène Tungstène



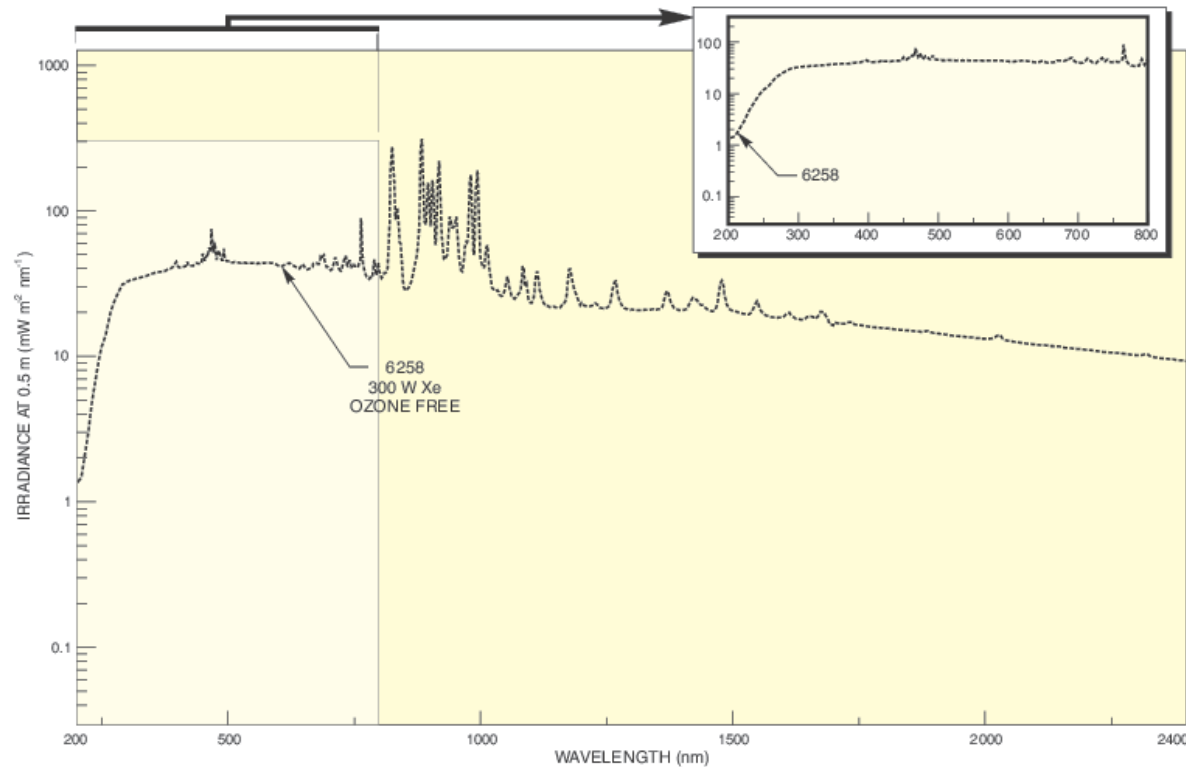
Les +: cout, simplicité d'usage.

Les - : temps de chauffe, rendement avec la mise en forme du signal.

*Fig: Luminance spectrale en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures*



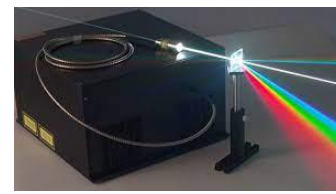
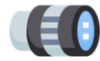
## Choix de la source: Xénon



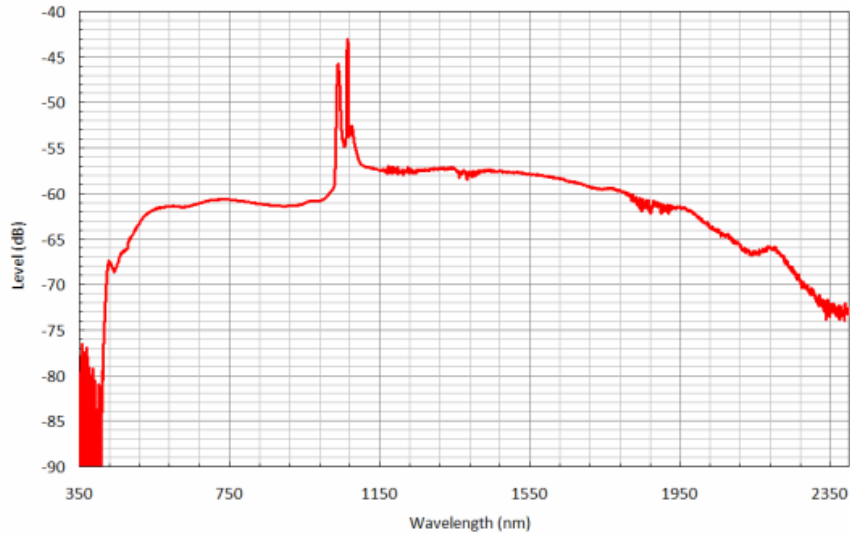
Les + : puissance optique, stabilité.

Les - : cout, complexité d'usage, mise en forme du signal.

*Fig: Irradiance en fonction de la longueur d'onde*



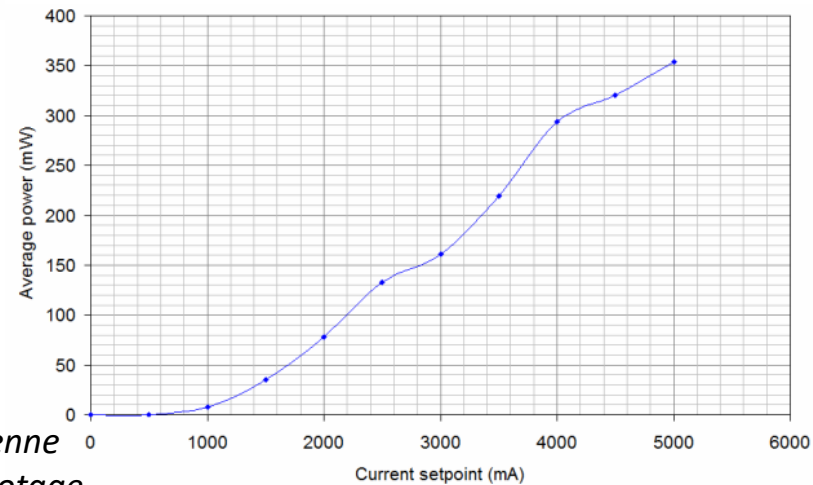
## Choix de la source: supercontinuum (« laser blanc »)



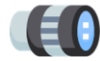
*Fig: Intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde*

Les +: puissance optique, stabilité, mise en forme du signal.

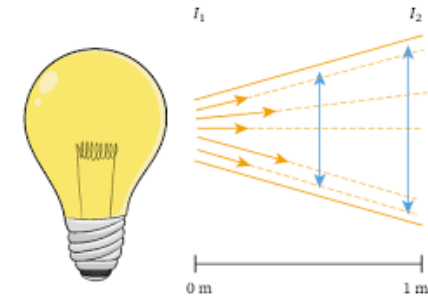
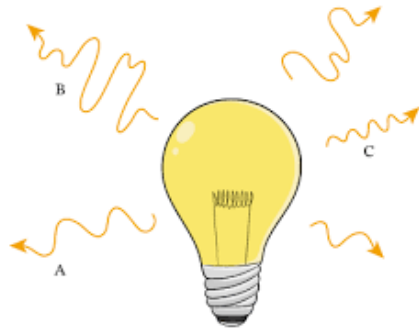
Les - : cout.



*Fig: Intensité lumineuse moyenne en fonction du courant de pilotage*



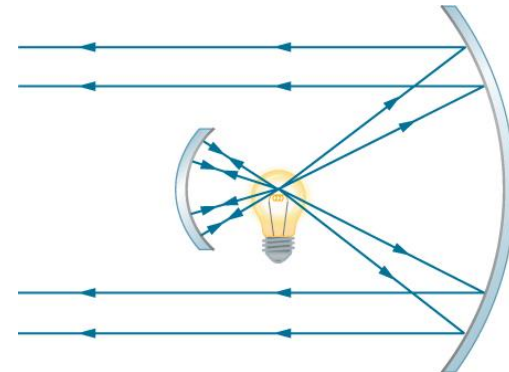
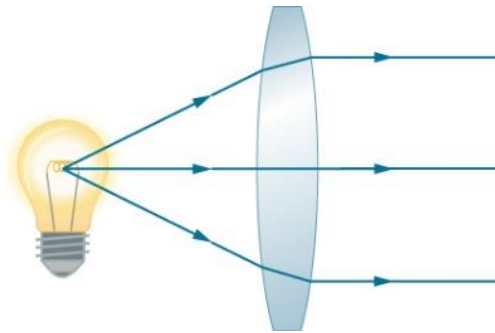
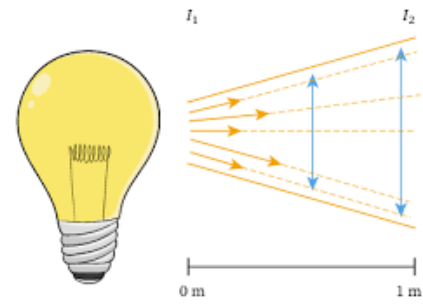
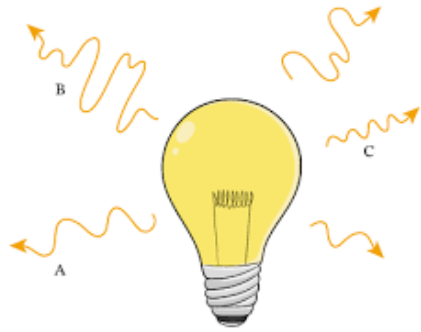
**Mise en forme de la source:**



Emission lumineuse dans toutes les directions



## Mise en forme de la source:







## Modélisation, design, simulation de l'éclairage:

Non-Sequential Component Editor

Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z
1 Source Volume Ellipse				0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2 Aspheric Surface				0.000	0.000	-4.500	0.000	0.000	0.000
3 Lenslet Array 2				0.000	0.000	40.000	0.000	0.000	0.000
4 Detector Rectangle				0.000	0.000	-1.000	0.000	0.000	0.000
5 Lenslet Array 2				0.000	0.000	40.000	0.000	0.000	0.000
6 Standard Lens				0.000	0.000	55.000	0.000	0.000	0.000
7 Detector Rectangle				0.000	0.000	175.000	0.000	0.000	0.000
8 Null Object				0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

2: NSC Shaded Model

5: Detector Viewer: Homog. Plane 2

3: Detector Viewer

Digital Projector Ray's Eye Integrator

Detector 7: NSCG Surface 1: Homog. Plane  
Column Center: X = 0.000E+000  
Peak Illuminance: 1.5621E+003 Lumens/cm^2  
Total Power: 3.2674E+000 Lumens

Zemax OpticStudio 14

Digital Projector Ray's Eye Integrator

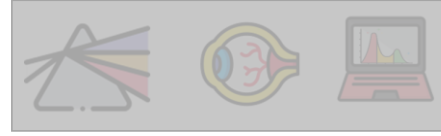
Detector 4: NSCG Surface 1: Barlow Ray's Eye  
Column Center: X = 0.000E+000  
Peak Illuminance: 9.7366E+002 Lumens/cm^2  
Total Power: 7.3561E+000 Lumens

Zemax OpticStudio 14

Digital Projector Ray's Eye Integrator

Configuration 1 of 1



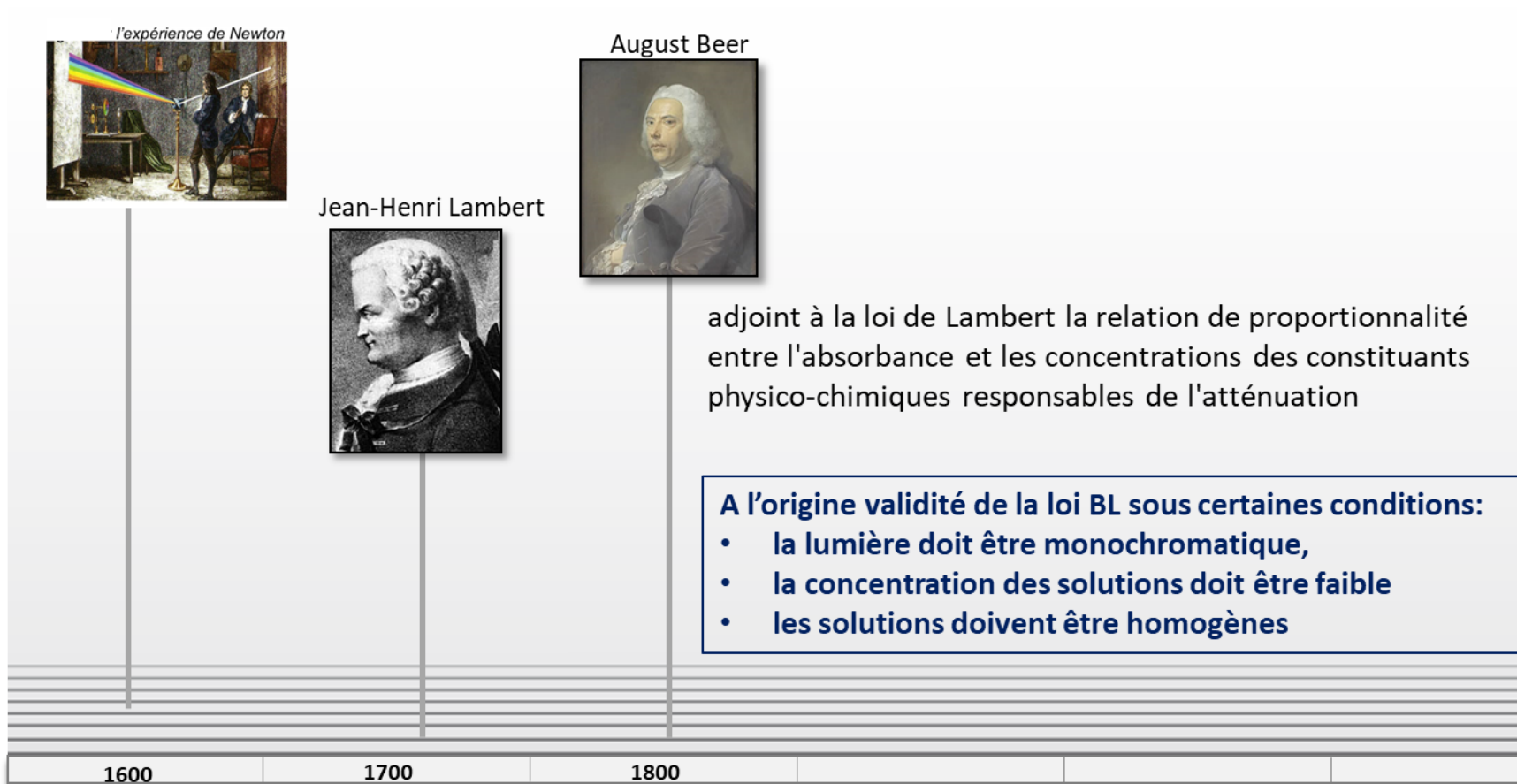


**Échantillon:**



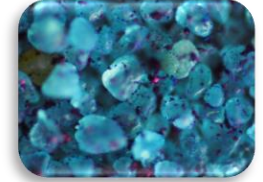
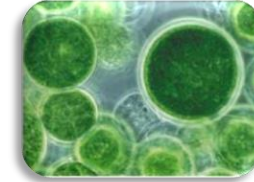
Échantillon:

## Un peu d'histoire sur la spectroscopie d'absorption





## Échantillon:



## Solutions pour se rapprocher des conditions de la loi BL:

- Préparations des échantillons: filtration, homogénéisation...
- Traitements chimiométriques:
  - réduction de ligne de base: dérivés (fct: dtrend) effet additif
  - normalisation: (fct snv, emsc)
  - .....
  - .....



## Échantillon:

Rigoureusement, quel que soit l'échantillon, il faut se rapprocher de la loi de Beer-Lambert

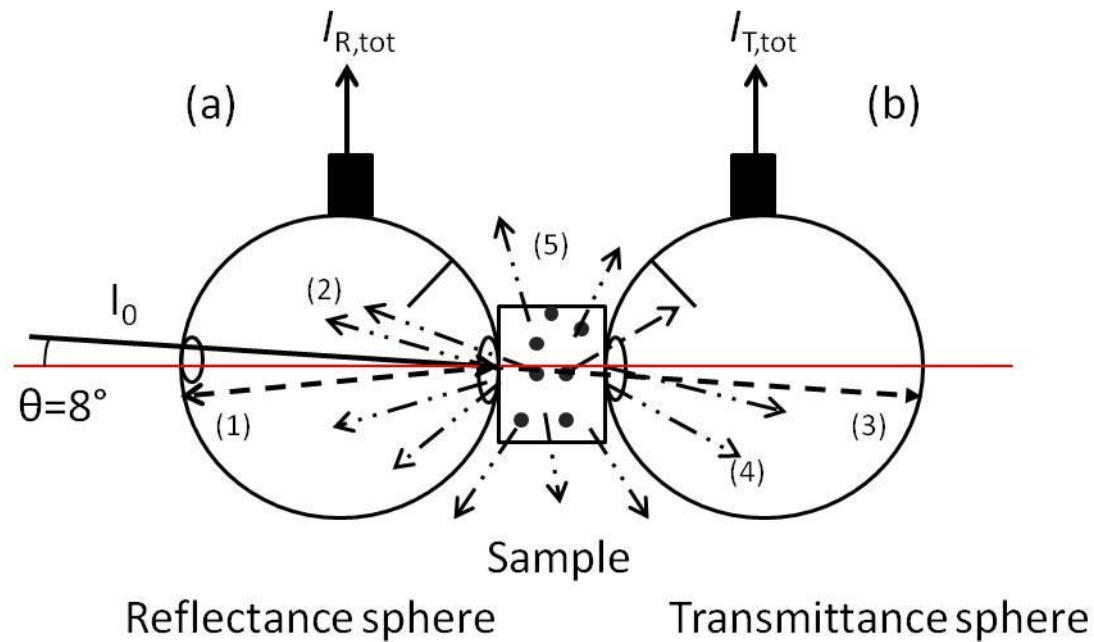
↳ **C'est-à-dire « maximiser » la collecte de la lumière qui n'a pas été absorbée**



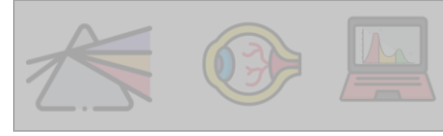
## Échantillon:

Rigoureusement, quel que soit l'échantillon, il faut se rapprocher de la loi de Beer-Lambert

↳ C'est-à-dire « maximiser » la collecte de la lumière qui n'a pas été absorbée



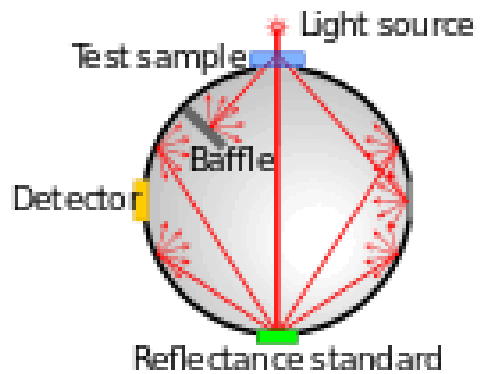
$$R + T + A = 1$$



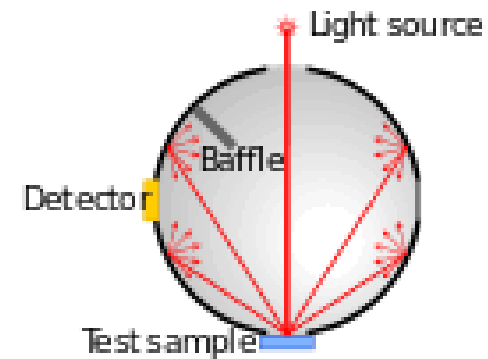
## Échantillon:

Rigoureusement, quel que soit l'échantillon, il faut se rapprocher de la loi de Beer-Lambert

↳ **C'est-à-dire « maximiser » la collecte de la lumière qui n'a pas été absorbée**



Mesure en transmission



Mesure en réflexion



**Petite aparté**: la sphère d'intégration:

\* Luminance en Watts/m<sup>2</sup>/sr en sortie de sphère est égale:

$$L = \frac{\phi_i}{\pi A_s} * \frac{\rho^2}{1 - \rho(1 - f)}$$

où:

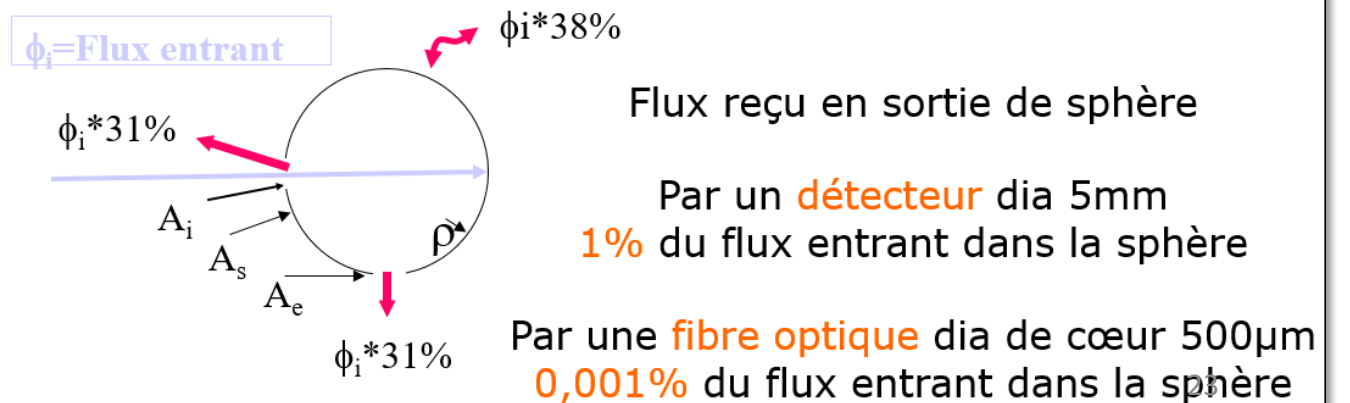
$$f = \left( \frac{A_i + A_e}{A_s} \right)$$

et:  $\rho$  *albedo de la sphère*

## Quelques ordres de grandeur

Sphère de dia 100mm avec 2 ouvertures de dia 25mm

Où va le flux ?

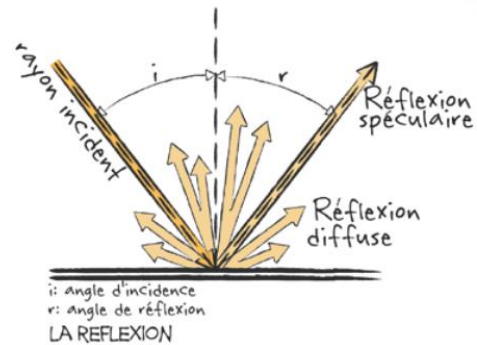
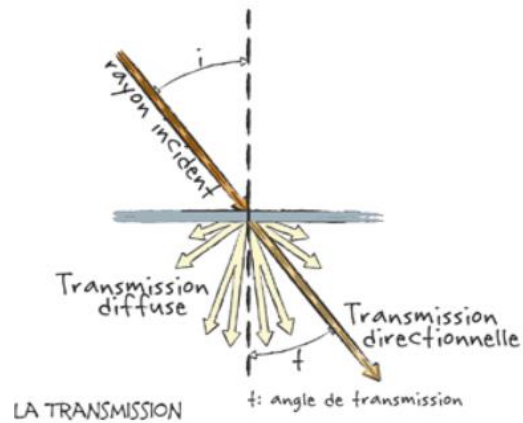




## Échantillon:

Rigoureusement, quel que soit l'échantillon, il faut se rapprocher de la loi de Beer-Lambert

↳ **C'est-à-dire « maximiser » la collecte de la lumière qui n'a pas été absorbée**



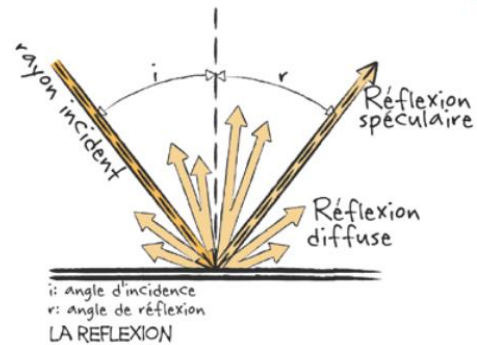
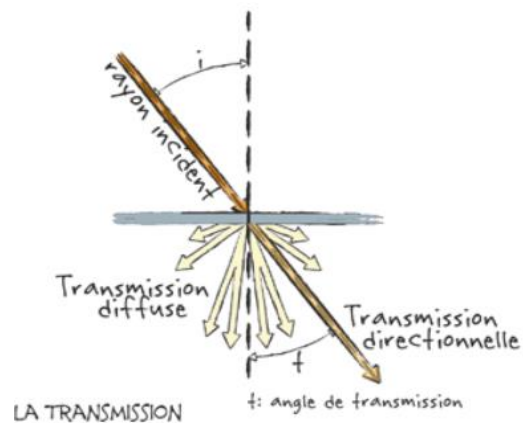




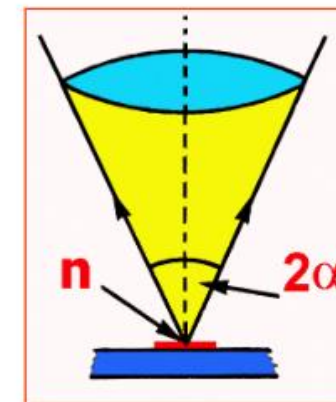
## Échantillon:

Rigoureusement, quel que soit l'échantillon, il faut se rapprocher de la loi de Beer-Lambert

↳ **C'est-à-dire « maximiser » la collecte de la lumière qui n'a pas été absorbée**



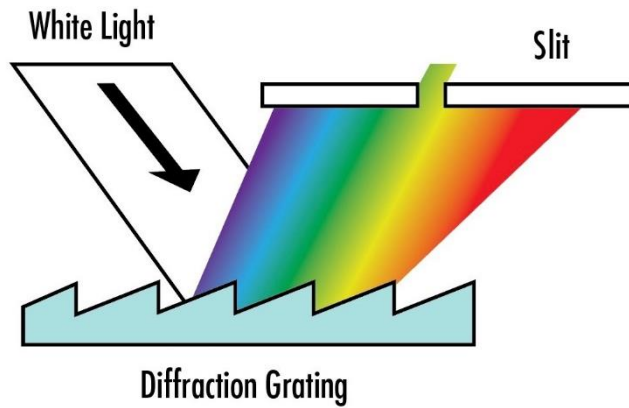
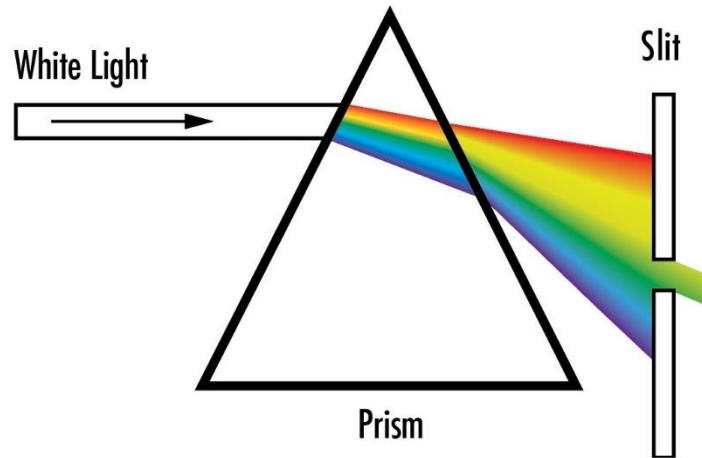
Ouverture numérique de votre système de collection



$$ON = n \cdot \sin \alpha$$

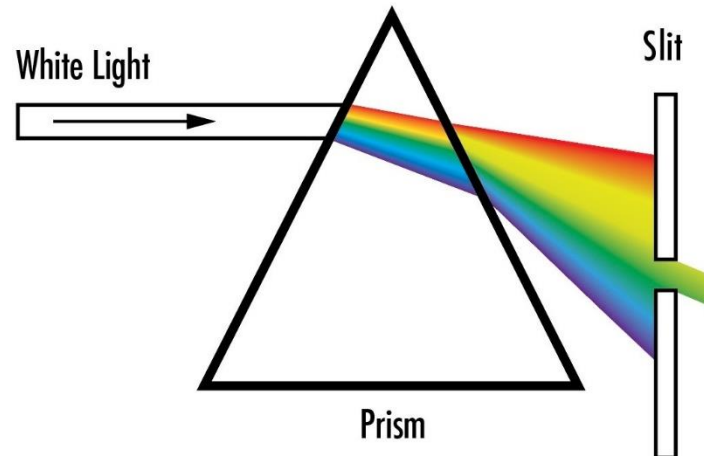


Le système de dispersion:

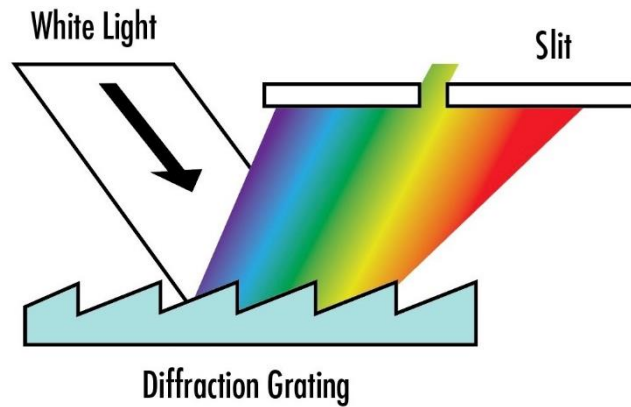




## Le système de dispersion:

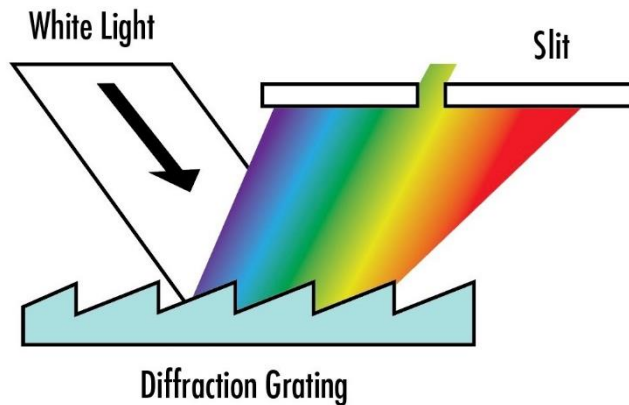
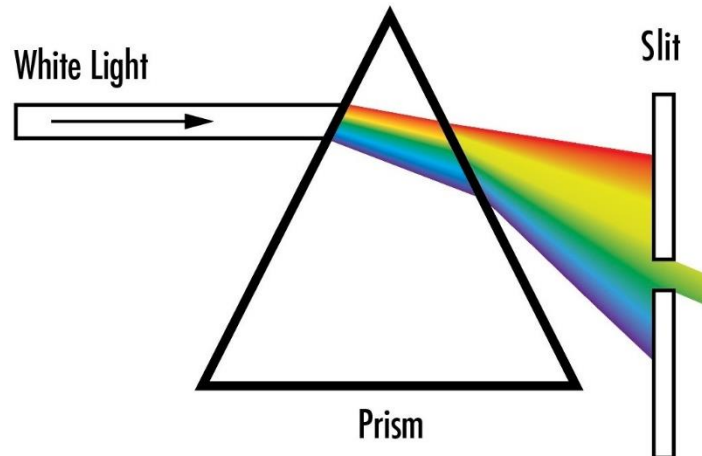


**Résolution  $\neq$  du pas d'échantillonnage**



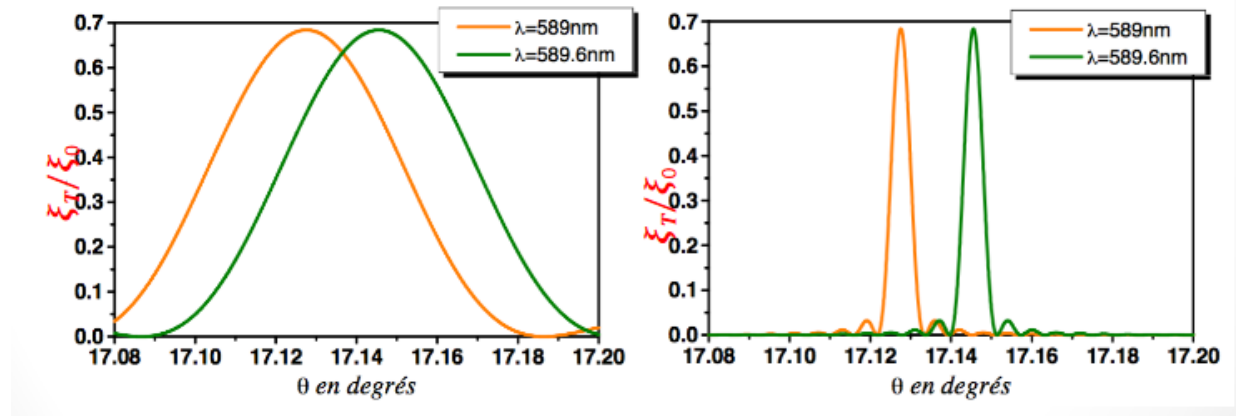


Le système de dispersion:



**Résolution  $\neq$  du pas d'échantillonnage**

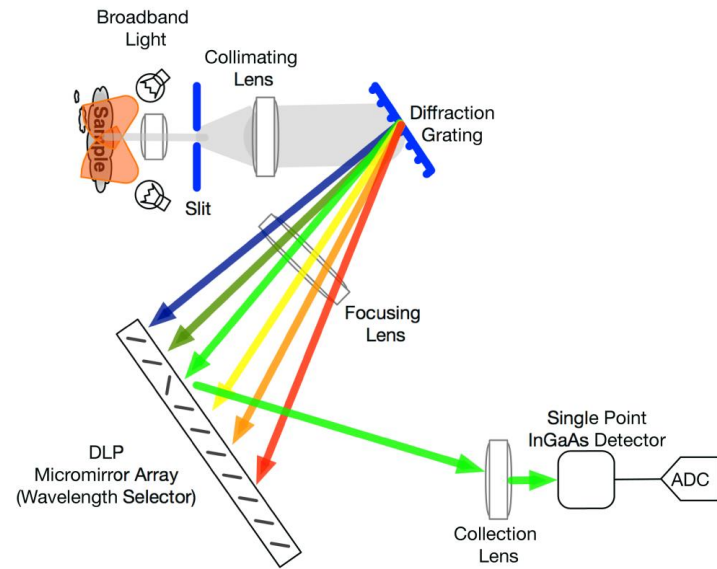
Le pouvoir de résolution d'un réseau est l'aptitude du réseau à séparer deux longueurs d'onde



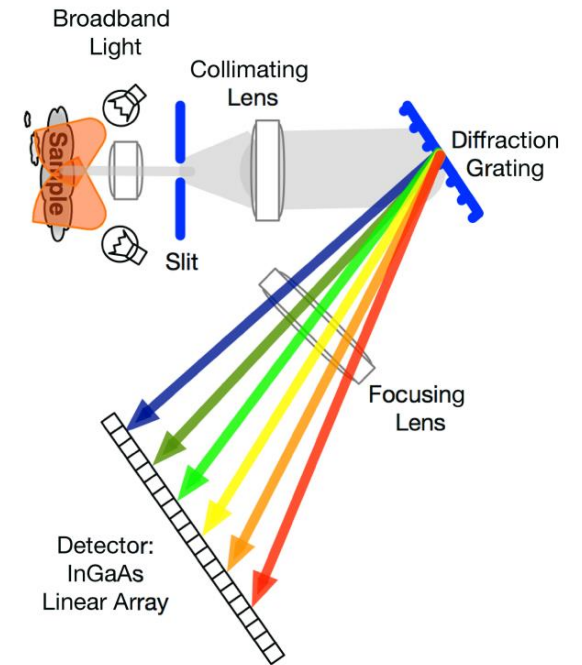
Exemple: Doublet de raies d'une lampe à Sodium  $\lambda_1=589\text{nm}$  et  $\lambda_2=589,6\text{nm}$



## Le capteur:



Détecteur ponctuel

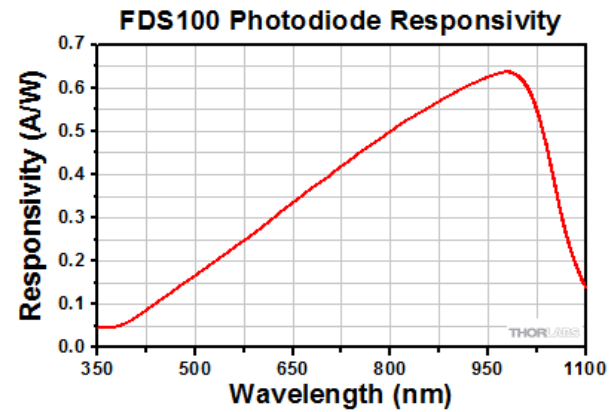


Détecteur linéaire

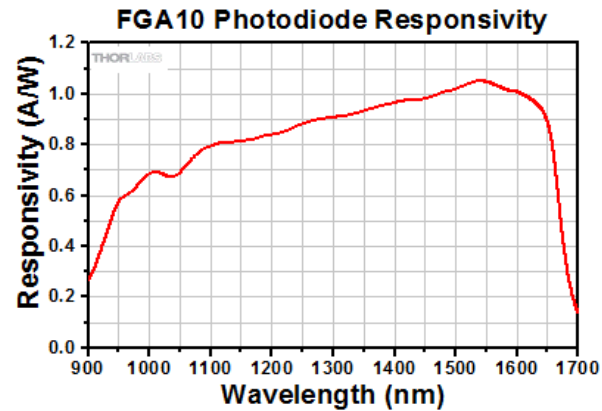


**Le capteur**: Différentes technologies en fonction de la plage spectrale:

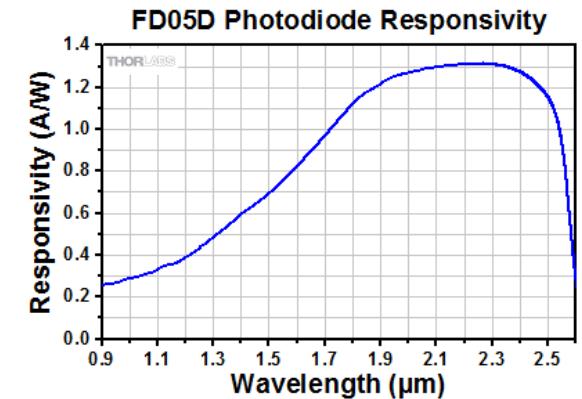
- 350 - 1050 nm : Silicium



\* 900 - 1700 nm : InGaAs



\* 900 – 2600 nm : InGaAs à « longueur d'onde étendue »



le thème de la journée du mardi 13/06/2023:  
“La spectroscopie proche-infrarouge. Comment bien mesurer ?”



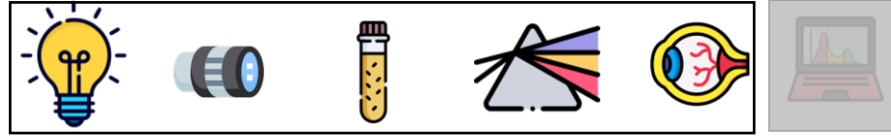
Il faut selon moi:

- Connaitre, comprendre les éléments de la chaine de mesure
- Connaitre les limites de ces éléments
- Trouver le meilleurs compromis entre tous ces éléments et l'échantillon



Quelques méthodes pour caractériser les performances optiques de votre spectromètre





## Quelques méthodes pour caractériser les performances optiques de votre spectromètre

### **1. Caractérisation de la réponse du capteur :**

- Mesure du Dark Current (DC) :
  - **Méthode:** mesures spectrales dans le noir, éclairage du spectromètre allumé, pour différents Temps Intégration (Ti) ou gain.
  - **Objectif:** tracer la fonction :  $DC=f(Ti)$  ou  $DC=f(G)$ .
- Mesure du Bruit par Pixel (BP):
  - **Méthode:** deux mesures dans le noir à 0 ms (si possible).
  - **Objectif:**  $BP = (Mesure\ 1 - Mesure\ 2)/\sqrt{2}$
- Linéarité du Capteur (LC) :
  - **Méthode:** mesures spectrales sur une référence blanche, pour différents temps d'intégration ou gain jusqu'à saturation du spectre.
  - **Objectif:** tracer la fonction :  $LC=f(Ti)$  ou  $DC=f(G)$ .
- Rapport Signal/Bruit (SNR) :
  - **Méthode:** mesures spectrales d'une référence répétées n fois. Le temps d'intégration est optimisé afin de maximiser le signal mesuré tout en restant dans la zone de linéarité du capteur.
  - **Objectif:** calculer la moyenne et l'écart type:  $SNR = \langle I(\lambda) \rangle / \sigma(\lambda)$



Quelques méthodes pour caractériser les performances optiques de votre spectromètre

## ***2. Stabilité de la mesure spectrale de l'appareil***

- **Méthode:** après optimisation du temps d'intégration, une mesure d'une référence blanche sera effectuée toute le 2 minutes durant 60 minutes.
- **Objectif:** observer les dérives rapides et lentes de la mesure spectrale



## Quelques méthodes pour caractériser les performances optiques de votre spectromètre

### **3. Caractérisation spectrale de ton appareil**

- Justesse de la calibration :
  - **Méthode**: des échantillons présentant de signatures spectrales bien définies sont mesurés.
  - **Objectif**: mesurer la justesse de la calibration fournie par le constructeur
  
- Résolution spectrale :
  - **Méthode**: sources lasers ou filtrées seront mesurées
  - **Objectif**: mesure de la résolution spectrale
  
- Lumière parasite :
  - **Méthode**: l'éclairage de chaque spectromètre sera filtré (passe-haut). Une mesure spectrale de cette lumière filtrée sera mesurée sur un échantillon blanc.
  - **Objectif**: quantifier la lumière résiduelle (lumière parasite) dans la zone coupée par le filtre



Quelques méthodes pour caractériser les performances optiques de votre spectromètre

<i>19<sup>e</sup> rencontres Heliospir-2018</i>	ASD	Texas instrument	MICRONIR 2200	MICRONIR 1700	NirOne 2.0	NirOne 2.2	Scio
<i>Dark current</i>	-	-	+	+	-	-	-
<i>Bruit par pixel</i>	-	-	+	+	-	-	-
<i>Linéarité du capteur</i>	-	-	+	+	-	-	-
<i>Rapport Signal/Bruit du capteur</i>	-	-	+	+	-	-	-
<i>Stabilité de la mesure spectrale</i>	+	+	+	+	+	+	-
<i>Justesse de calibration</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Résolution spectrale</i>	-	-	-	-	-	-	-
<i>Lumière parasite</i>	-	-	-	-	-	-	-

(-) : Non réaliser

(+) : réaliser 36



## Quelques méthodes pour caractériser les performances optiques de votre spectromètre

### **1. Caractérisation de la réponse du capteur :**

- Mesure du Dark Current (DC) :
  - **Méthode:** mesures spectrales dans le noir, éclairage du spectromètre allumé, pour différents Temps Intégration (Ti) ou gain.
  - **Objectif:** tracer la fonction :  $DC=f(T_i)$  ou  $DC=f(G)$ .

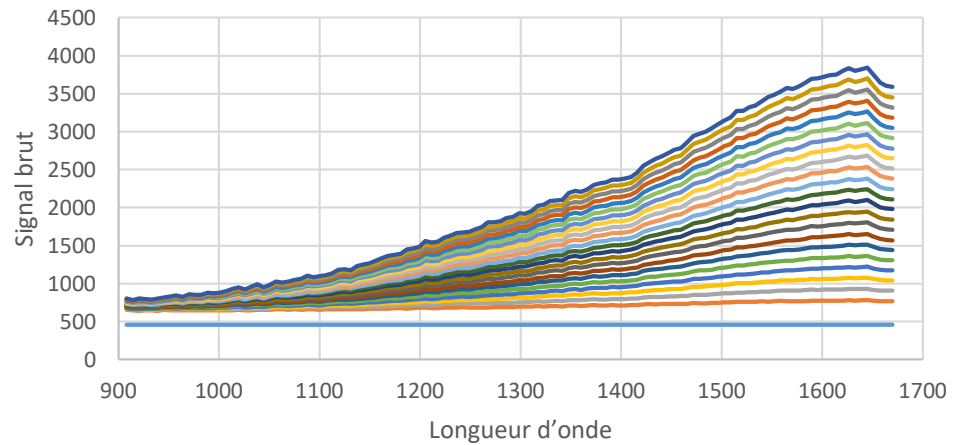


## Quelques méthodes pour caractériser les performances optiques de votre spectromètre

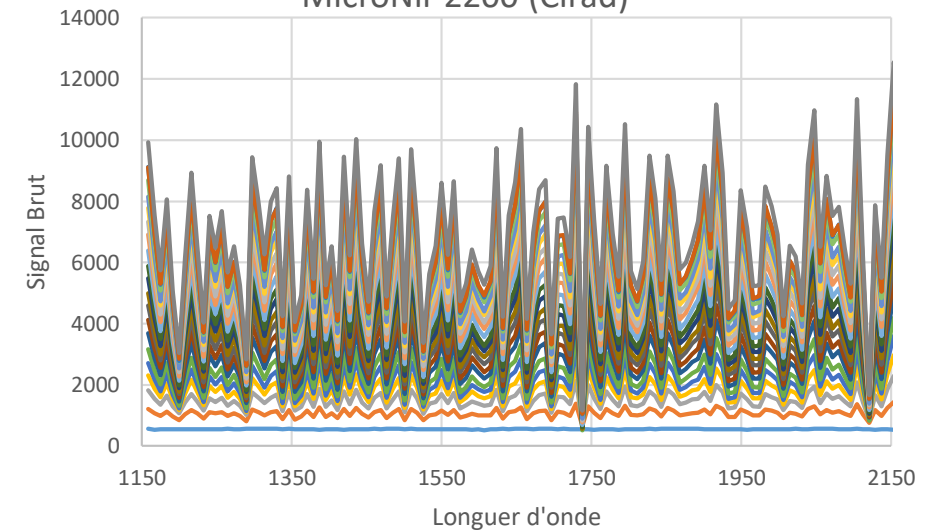
### **1. Caractérisation de la réponse du capteur :**

Mesure du Dark Current:  $DC=f(TI)$  ou  $DC=f(G)$

MicroNir1700 ( CRAW)



MicroNir 2200 (Cirad)



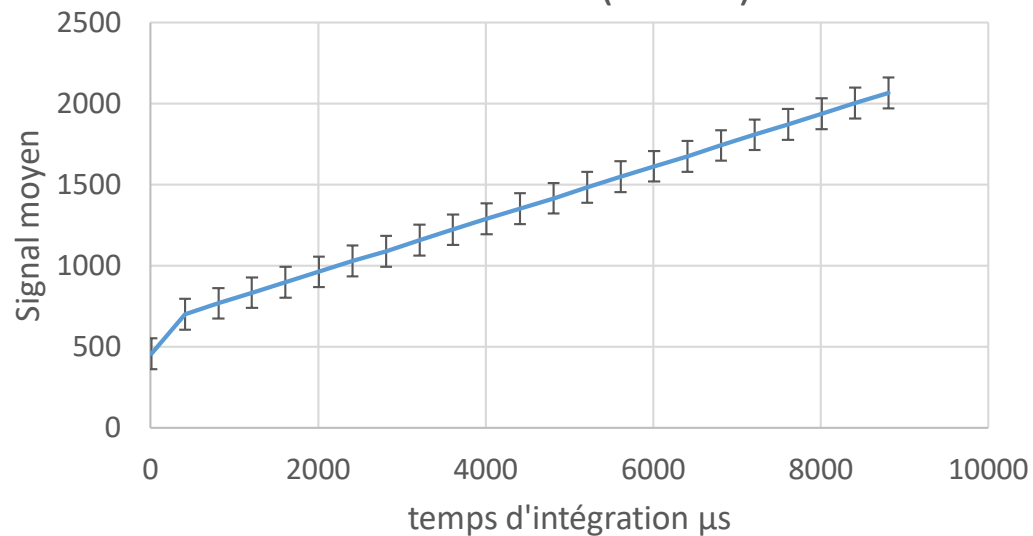


## Quelques méthodes pour caractériser les performances optiques de votre spectromètre

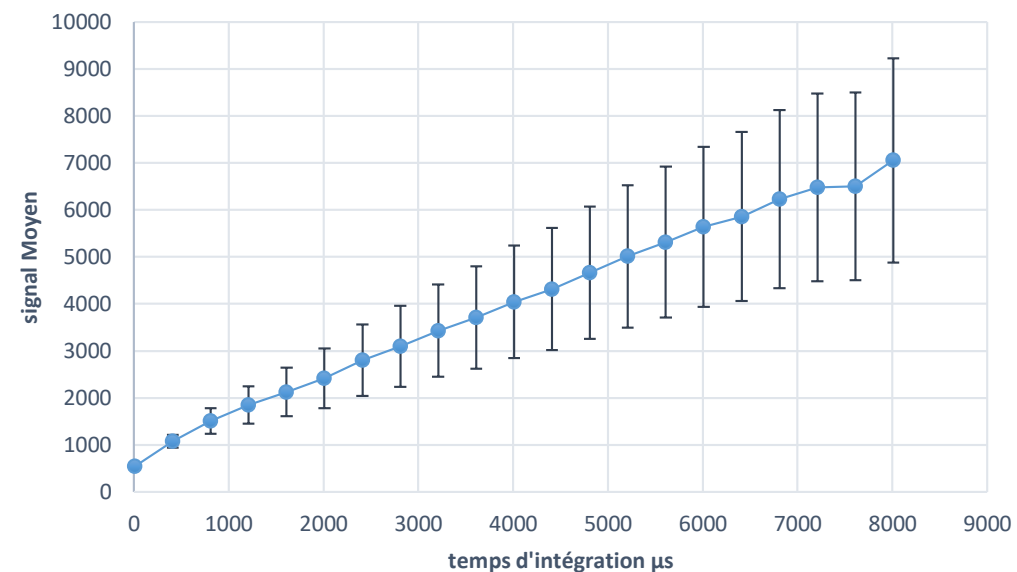
### 1. Caractérisation de la réponse du capteur :

Mesure du Dark Current:  $DC=f(TI)$  ou  $DC=f(G)$

MicroNir 1700 (CRAW)



MicroNIR2200 (Cirad)





## Quelques méthodes pour caractériser les performances optiques de votre spectromètre

### **1. Caractérisation de la réponse du capteur :**

- Linéarité du Capteur (LC) :
  - **Méthode:** mesures spectrales sur une référence blanche, pour différents temps d'intégration ou gain jusqu'à saturation du spectre.
  - **Objectif:** tracer la fonction :  $LC=f(T_i)$  ou  $DC=f(G)$ .

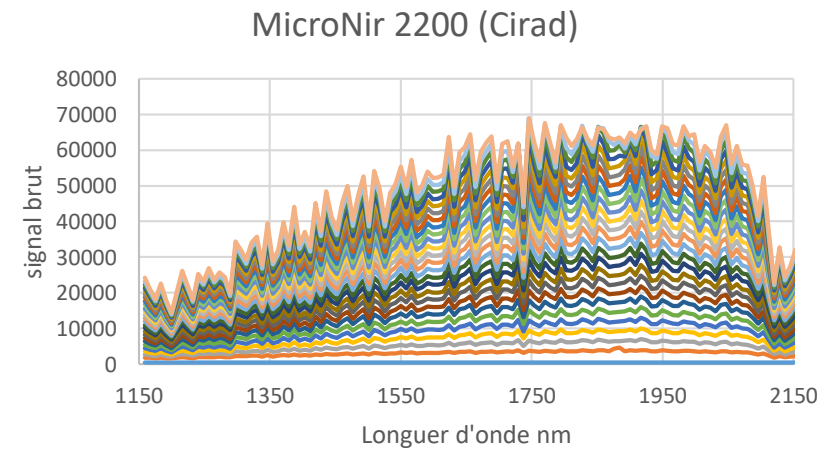
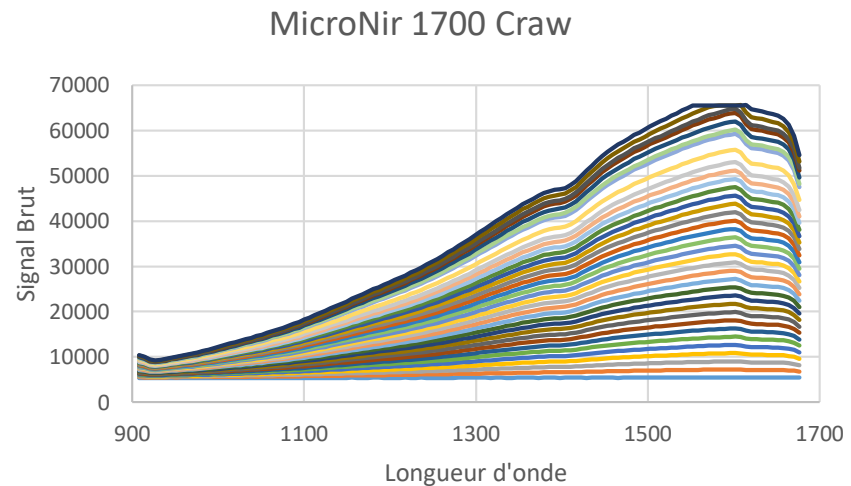




## Quelques méthodes pour caractériser les performances optiques de votre spectromètre

### **1. Caractérisation de la réponse du capteur :**

Linéarité du Capteur :  $LC=f(TI)$  ou  $LC=f(G)$

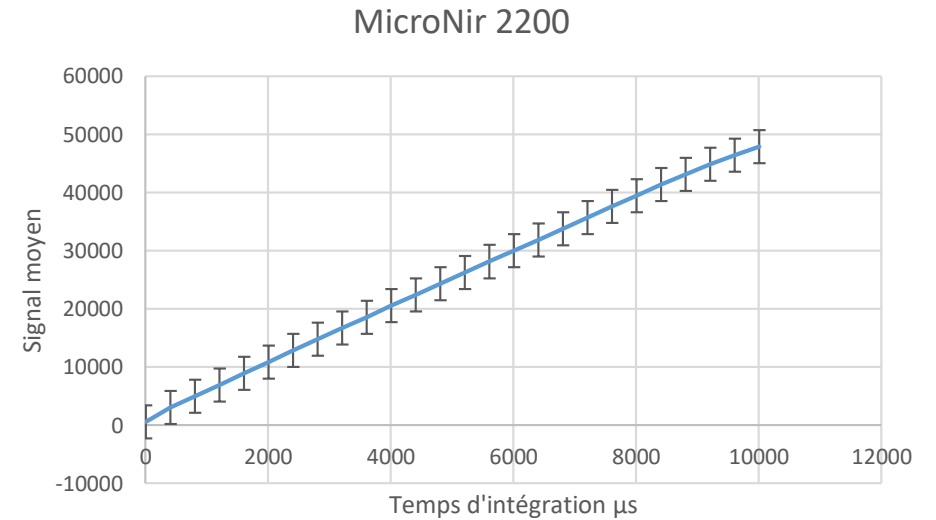
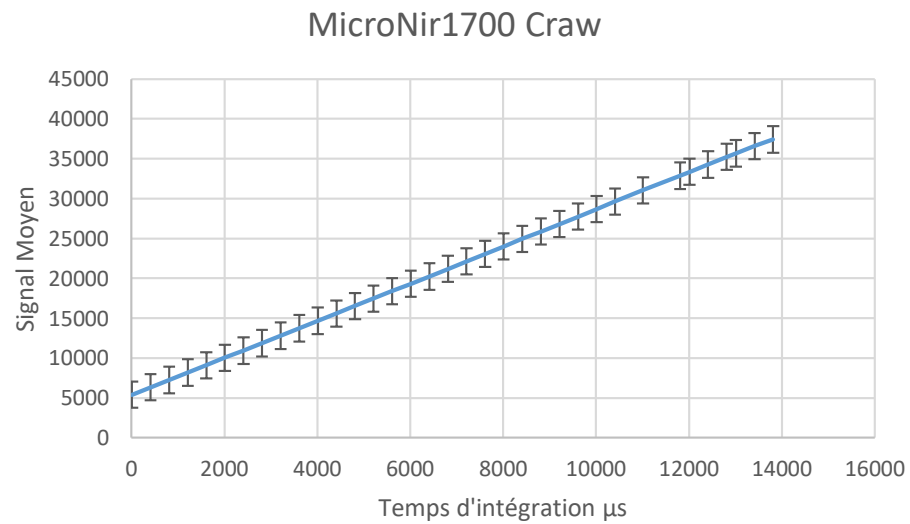




## Quelques méthodes pour caractériser les performances optiques de votre spectromètre

### 1. Caractérisation de la réponse du capteur :

Linéarité du Capteur :  $LC=f(TI)$  ou  $LC=f(G)$





## Quelques méthodes pour caractériser les performances optiques de votre spectromètre

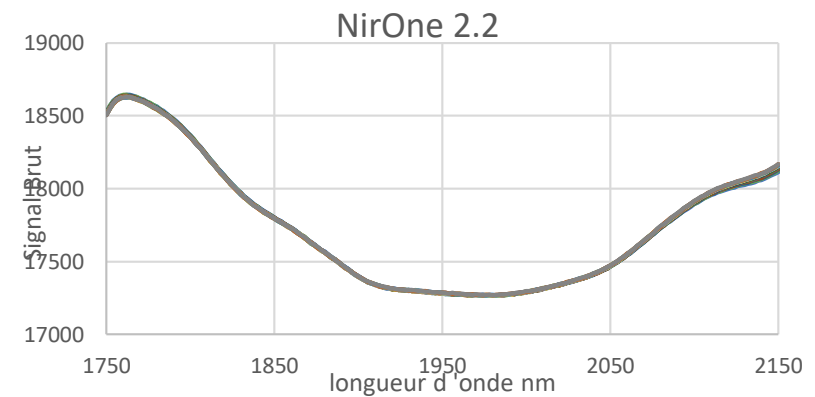
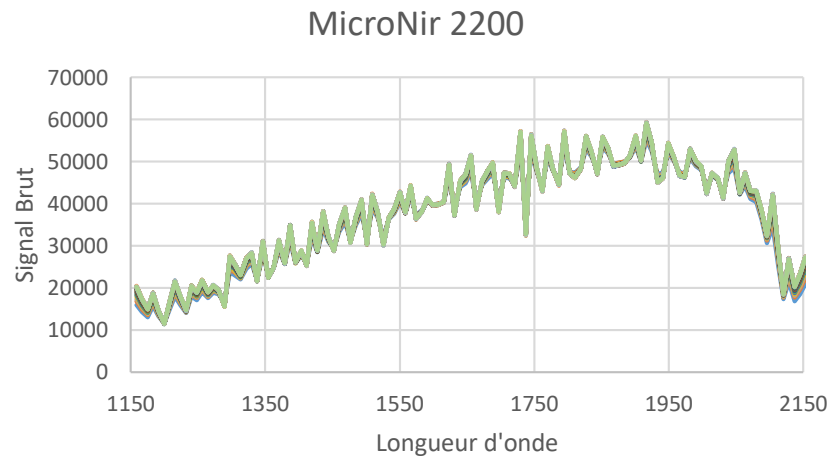
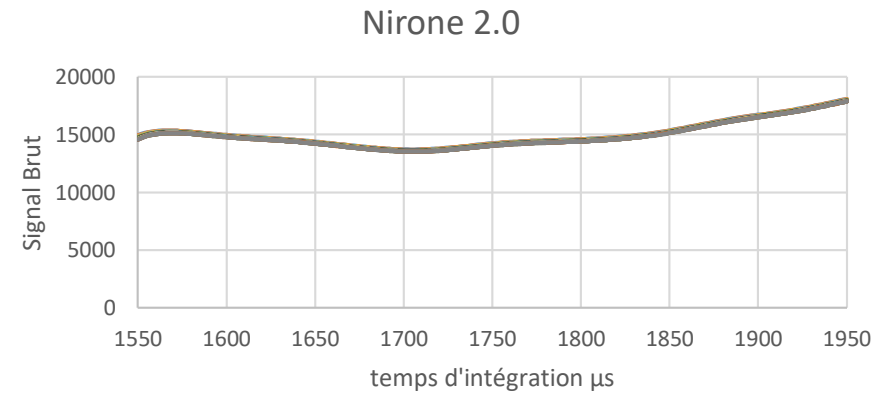
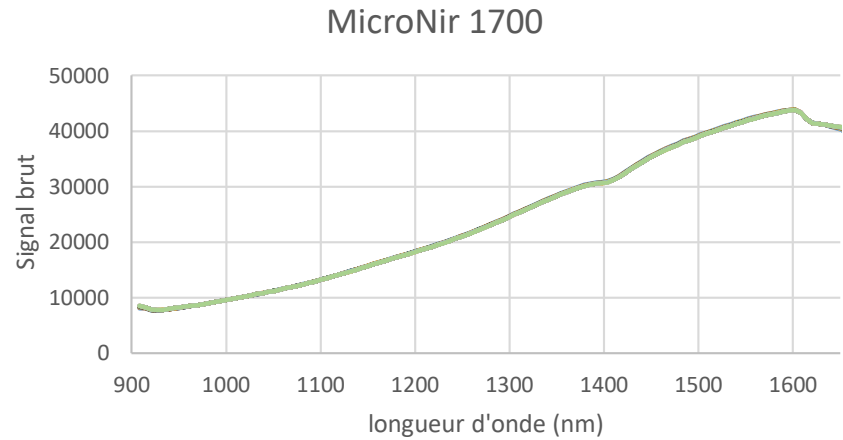
### **2. Stabilité de la mesure spectrale de l'appareil**

- **Méthode:** après optimisation du temps d'intégration, une mesure d'une référence blanche sera effectuée toute le 2 minutes durant 60 minutes.
- **Objectif:** observer les dérives rapides et lentes de la mesure spectrale



## Quelques méthodes pour caractériser les performances optiques de votre spectromètre

### **2. Stabilité de la mesure spectrale de l'appareil**

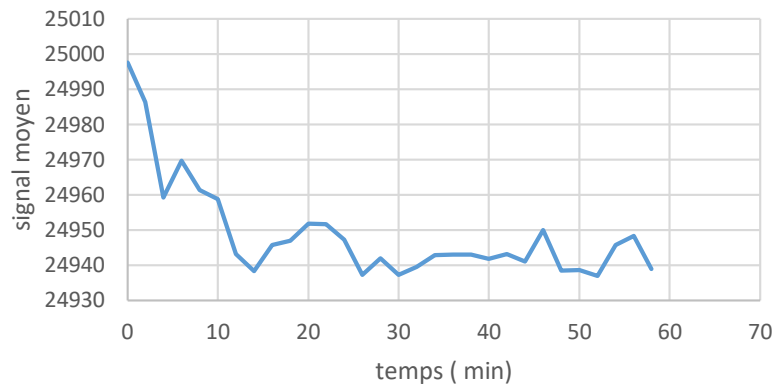




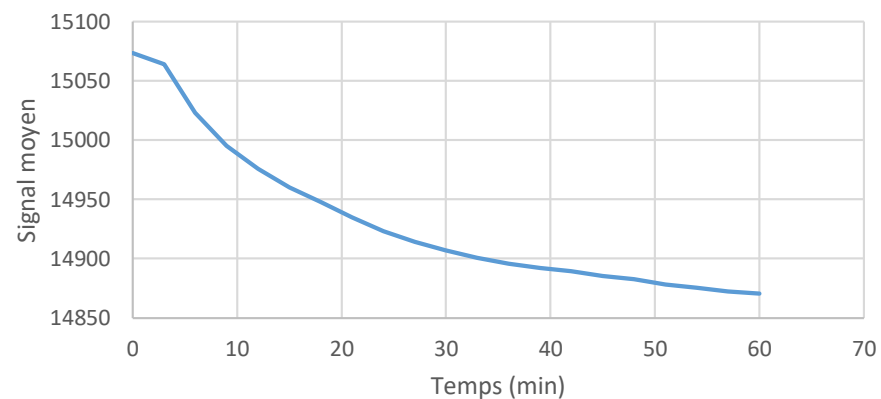
## Quelques méthodes pour caractériser les performances optiques de votre spectromètre

### **2. Stabilité de la mesure spectrale de l'appareil**

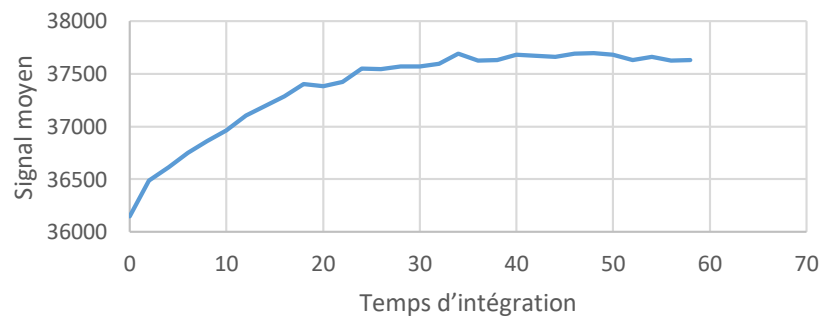
MicroNIR 1700



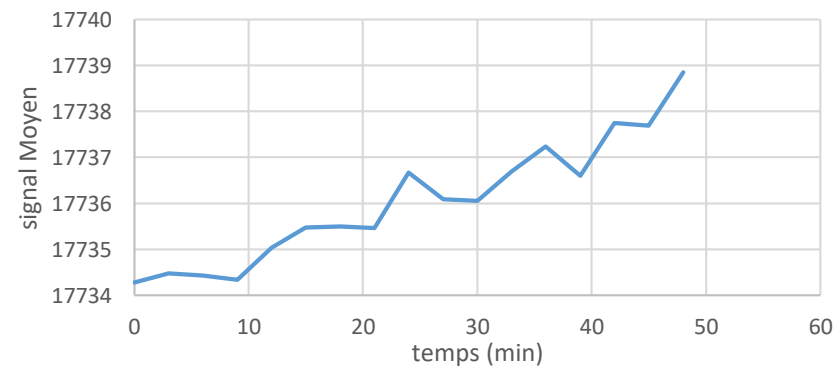
Nirone 2.0

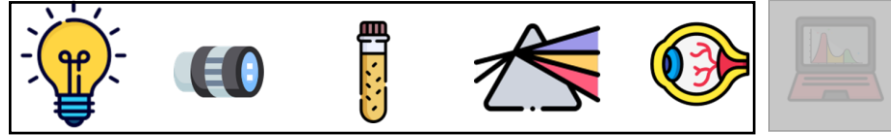


MicroNir 2200

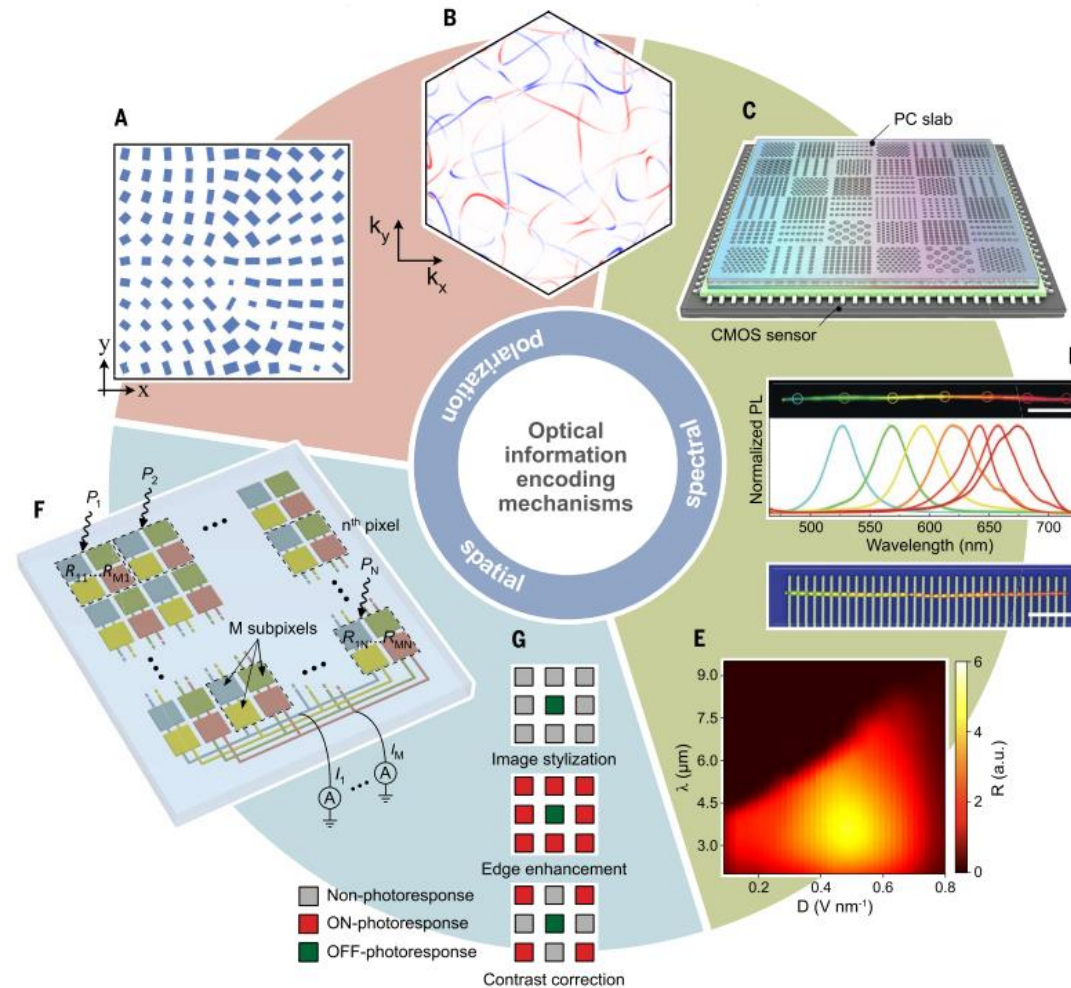


NirOne 2.2





## Pour finir: exploiter toutes les dimensions du signal



# Merci

[Ryad.bendoula@inrae.fr](mailto:Ryad.bendoula@inrae.fr)

<https://www6.montpellier.inrae.fr/itap-comic/>

Unité Mixte de Recherche

**ITAP**

Technologies & méthodes  
pour les agricultures  
de demain

INRAE - Montpellier SupAgro

