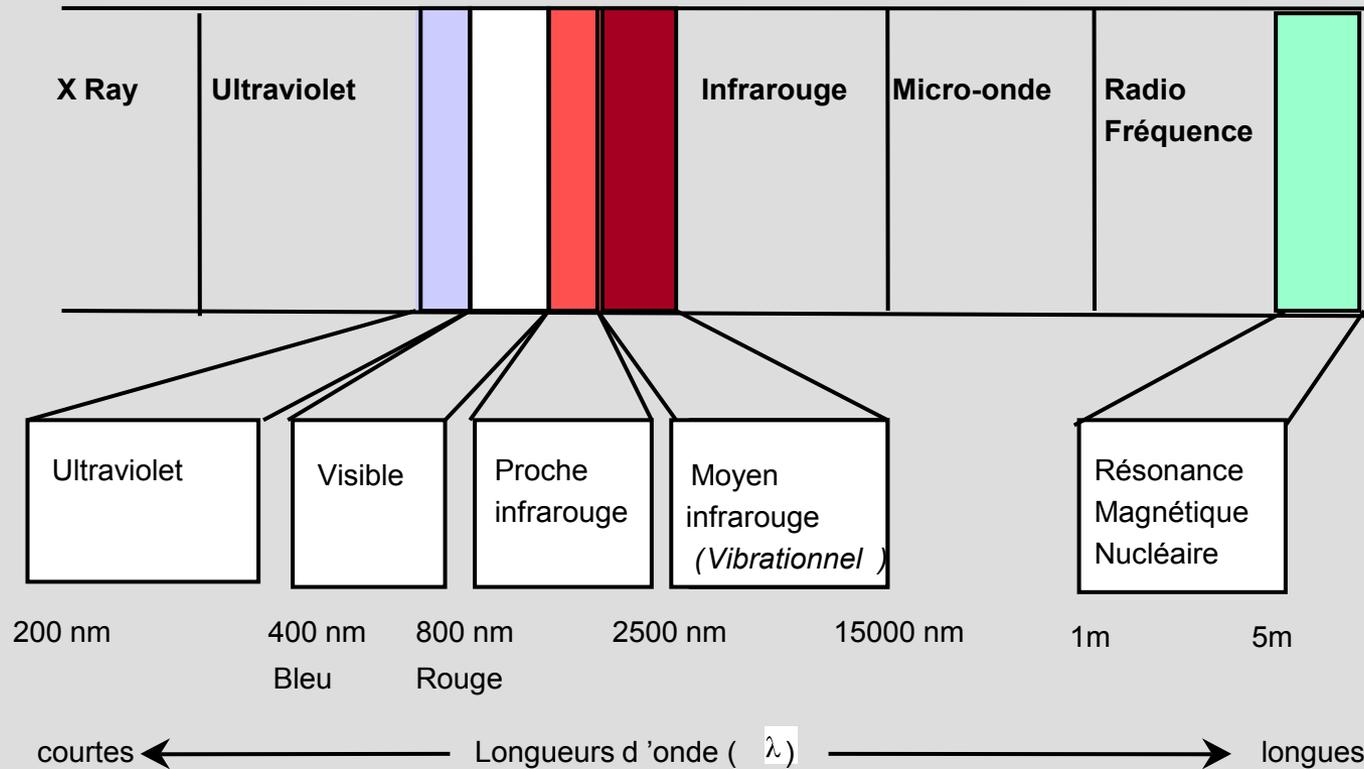
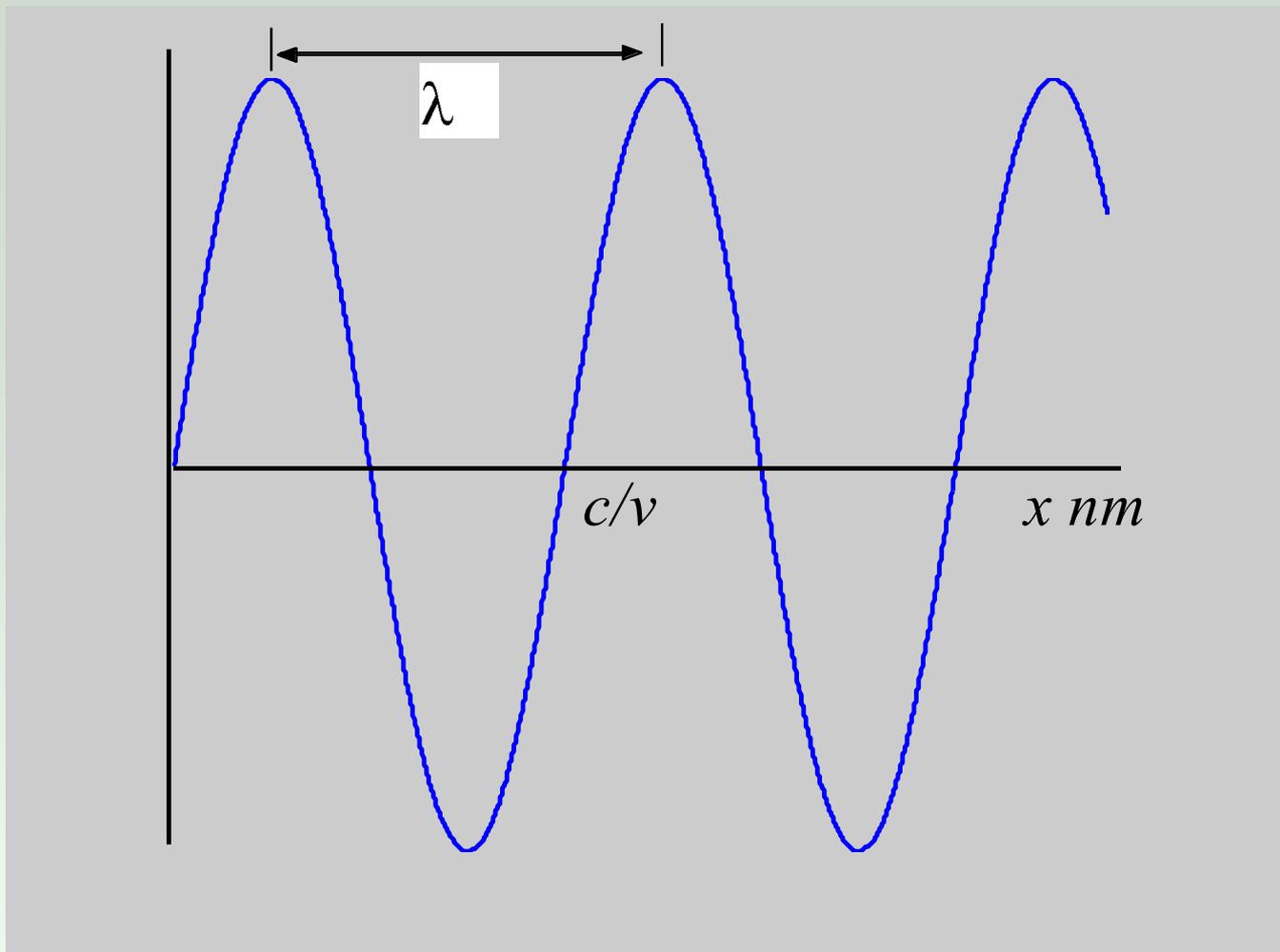


# Conception des spectromètres proche infrarouge

Dominique Bertrand  
**data\_frame**



Portion du spectre électromagnétique présentant un intérêt  
pour les applications analytiques  
(d'après Pavia *et al*, 1979)



### L'onde lumineuse

$c$ : vitesse de la lumière     $\nu$ : fréquence     $\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$

# L'onde lumineuse

Longueur d'onde exprimée en

nanomètre (symbole nm)

$10^{-9}$  mètres

en micron (symbole  $\mu\text{m}$ )

$10^{-6}$  mètres

en Angström (symbole Å)

$10^{-10}$  mètres

Nombre d'onde exprimé en

$\text{cm}^{-1}$

(inverse de la longueur d'onde exprimée en cm).

Exemple de conversion:

Longueur d'onde

soit

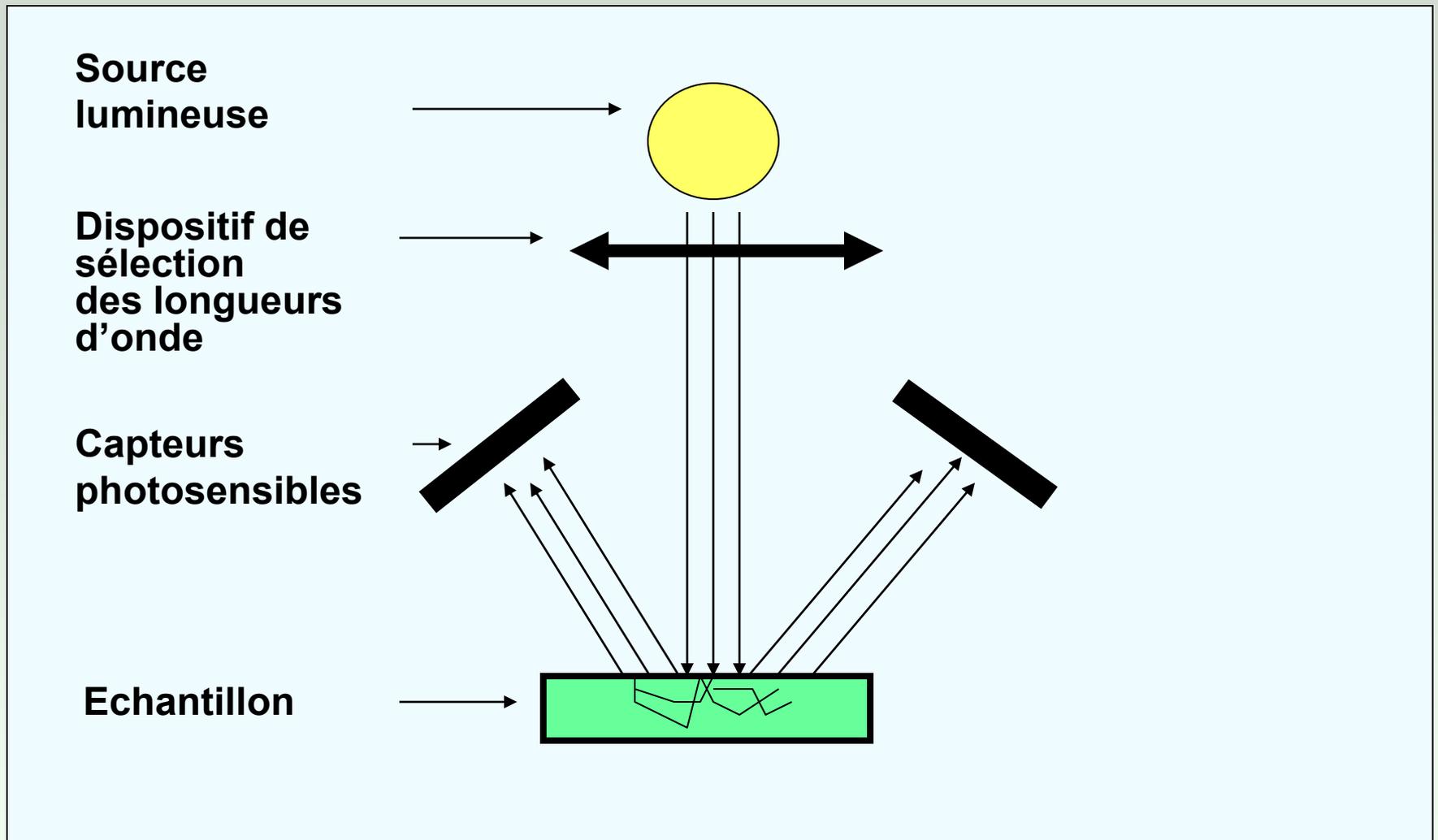
ou

1940 nm

0,001940 cm

$$\frac{1}{0.001940} = 155 \text{ cm}^{-1}$$

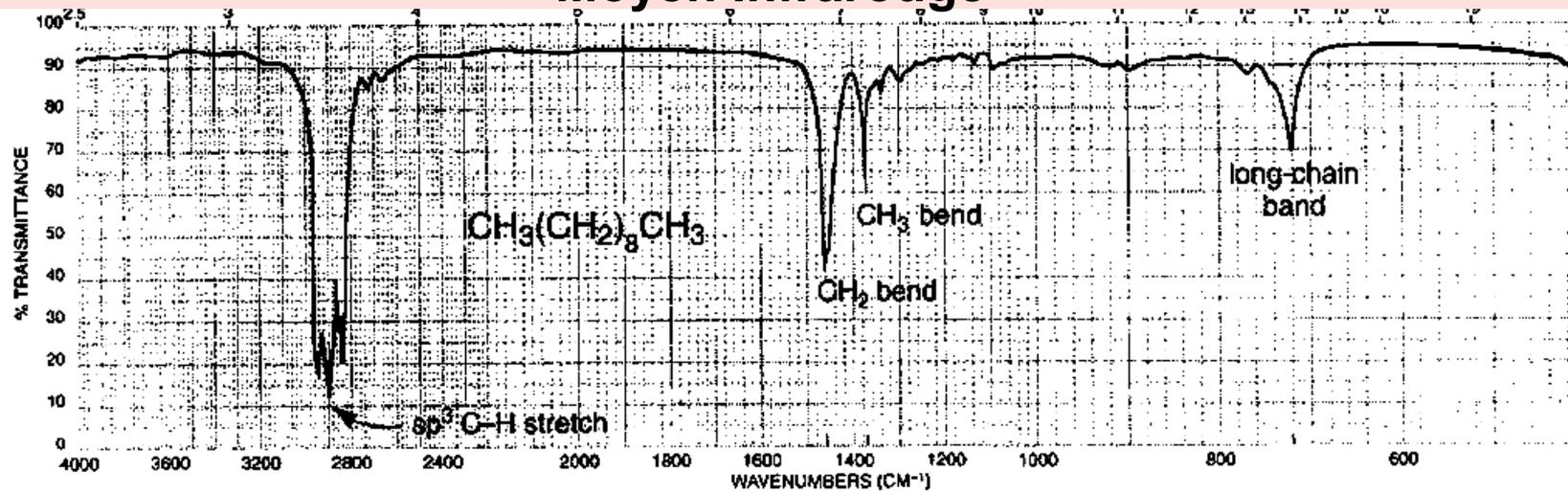
$$\frac{10^7}{1940} = 155 \text{ cm}^{-1}$$



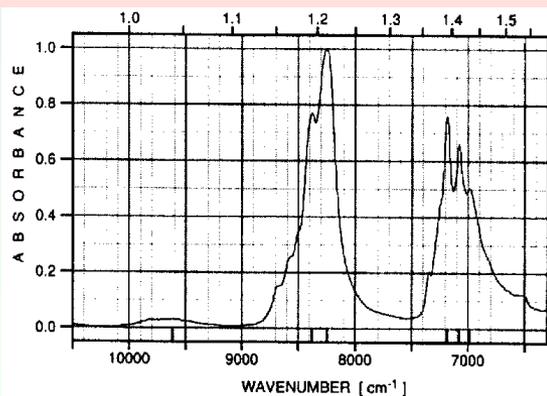
## Principe de la spectroscopie

# DECANE

## Moyen Infrarouge



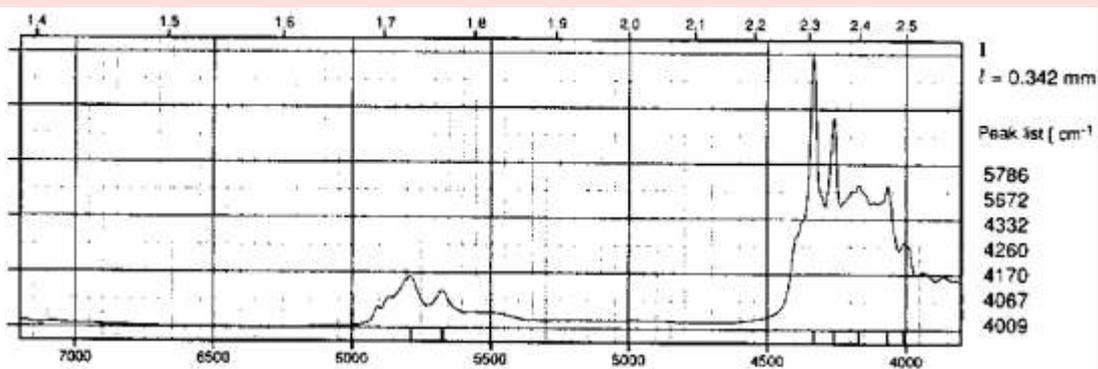
## Proche Infrarouge



II  
 $l = 11.7$  mm

Peak list [cm<sup>-1</sup>]

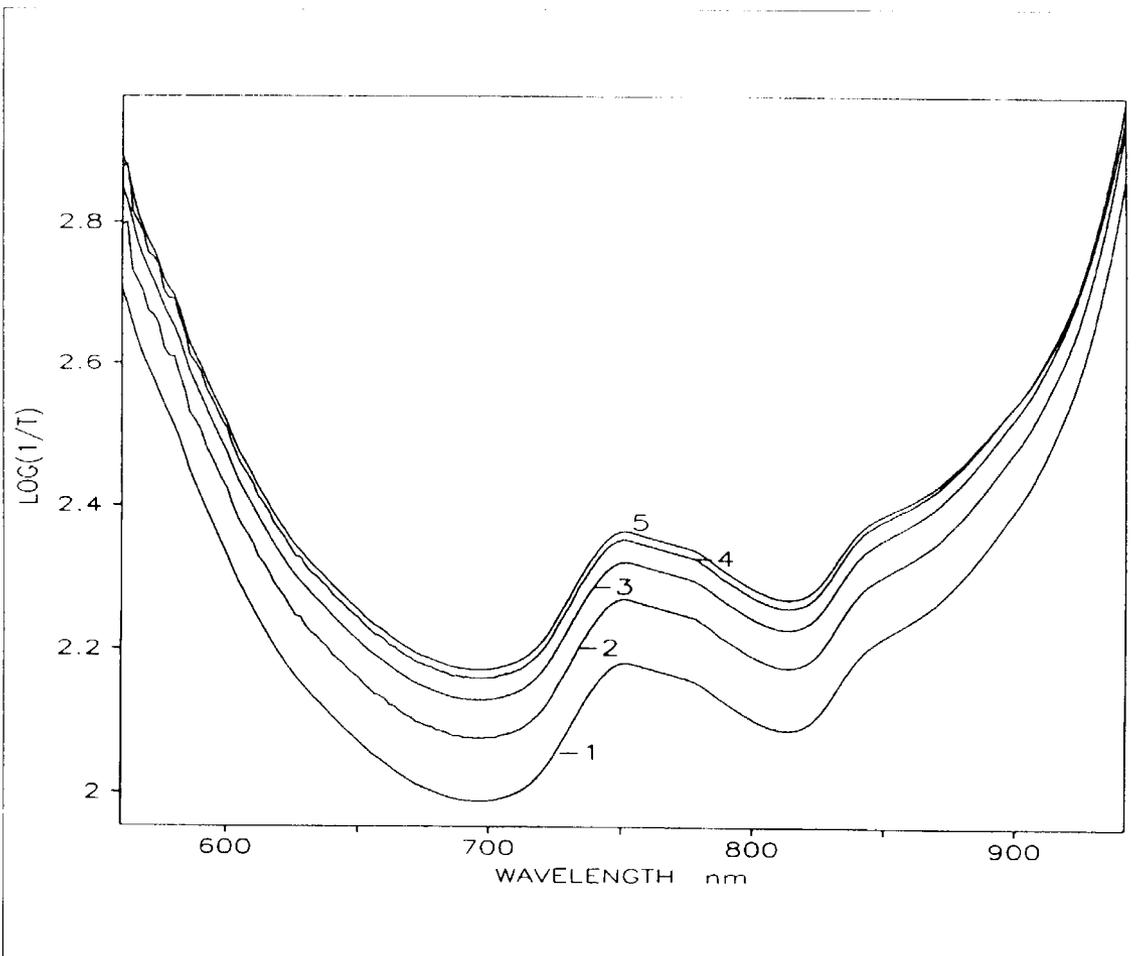
9619  
8378  
8247  
7184  
7079  
6988



I  
 $l = 0.342$  mm

Peak list [cm<sup>-1</sup>]

5786  
5672  
4332  
4260  
4170  
4067  
4009



## Classement des œufs en fonction de leur fraîcheur Karl Norris (1949)

Temps après la ponte: (1) 20 min; (2) 40 min; (3) 60 min; (4) 120 min; (5) 240 min

(Cité par K. Norris, 1992, NIR News 3(1))<sup>7</sup>

# Détermination directe de l'humidité des grains et des graines

Norris K, Hart JH (1963)

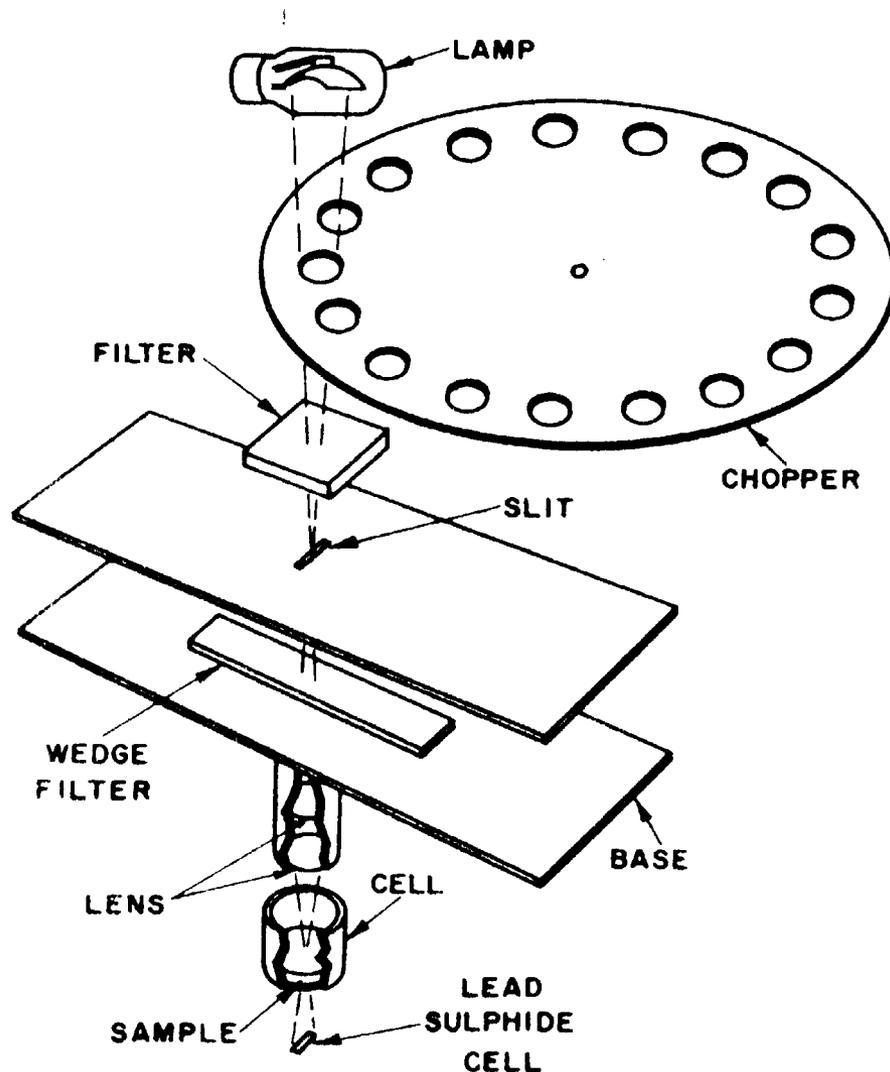


FIG. 1. Wedge-filter spectrophotometer.

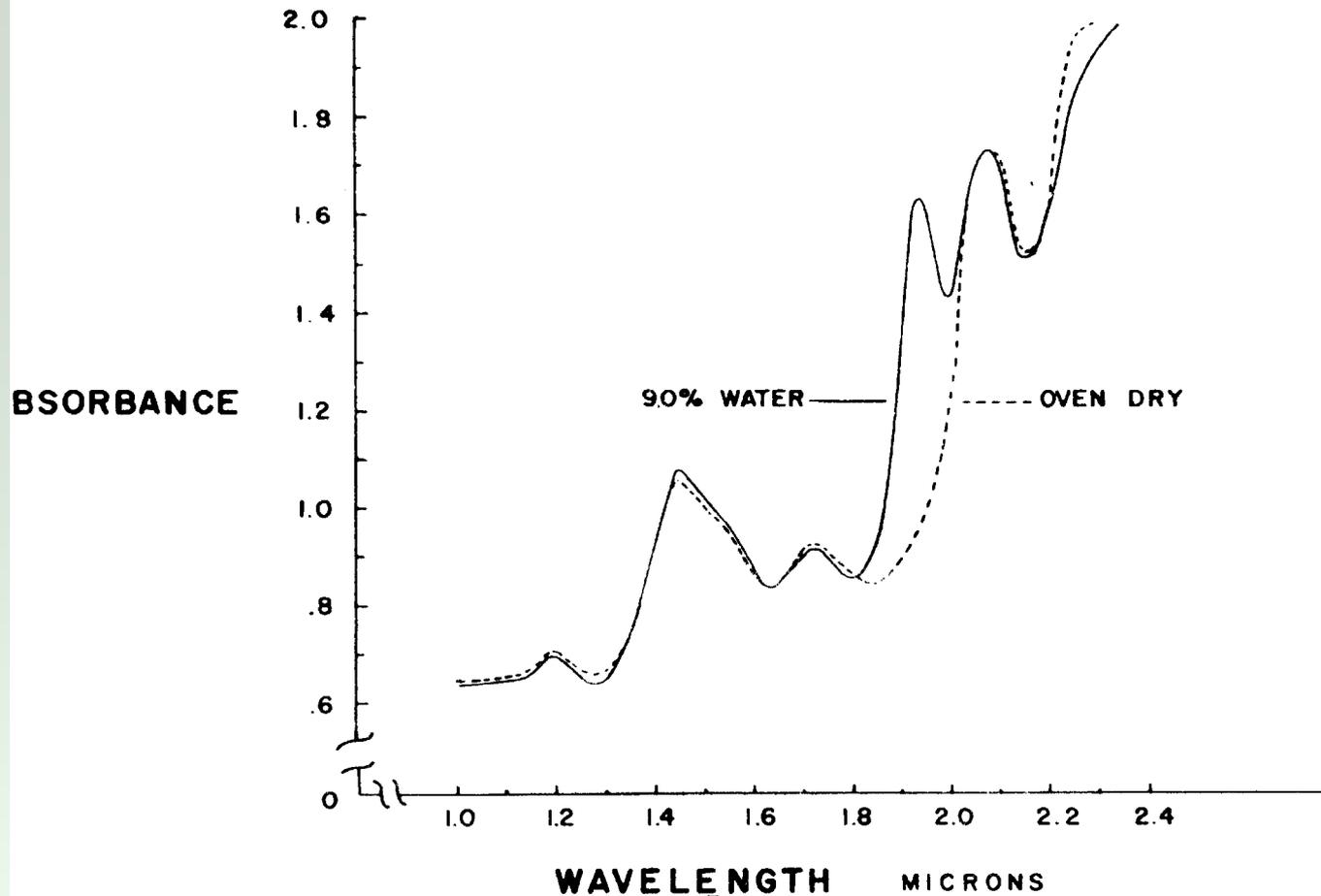


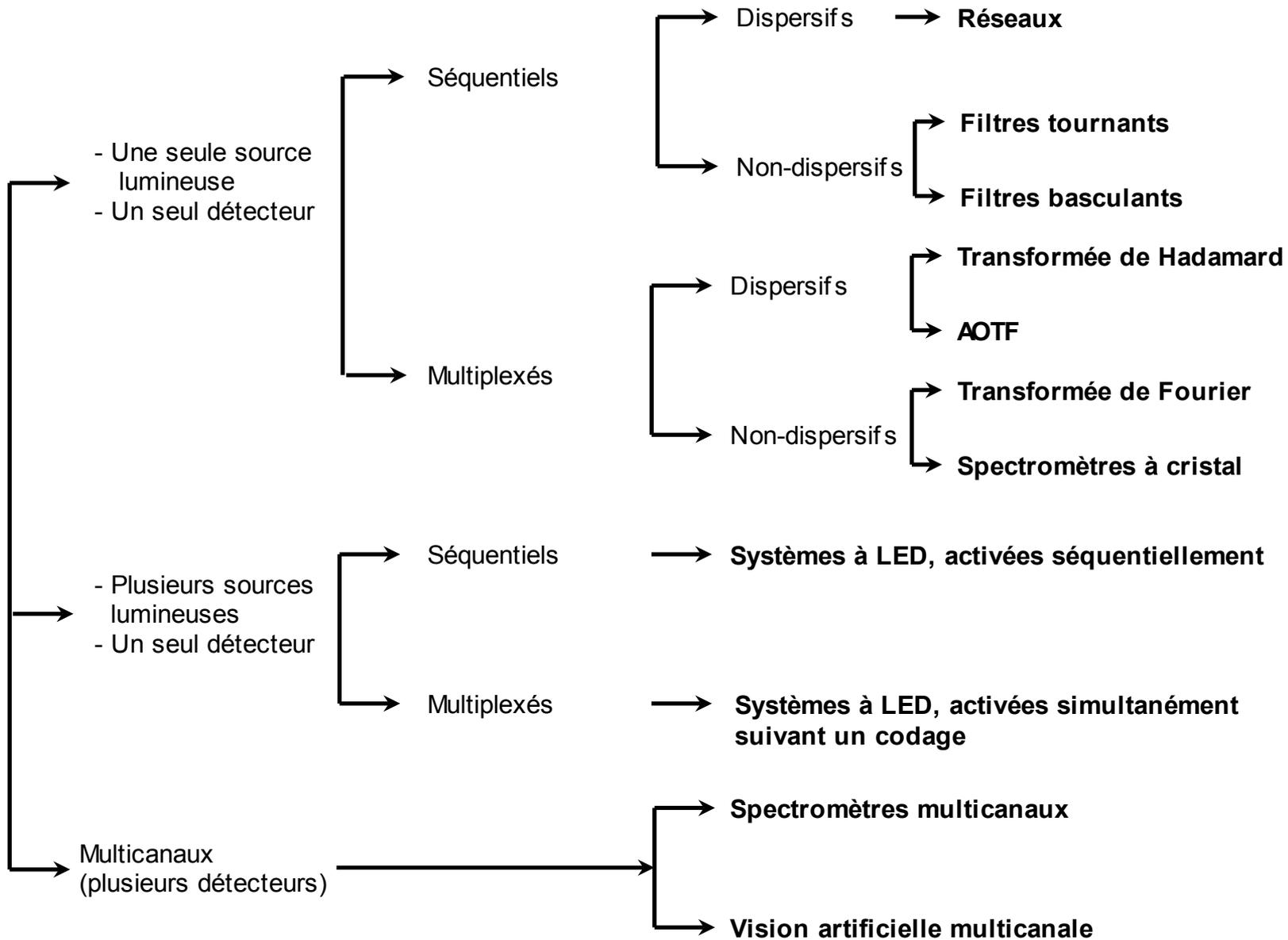
FIG. 3. Spectral absorption curves for wet and dry wheat. Samples—2 grams of ground wheat with 1.5 ml of carbon tetrachloride in a cell 4.4 cm in diameter.

## Détermination directe de l'humidité des grains et des graines

Norris K, Hart JH (1963)

*Proc. Int. Symp. on Humidity and Moisture, New-York, 1983*

Spectromètre infrarouge



# Sources lumineuses:

## Thermiques (les plus employées)

Filament électrique maintenu à une température de 2400 K

## Diodes émettrices de lumière

*(Light emitting diode, LED)*

Semi-conducteur

GaAs : plage 900-975 nm

GaAsP : plage 1000-2500 nm

## Laser et diode laser

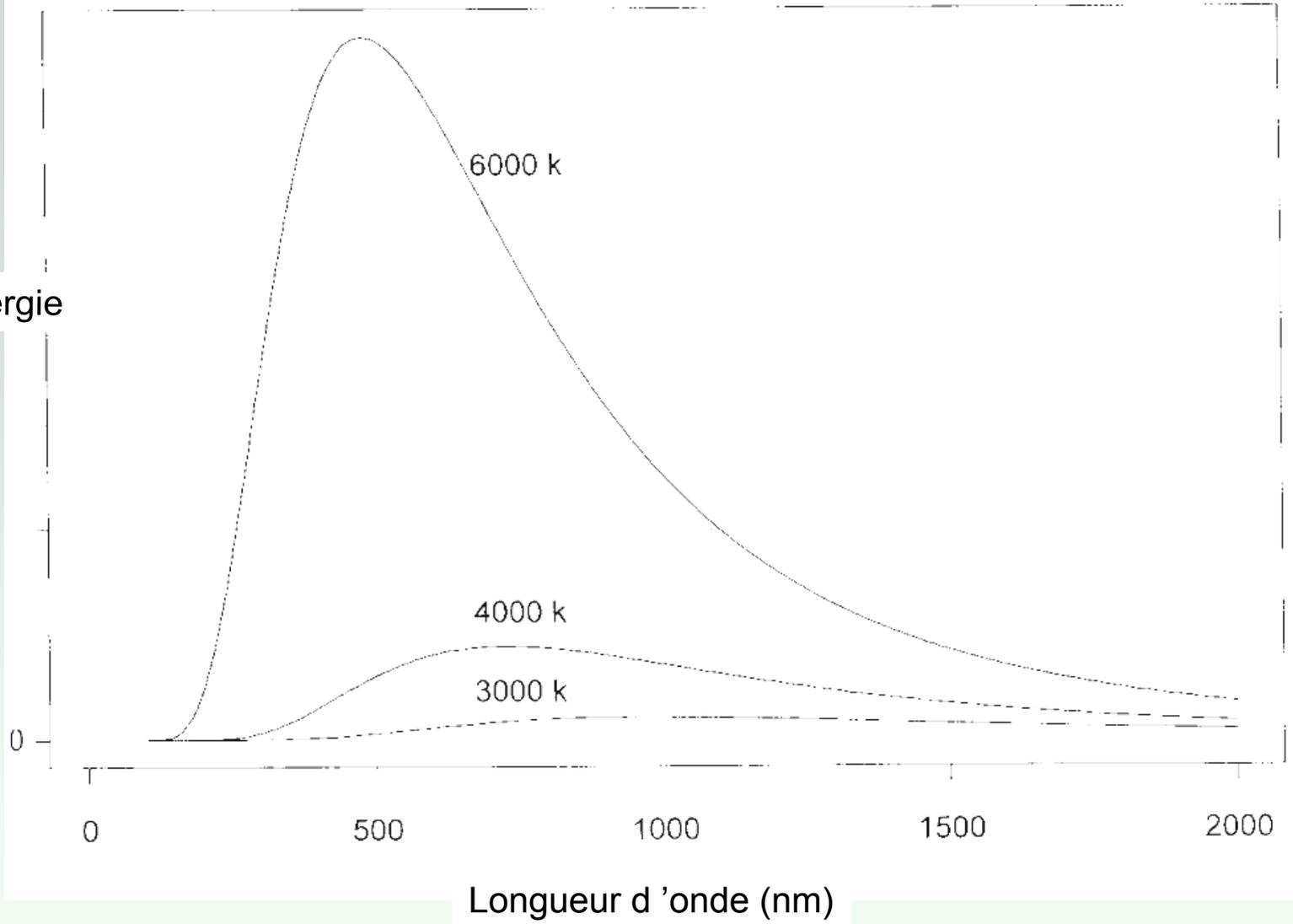
*(Light amplification by simulated emission of radiations)*

Longueur d'onde fixe

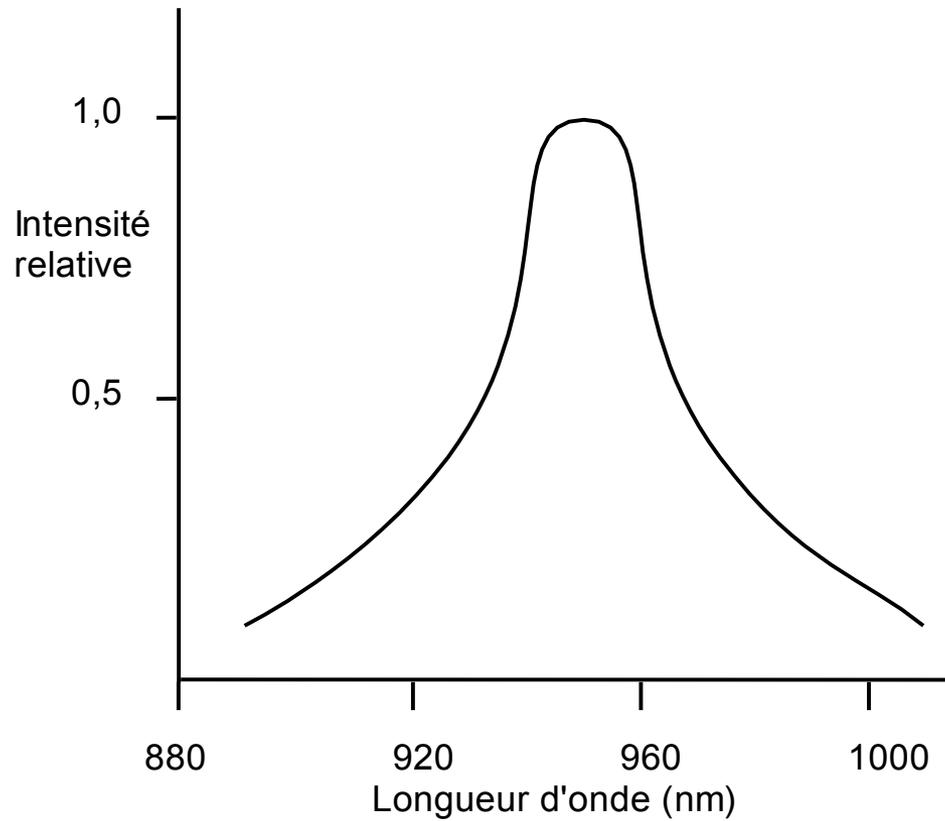
ou

Laser accordable (tunable laser) encore onéreux

Energie



## L'énergie du corps noir



**Réponse spectrale d'une diode émettrice de lumière**

07	1020 nm - 1720 nm
	ELD-1020-525, 1020 nm, 1.0 mW at 20 mA, tr=25ns, tf=40ns, 20°, 5 mm clear epoxy
new	LED1050-01, 1050 nm, 2 mW at 50 mA, tr,tf=10ns, 5 mm clear epoxy
	LED1050-03, 1050 nm, 14 mW/sr, 2 mW at 50 mA, tr,tf=10ns, 20°, 5 mm clear epoxy
	LED1050-06, 1050 nm, 30 mW/sr, 2 mW at 50 mA, tr,tf=10ns, 8°, 5 mm clear epoxy
new	LED1050-33, 1050 nm, 10 mW/sr, 2 mW at 50 mA, +/-18°, 3 mm clear epoxy
	LED1050-35K42, 1050 nm, 1.5 mW at 50 mA, tr,tf: 10 ns, +/-6°, TO-46, cap lens
new	ELD-1060-525, 1060 nm, 1.6 mW at 20 mA, tr,tf=10ns, 20°, 5 mm clear epoxy
	LED1070-03, 1070 nm, 2.5 mW at 50 mA, 20°, 5 mm clear epoxy
	LED1200-03, 1200 nm, 5 mW at 50 mA, tr,tf=10ns, 20°, 5 mm epoxy
	LED1200-06, 1200 nm, 5 mW at 50 mA, tr,tf=10ns, 8°, 5 mm epoxy
	LED1200-35M32, 1200 nm, 3.5 mW at 20 mA, 30°, TO-18, cap lens
new	ELD-1300-525, 1300 nm, 2.2 mW at 20 mA, tr,tf=10ns, 25°, 5 mm clear epoxy
	LED1300-03, 1300 nm, 4.5 mW at 50 mA, tr,tf=10ns, 20°, 5 mm clear epoxy
	LED1300-35M32, 1300 nm, 3 mW at 50 mA, +/-15°, TO-46, cap lens
	LED1300-35K42, 1300 nm, 2 mW at 50 mA, +/-6°, TO-46, cap lens
	LED1450-03, 1450 nm, 2.5 mW at 50 mA, tr,tf=10ns, 20°, 5 mm clear epoxy
	LED1450-06, 1450 nm, 2.5 mW at 50 mA, tr,tf=10ns, 8°, 5 mm clear epoxy
new	LED1450-35K42, 1450 nm, 2.4 mW at 50 mA, +/-6°, TO-46, cap lens
new	ELD-1480-525, 1480 nm, 1.8 mW 20 mA, FWHM=150nm, tr/tf=40ns, 20°, 5 mm clear epoxy
new	ELD-1550-525, 1550 nm, 1.4 mW at 20 mA, tr,tf=10ns, 20°, 5 mm clear epoxy
	LED1550-03, 1550 nm, 2.5 mW at 50 mA, tr,tf=10ns, 20°, 5 mm clear epoxy
	LED1550-35M32, 1550 nm, 2.0 mW at 50 mA, +/-15°, TO-46
	LED1550-35K42, 1550 nm, 2.0 mW at 50 mA, +/-6°, TO-46
new	ELD-1720-535, 1720 nm, 1.0 mW at 20 mA, tr,tf=15ns, 30°, 5 mm clear epoxy

## Catalogue commercial de LEDs

(Roithner, 2012)

# Détecteurs photosensibles:

## **Thermiques:**

Thermocouple et thermopiles

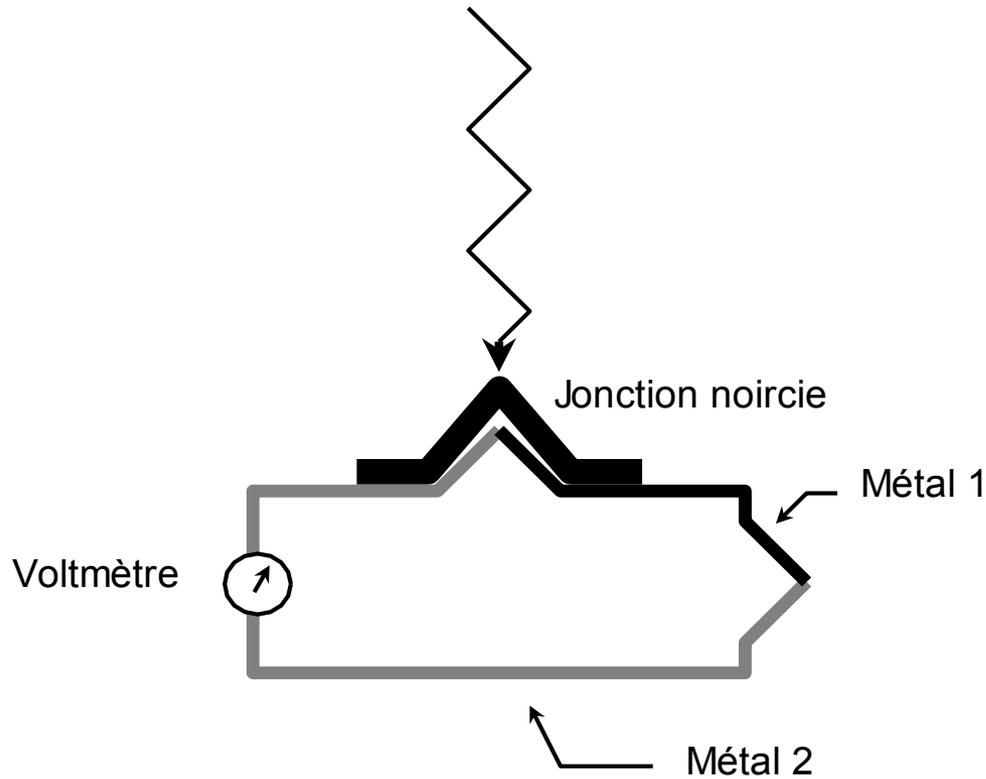
Pyroélectrique

## **Semi-conducteurs:**

Photoconductifs

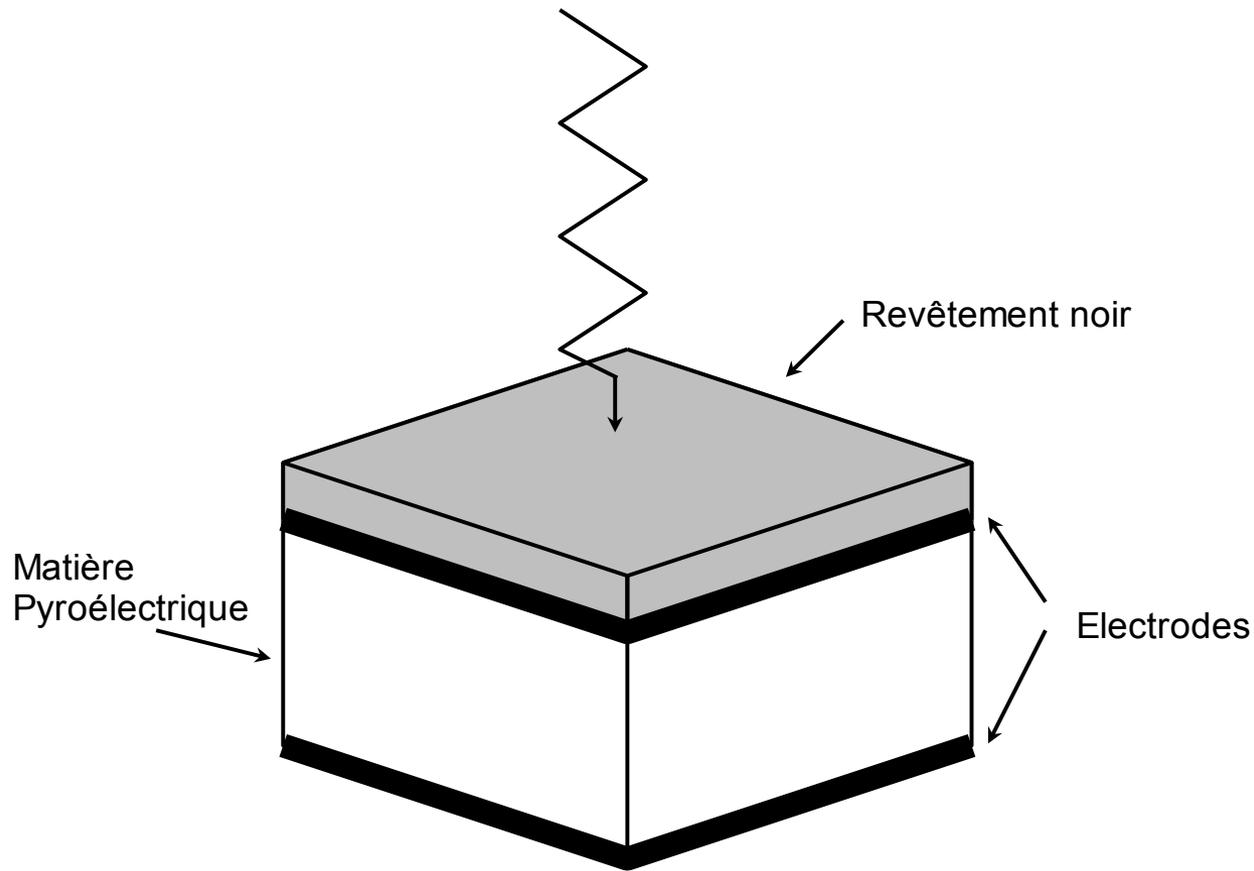
Photodiode

CCD



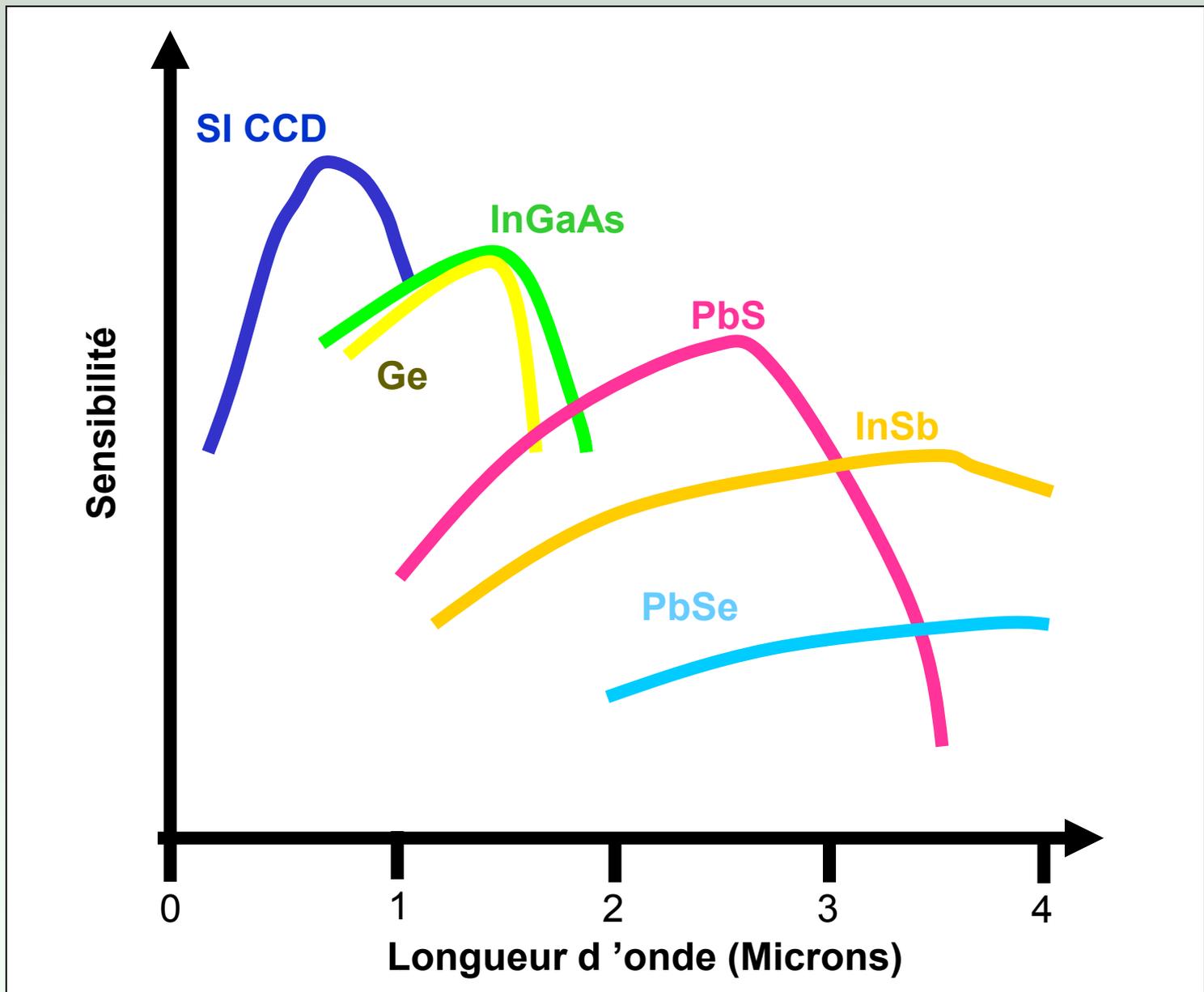
Thermocouple: connexion de deux métaux de nature différentes (Bismuth et antimoine)

Thermopile : série (20 à 100) de thermocouples



## Détecteur pyroélectrique

le matériaux se dilate sous l'effet de la température, ce qui se traduit par un changement des charges électriques



Plage spectrale des matériaux photosensibles dans le proche infrarouge

## **Semi-conducteurs:**

### Photoconductifs

Les photons incidents absorbés sont à l'origine de variation dans la conductivité du détecteur.

*Détecteur au sulfure de plomb (PbS) très couramment utilisé dans l'infrarouge*

### Photodiode

Semi-conducteurs de type p-n

Silicium utilisable dans le visible et le proche infrarouge

Arséniure d'Indium actif entre 1500 et 4000 nm

### CCD

*Charge coupled device*

Barrette ou matrice de semi-conducteurs

Souvent à base de silicium

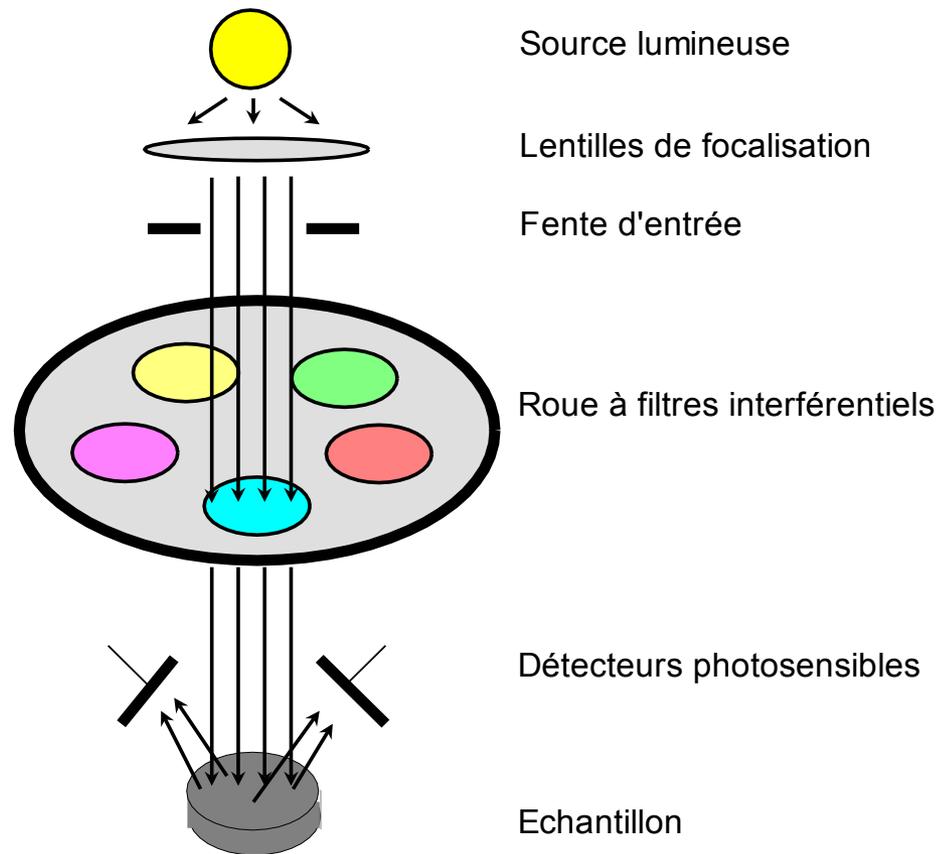
Spectromètres  
proche IR

- Une seule source lumineuse  
- Un seul détecteur
- Plusieurs sources lumineuses  
- Un seul détecteur
- Multicanaux  
(plusieurs détecteurs)

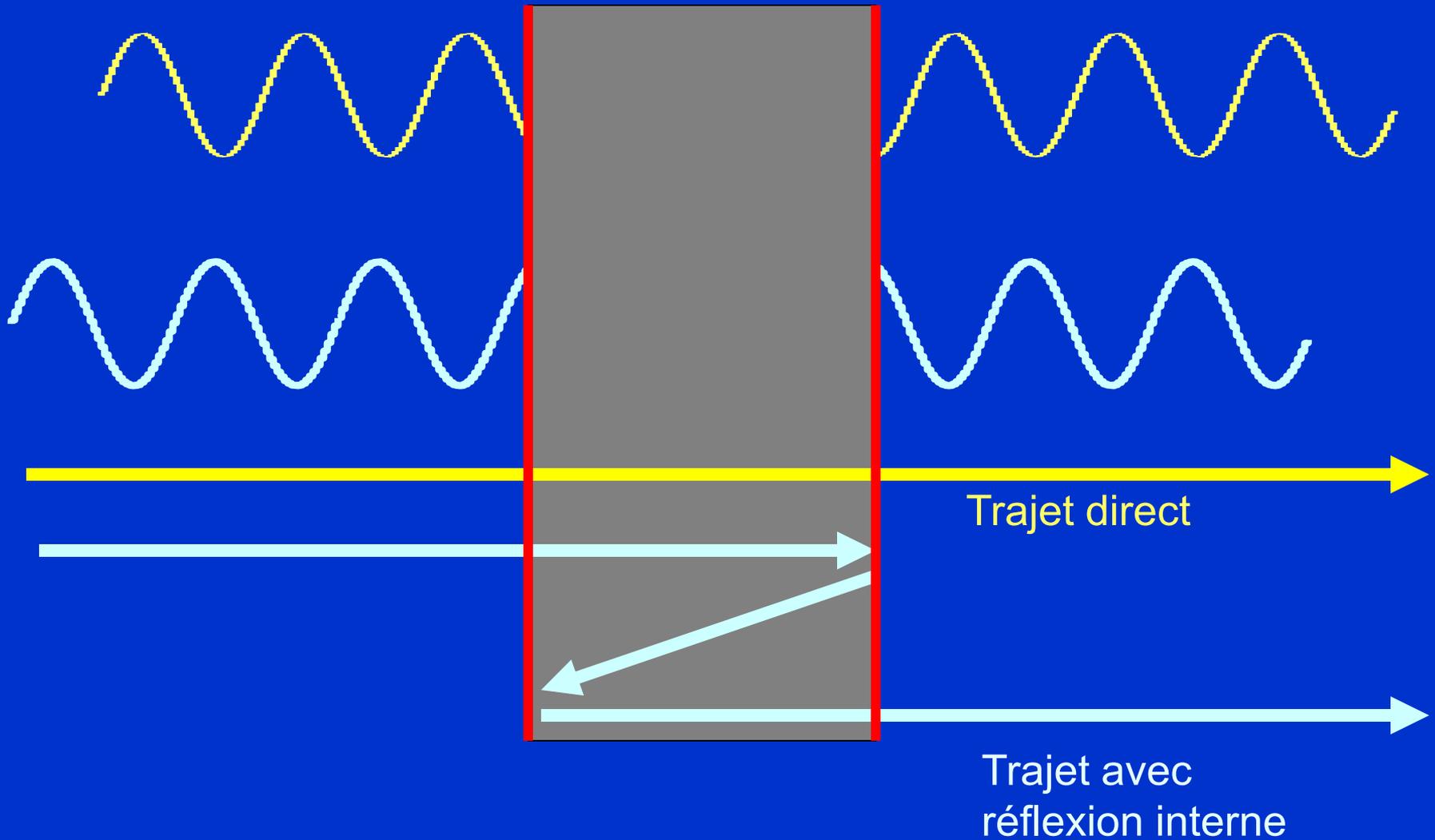
## Filtres optiques Monochromateurs

LED émettrices

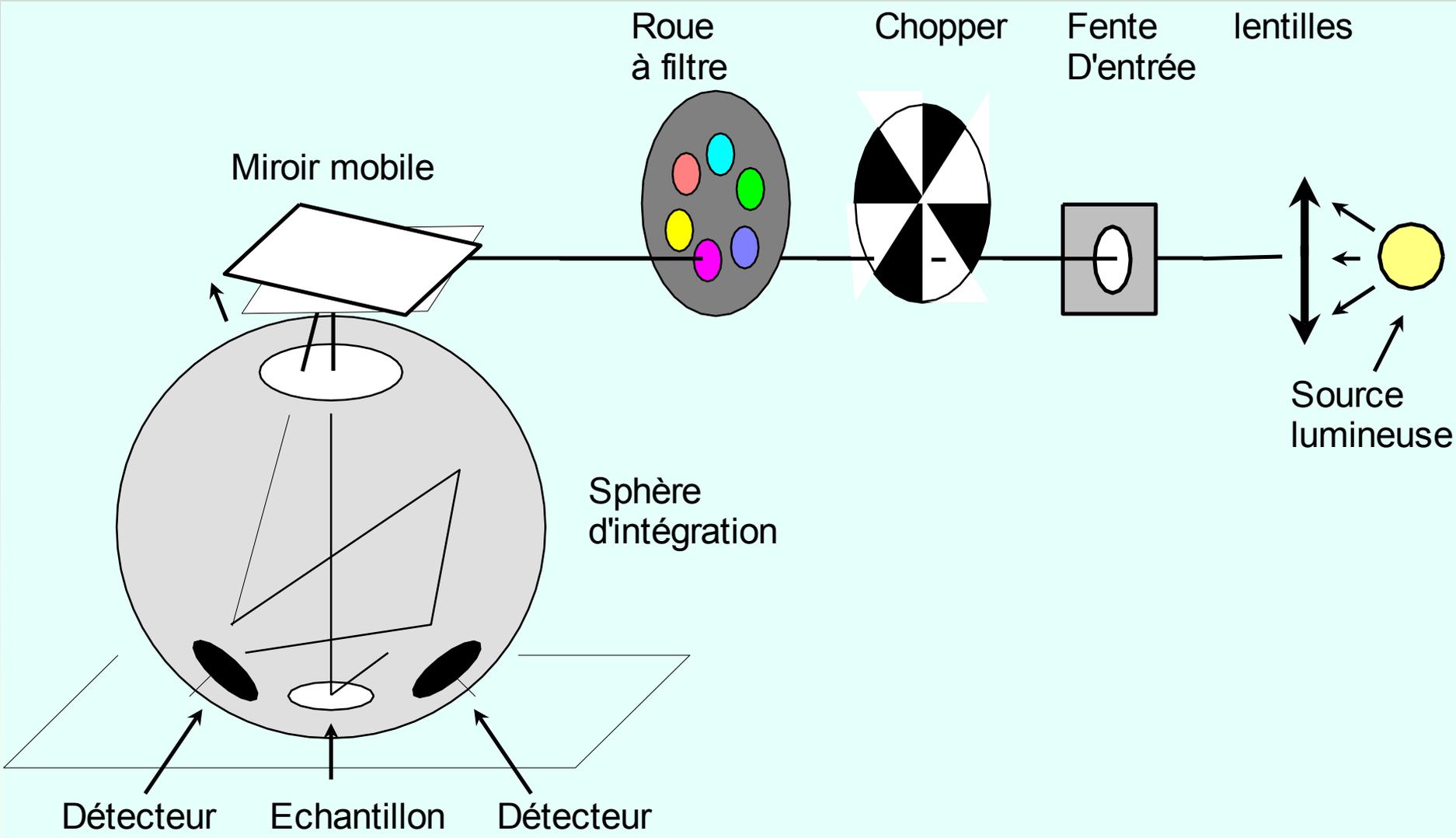
LED photosensibles  
Caméra CCD



## Principe d'un spectromètre à filtres tournants



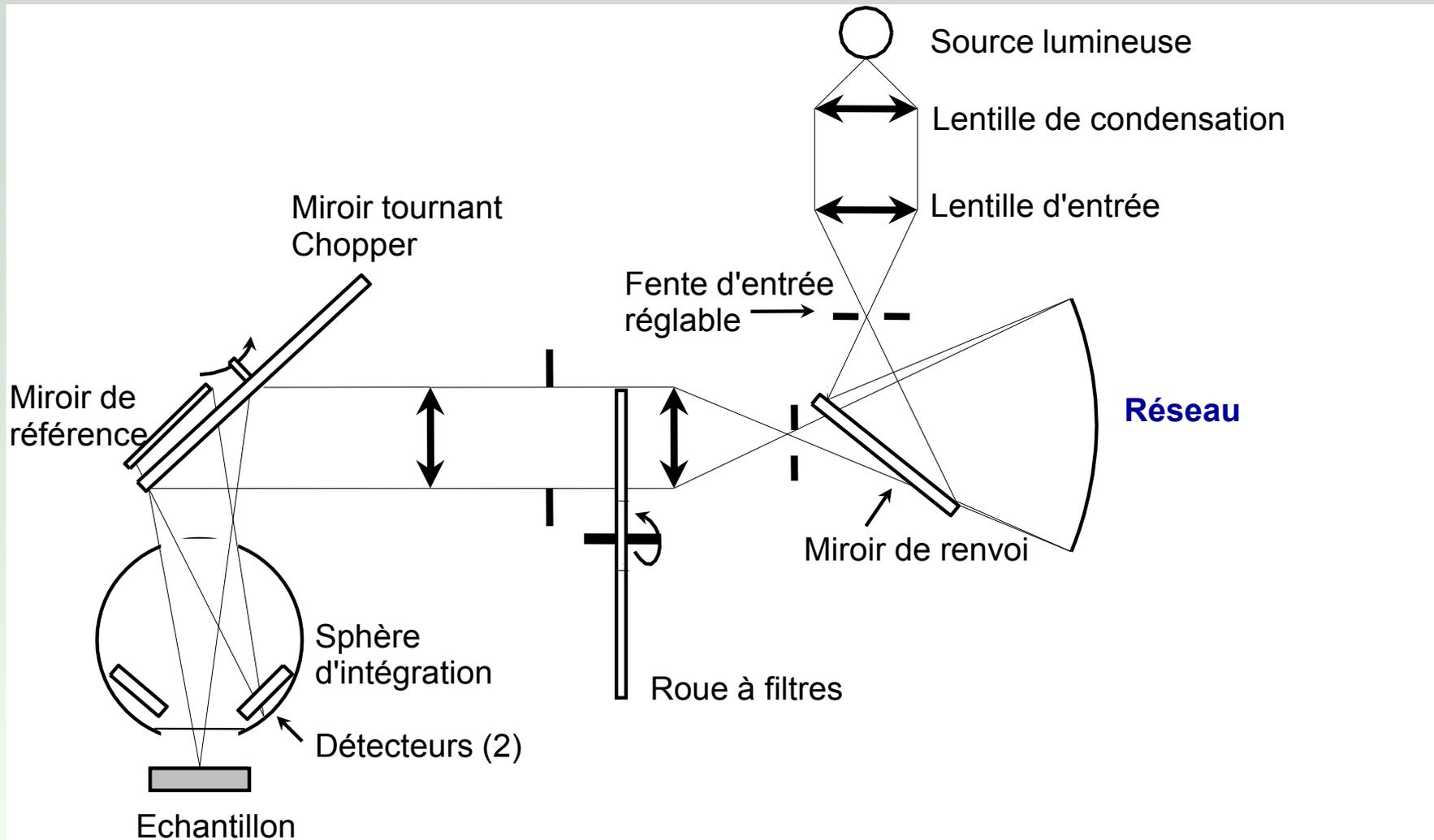
## Principe des filtres optiques interférentiels



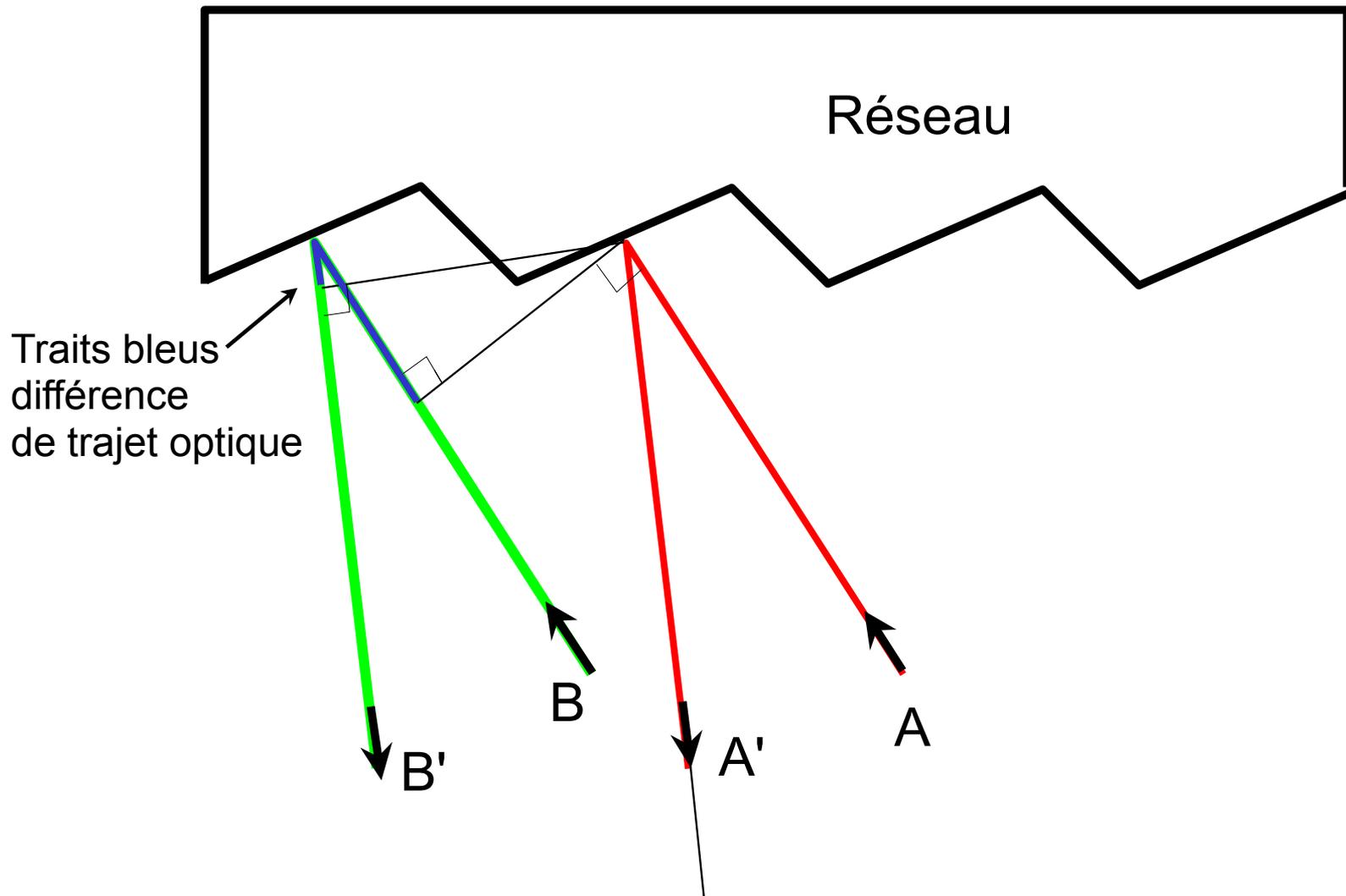
# Spectromètre à filtres optiques

## **Longueurs d'onde lumineuse souvent retenues dans les applications analytiques agro-alimentaires**

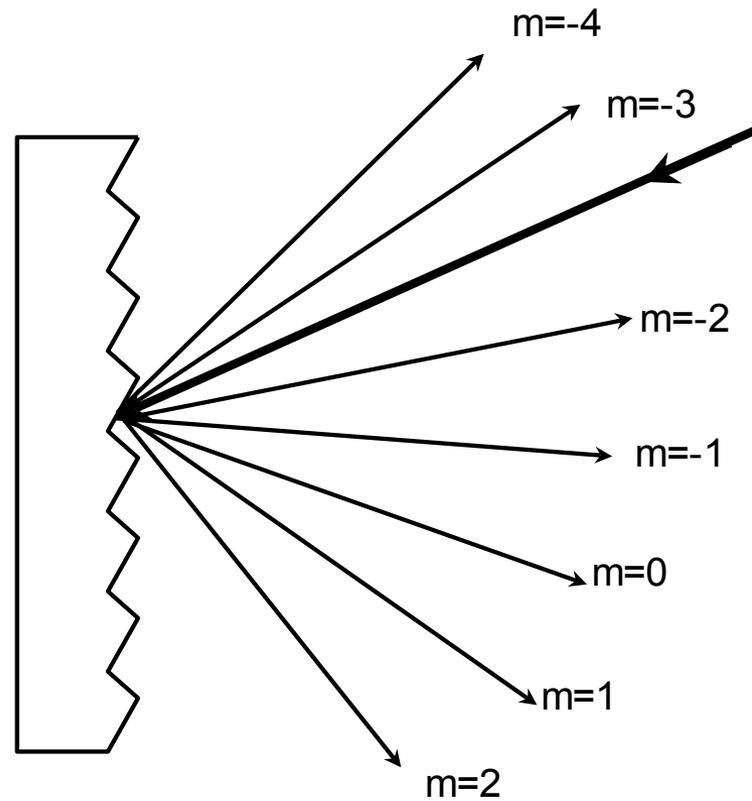
<b><u>Longueur d'onde (nm) analytique</u></b>	<b><u>Constituant dosé ou rôle</u></b>
1445	Eau
1680	Référence
1722	Amidon, cellulose
1734	Protéines
1759	Lipides
1778	Amidon, cellulose, fibre
1818	Cellulose
1940	Eau
2100	Amidon, sucres
2140	Protéines
2180	Protéines
2190	Protéines, amidon
2230	Référence
2270	Lignine
2310	Lipides
2336	Fibres
2348	Cellulose



## Appareil à monochromateur



## Principe d'un monochromateur



Différents ordres de diffraction d'un monochromateur à réseau

# Spectromètres séquentiels

## A filtres:

Entre 3 et 20 filtres

Bon marché

Transfert d'étalonnage assez difficile

Bien adaptés aux produits dispersifs (poudres)

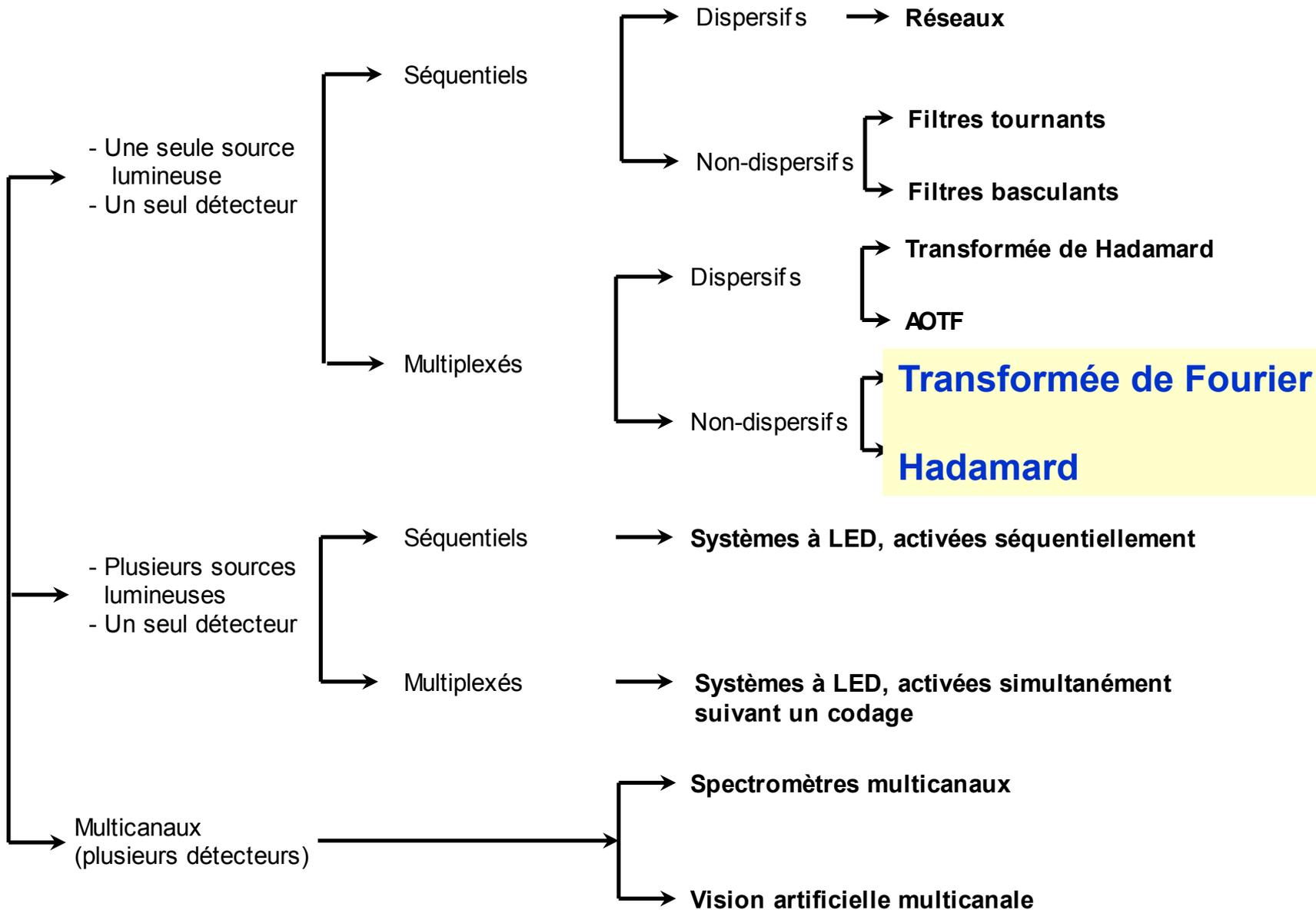
## A monochromateurs:

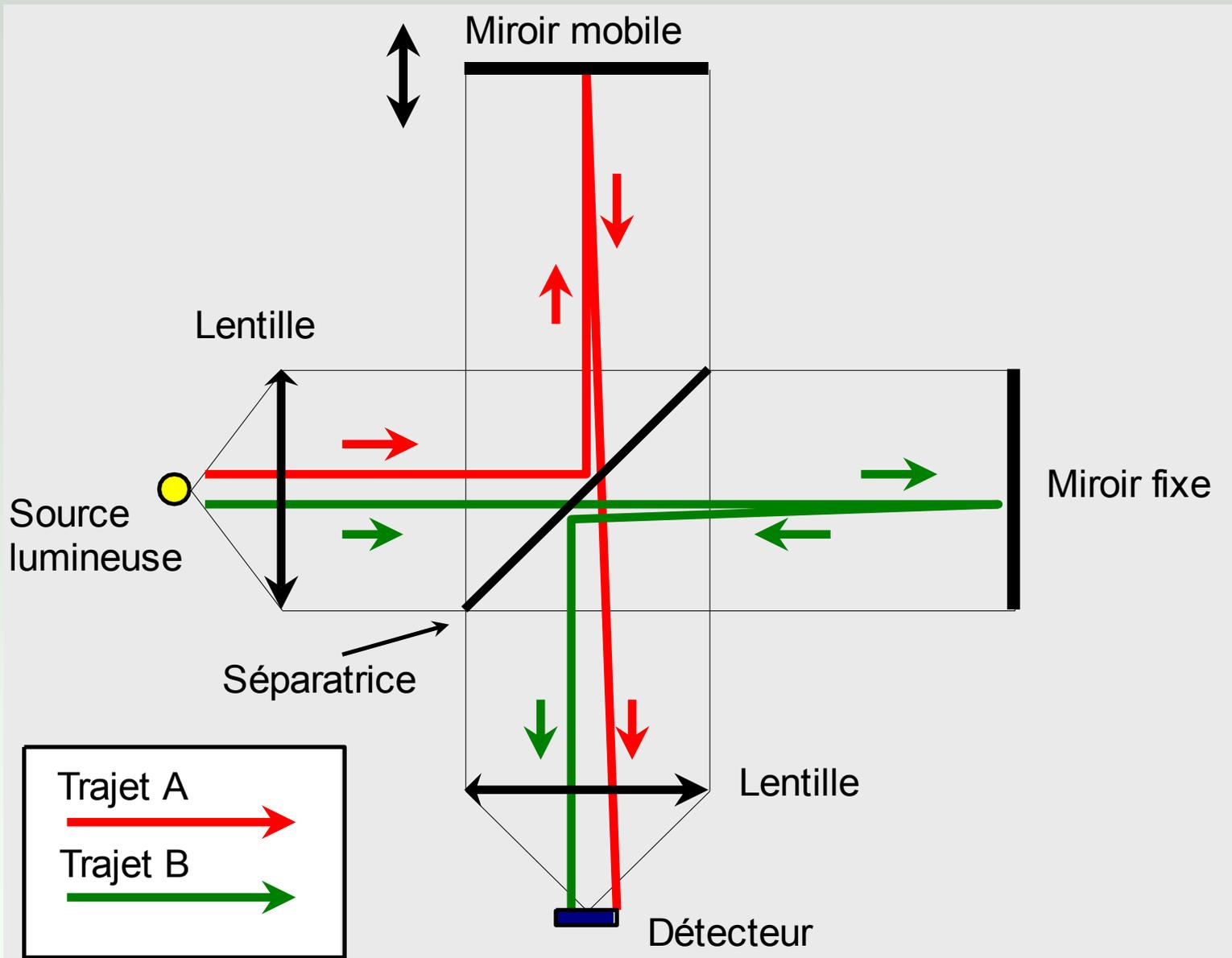
Typiquement mesures entre 1100 et 2500 nm  
avec un pas de 2 nm

Bien adaptés aux produits dispersifs

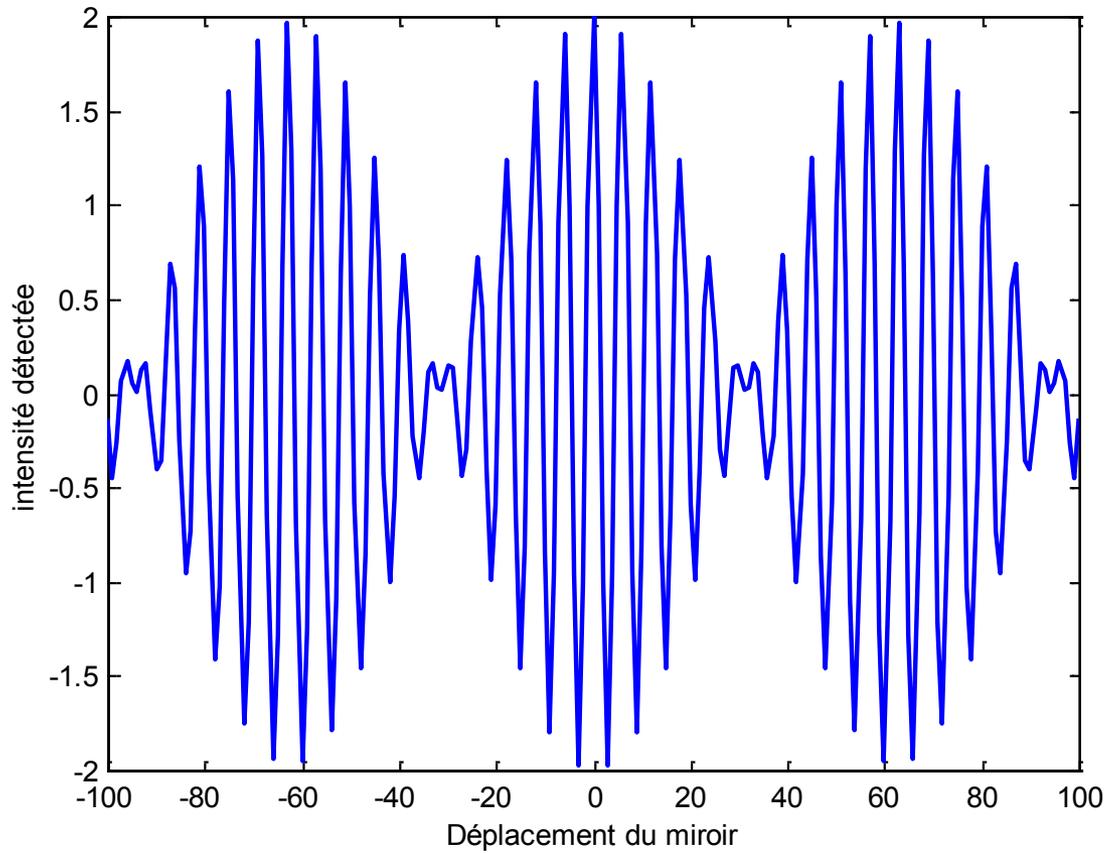
Spectres pratiquement continus, ce qui facilite  
les transferts d'étalonnage.

Spectromètre infrarouge

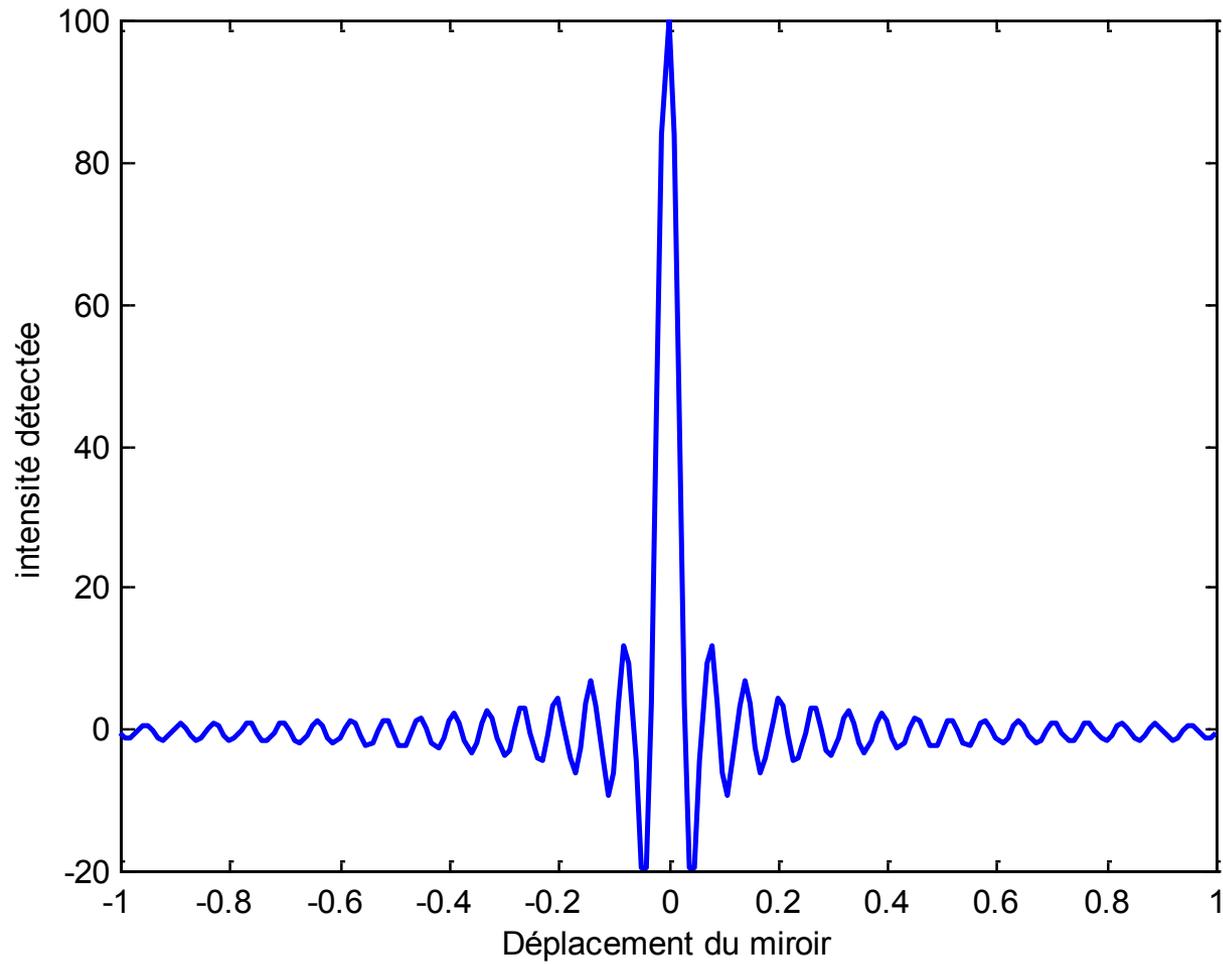




**Principe d'un spectromètre à transformée de Fourier<sup>30</sup>**

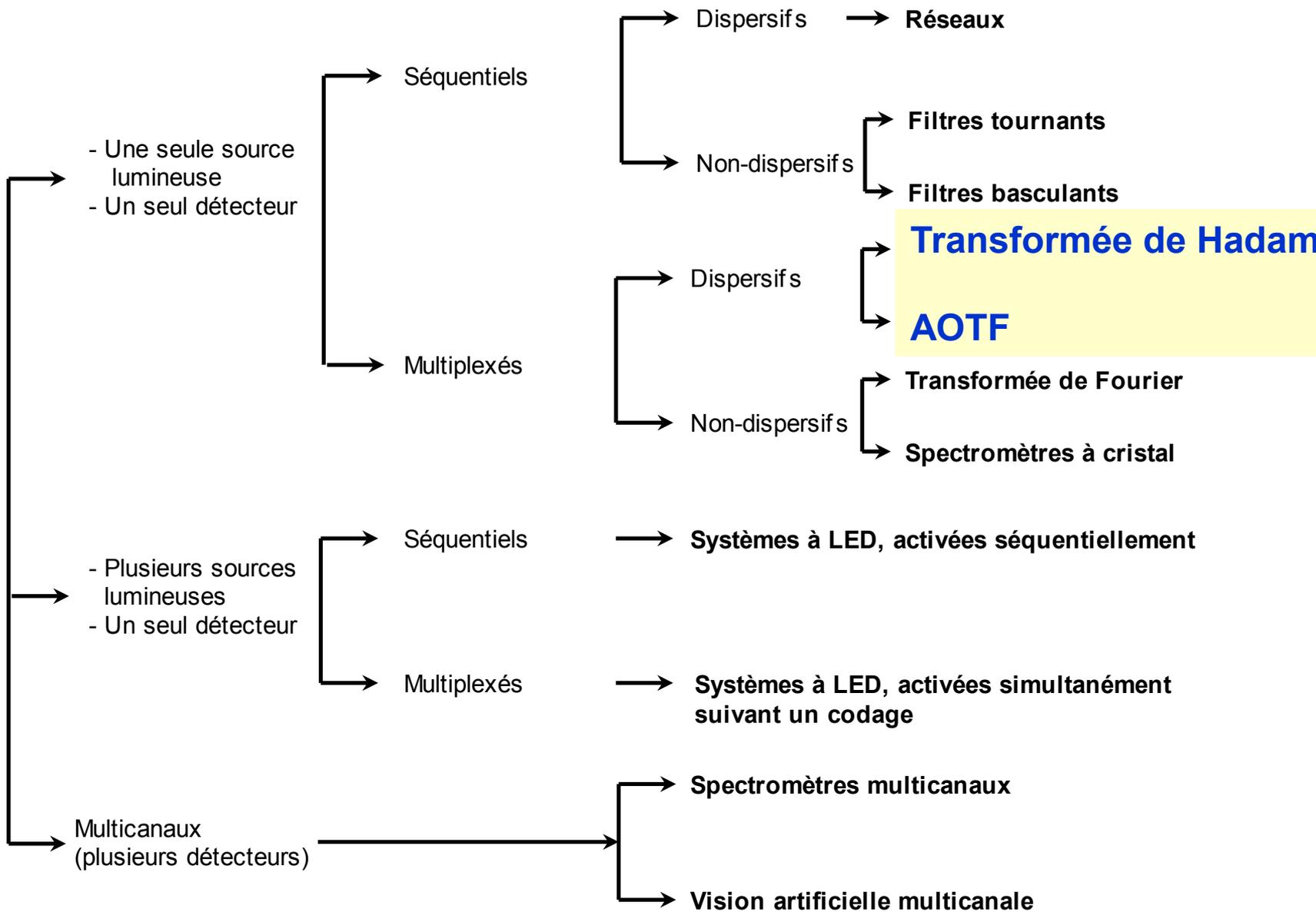


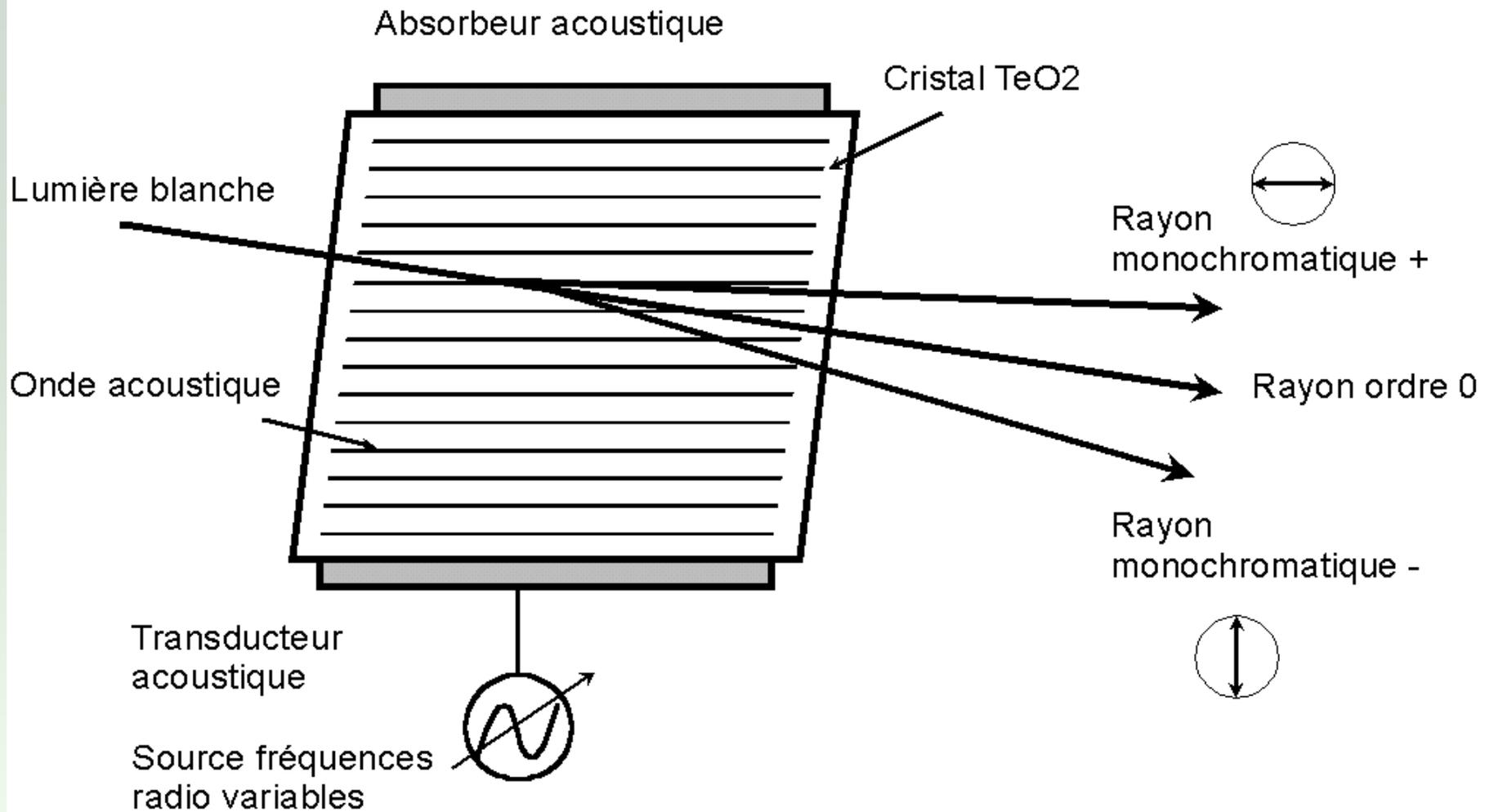
**Interférences de deux longueurs d'onde lumineuses voisines**



## Interférogramme théorique

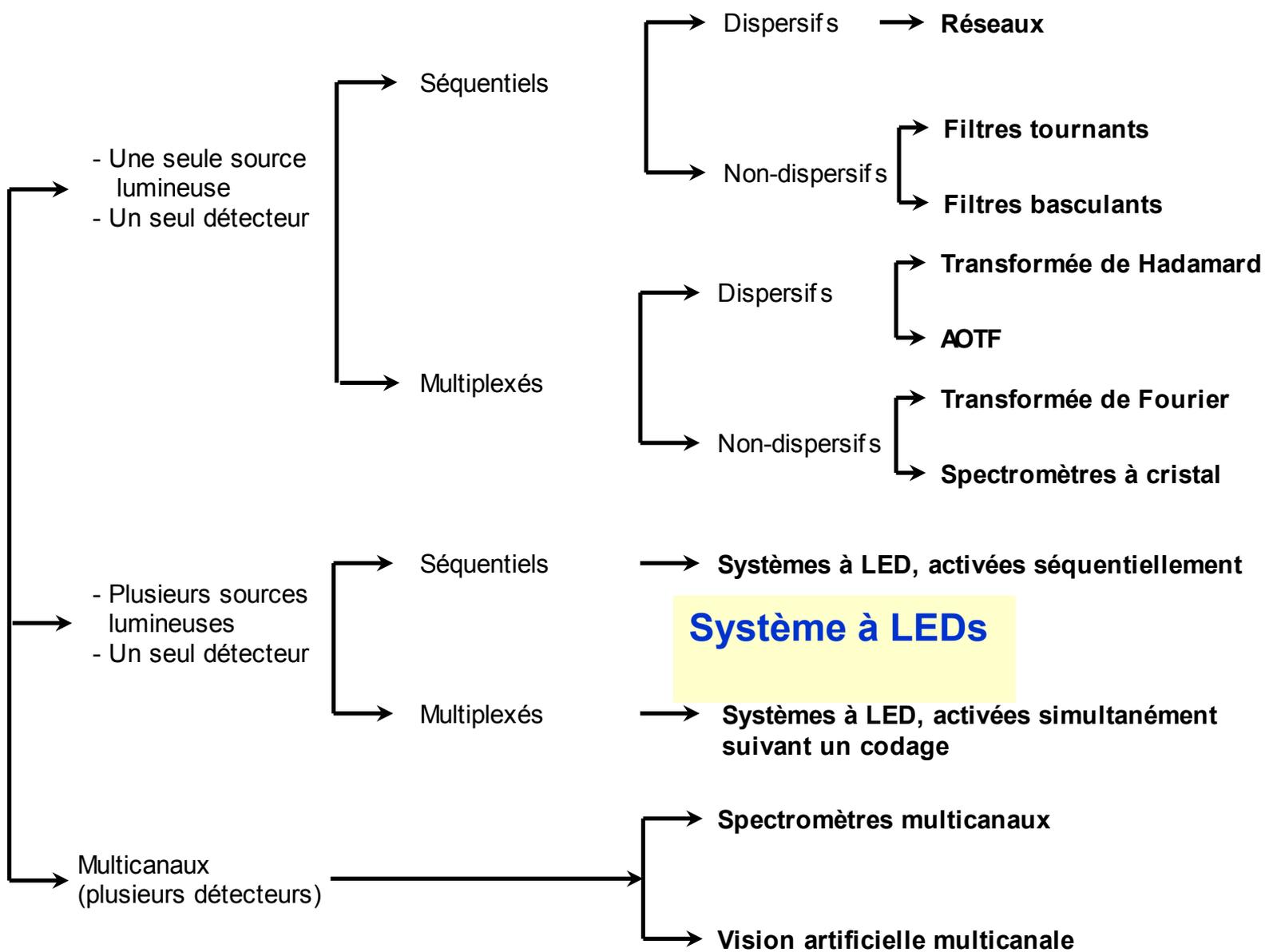
Spectromètre infrarouge

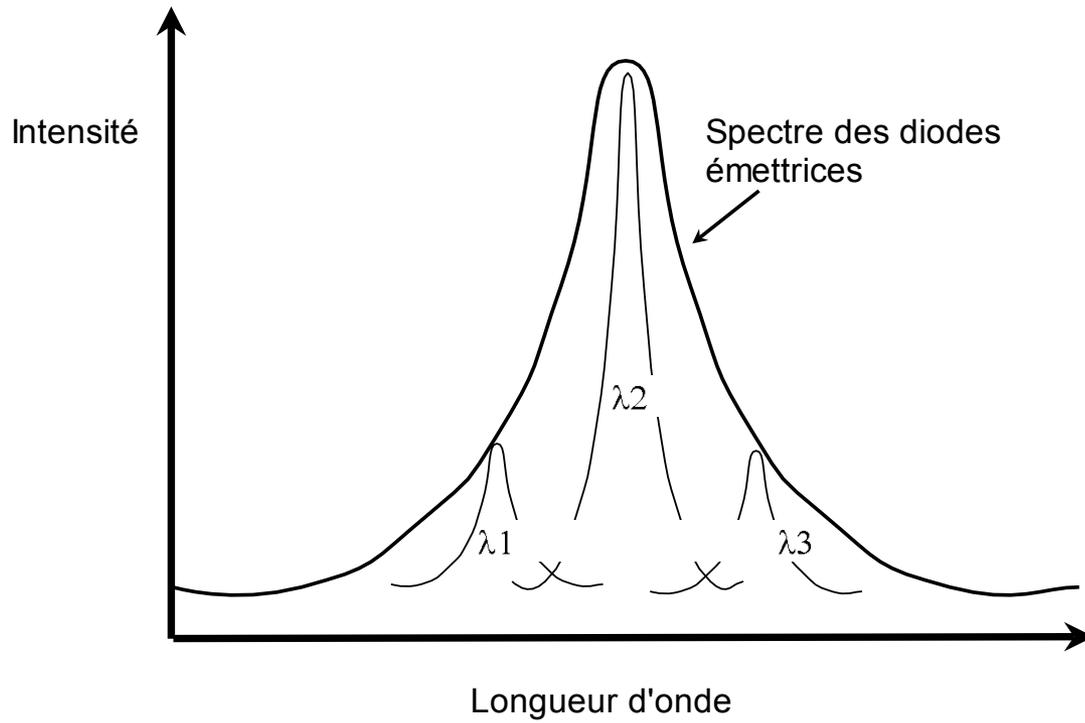




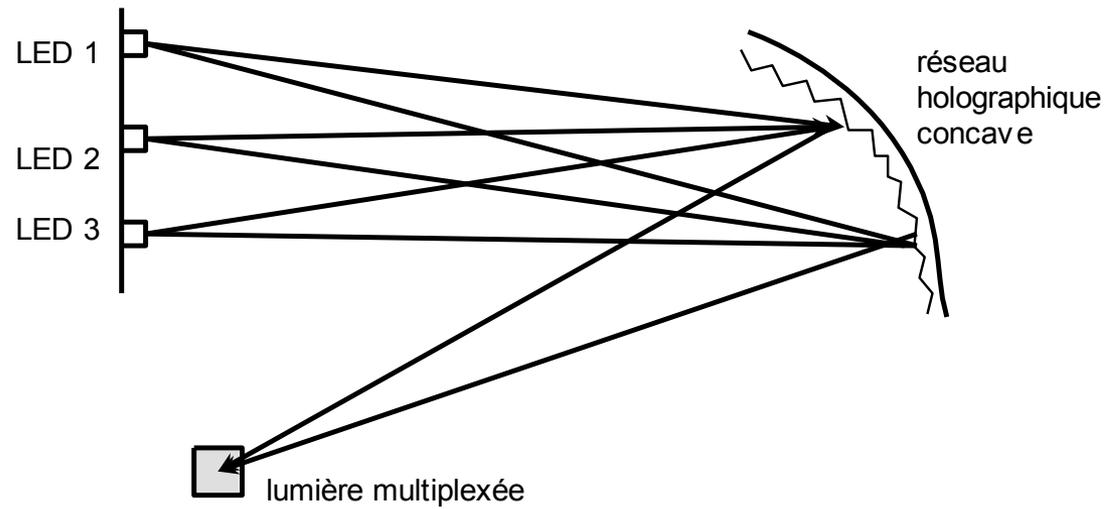
## Filtre acoustico-optique modulable (acoustico-optic tunable filter, AOTF)

Spectromètre infrarouge

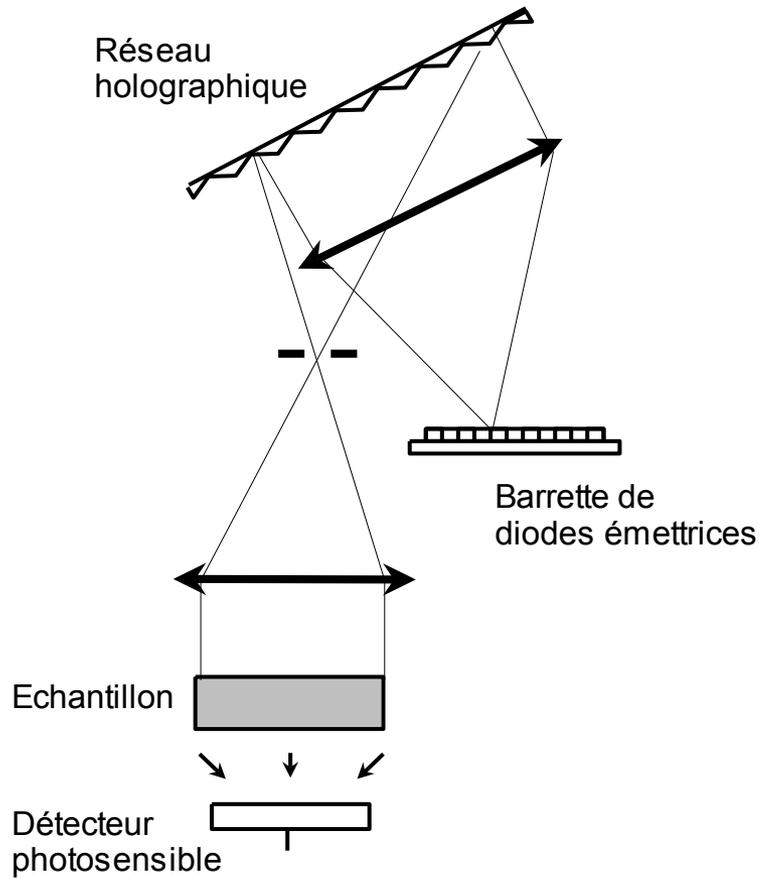




## Sélection des longueurs d 'onde des LED

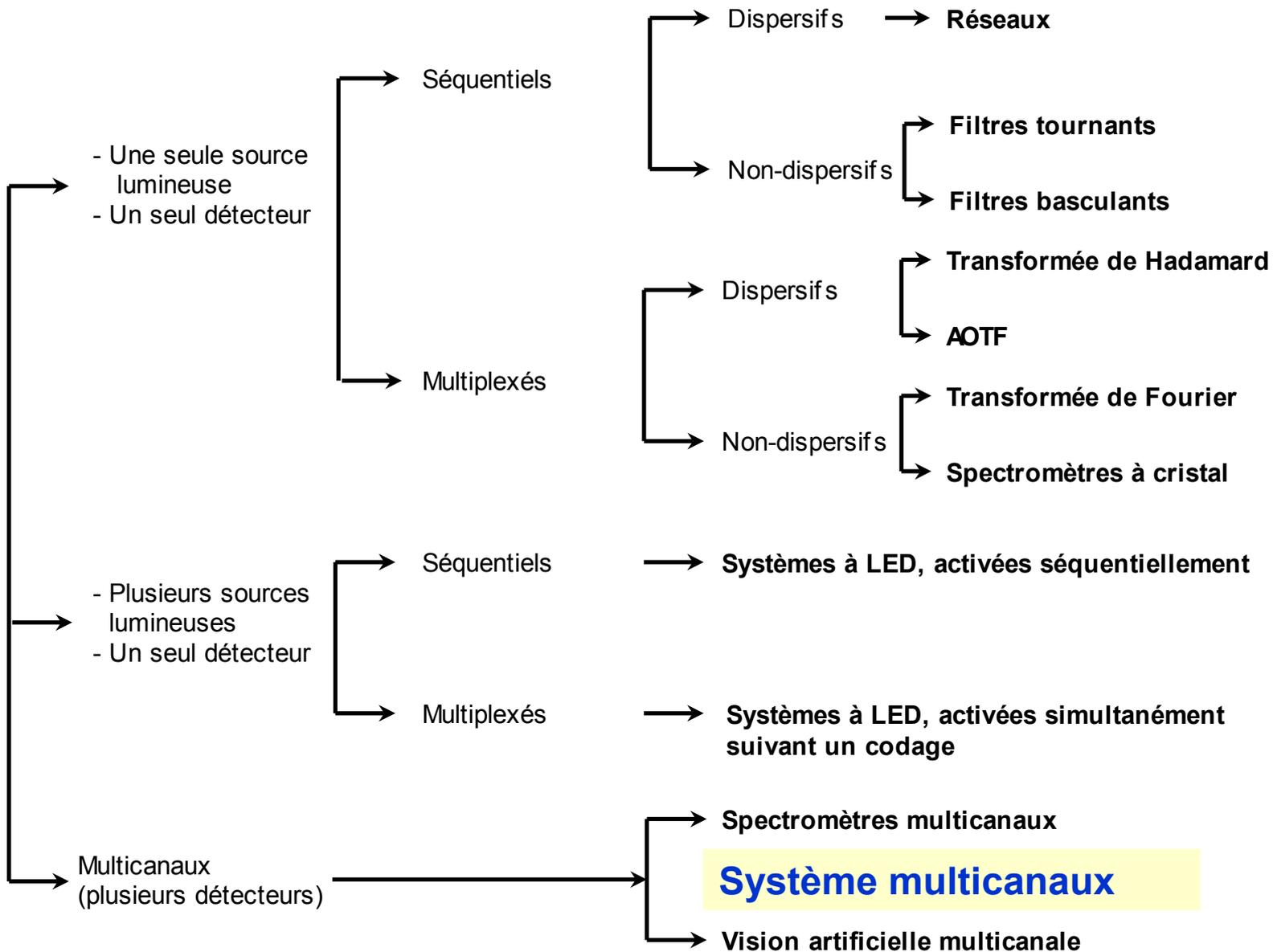


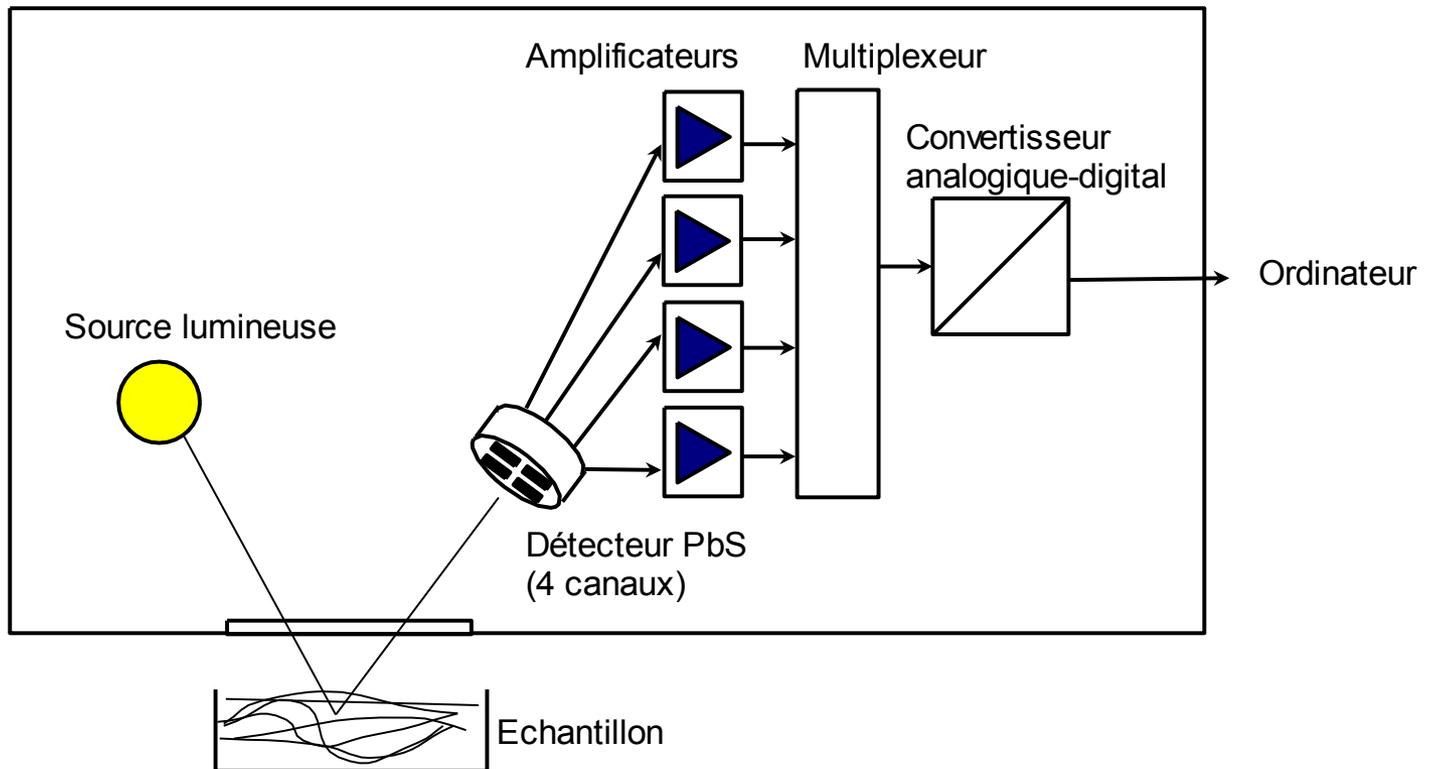
Dispositif de "dédispersion" de la lumière dans un système multisource



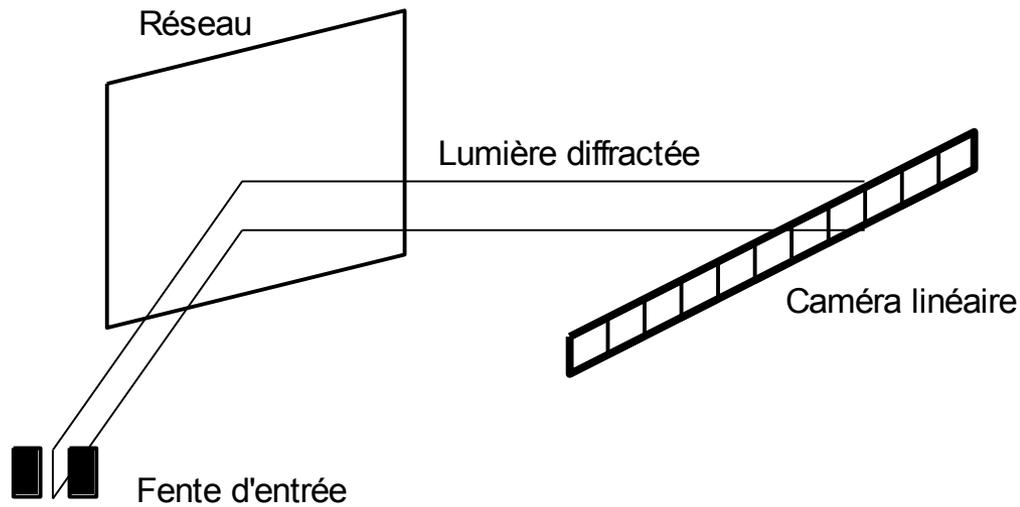
**Principe d'un spectromètre à diode émettrice de lumière**

# Spectromètre infrarouge



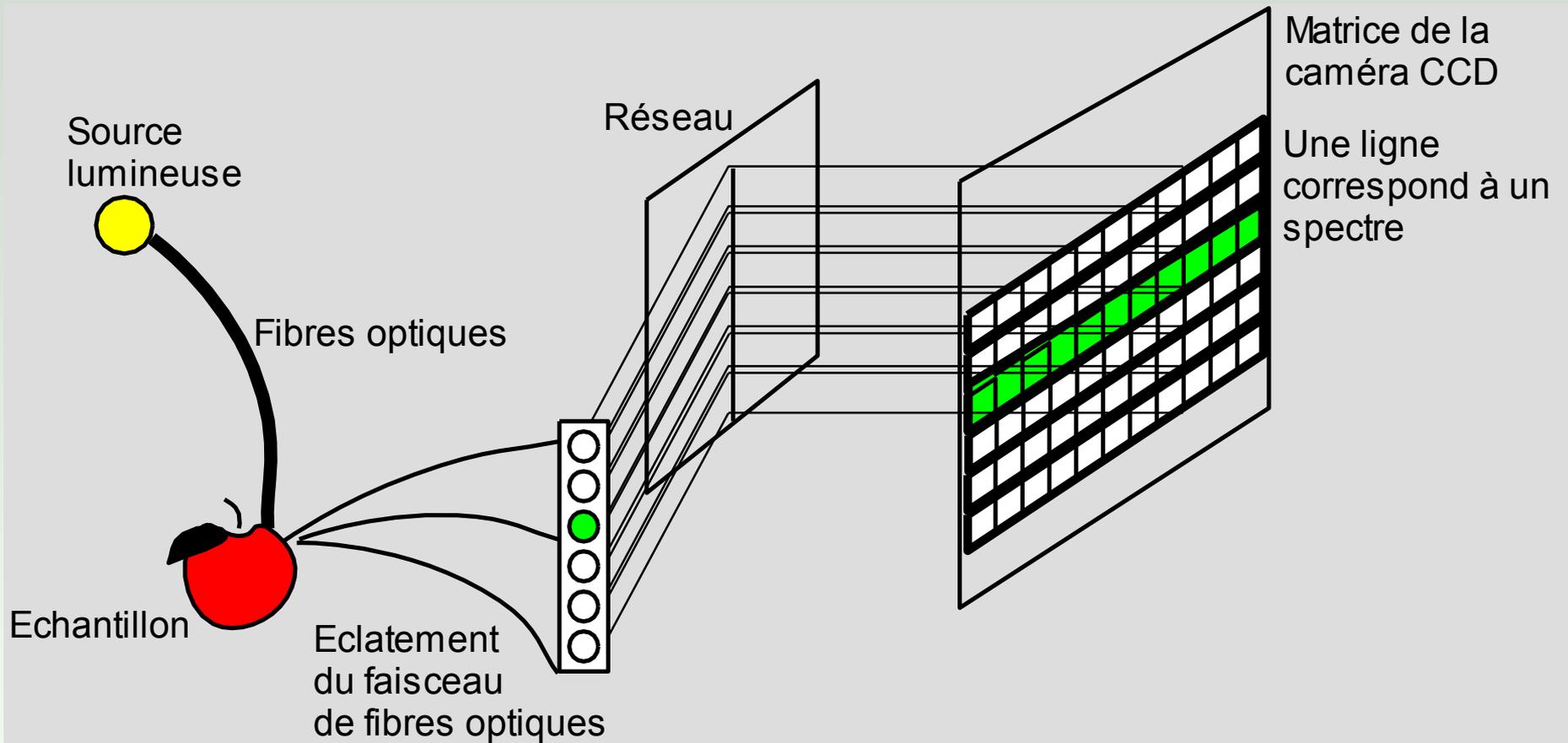


## Spectromètre multicanal

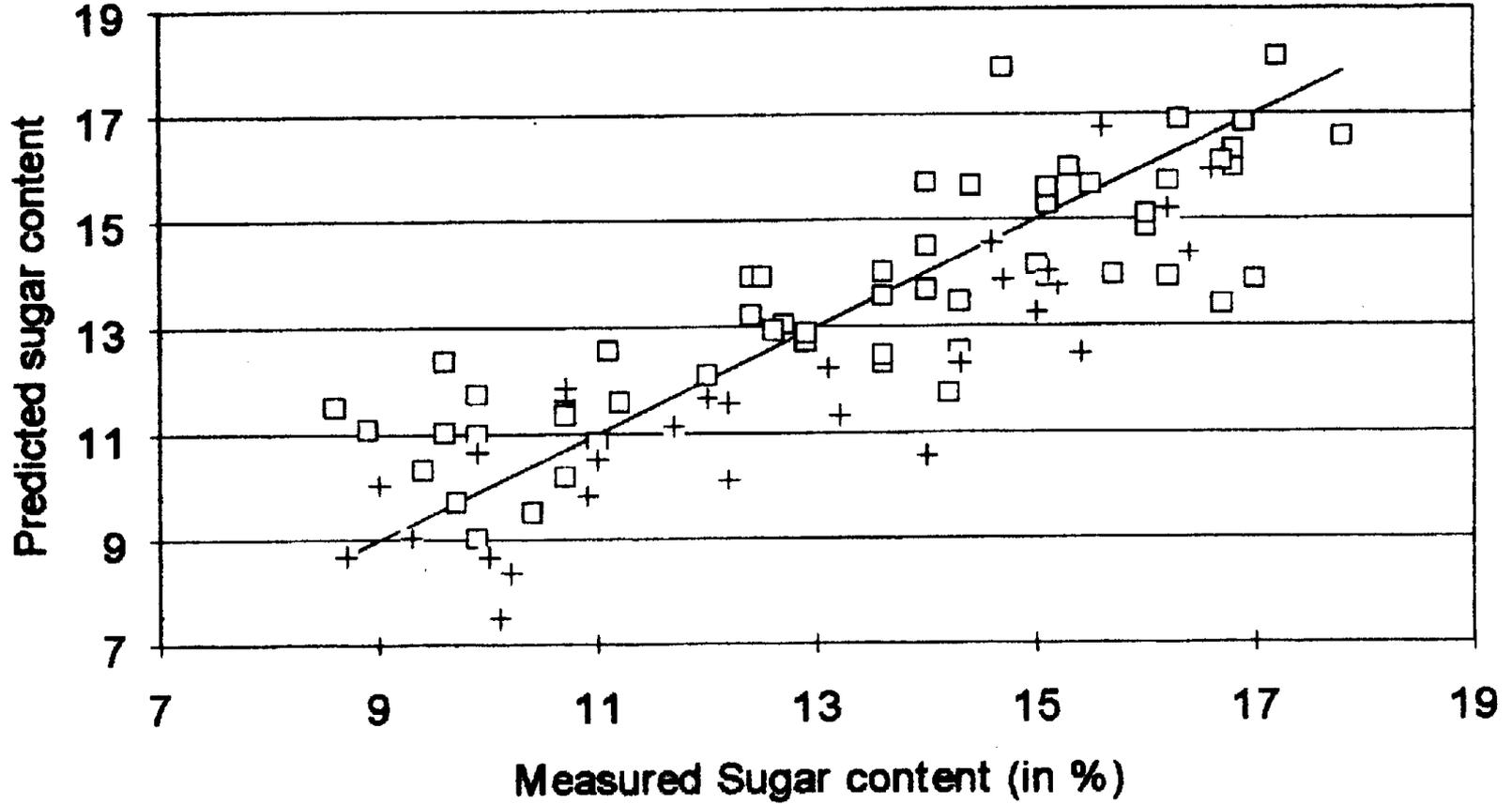


## **Spectromètre multicanal à réseau. Système mettant en jeu une caméra linéaire**

(Bellon,-Maurel et al, 1996)

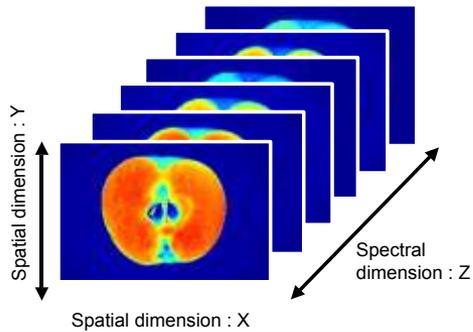


**Spectromètre multicanal à réseau.  
 Système mettant en jeu une caméra matricielle  
 (Bellon,-Maurel et al, 1996)**



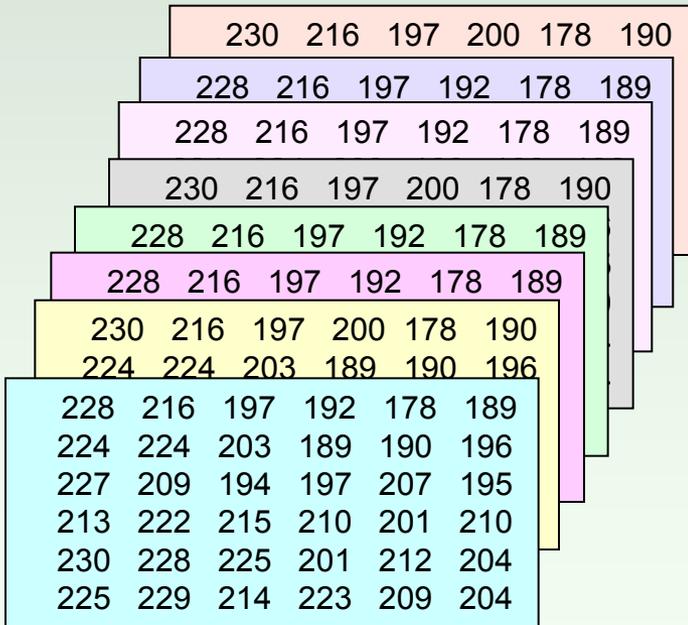
**Dosage des sucres à l'aide d'un spectromètre multicanal (Bellon,-Maurel et al, 1996)**

## Multiway images: data cubes

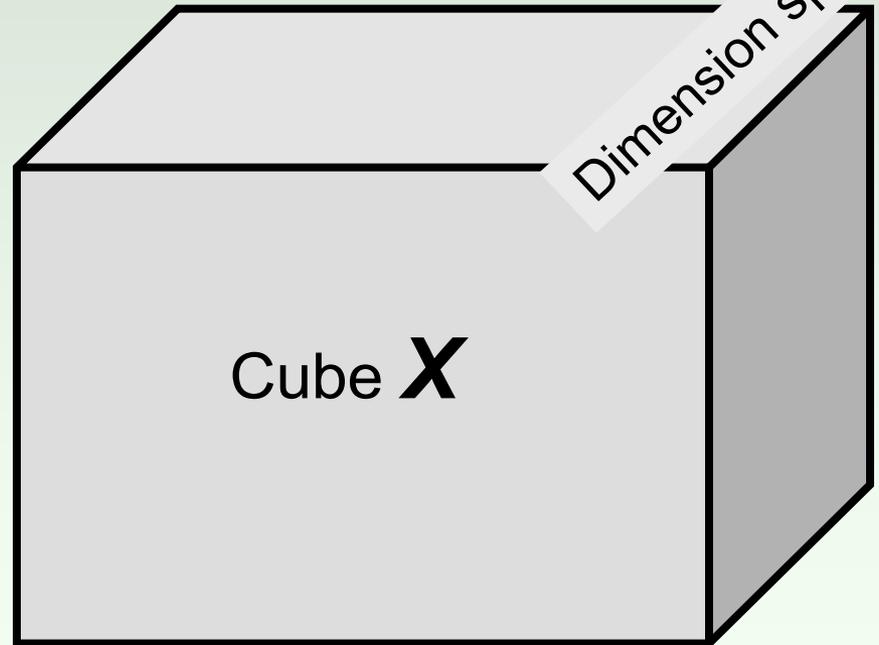


# Codage des images multivariées

$X_{ijk}$  : intensité en position  $\{i,j\}$  pour le plan  $k$



Dimension spatiale j

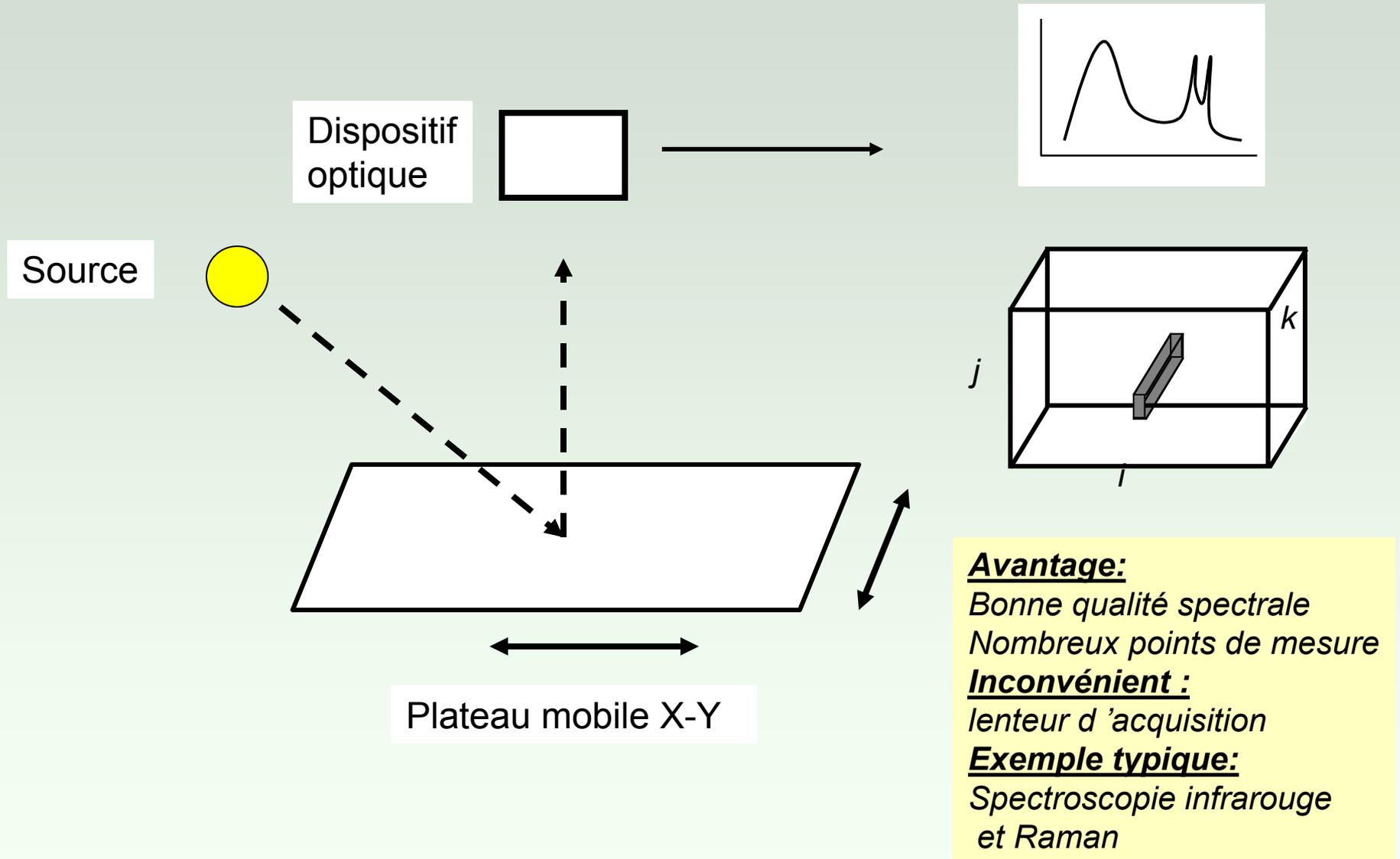


Dimension spatiale i

# Principes généraux d'acquisition des images multivariées (1)

## ***Balayage par points***

(Un seul spectre à la fois)



### **Avantage:**

*Bonne qualité spectrale  
Nombreux points de mesure*

### **Inconvénient :**

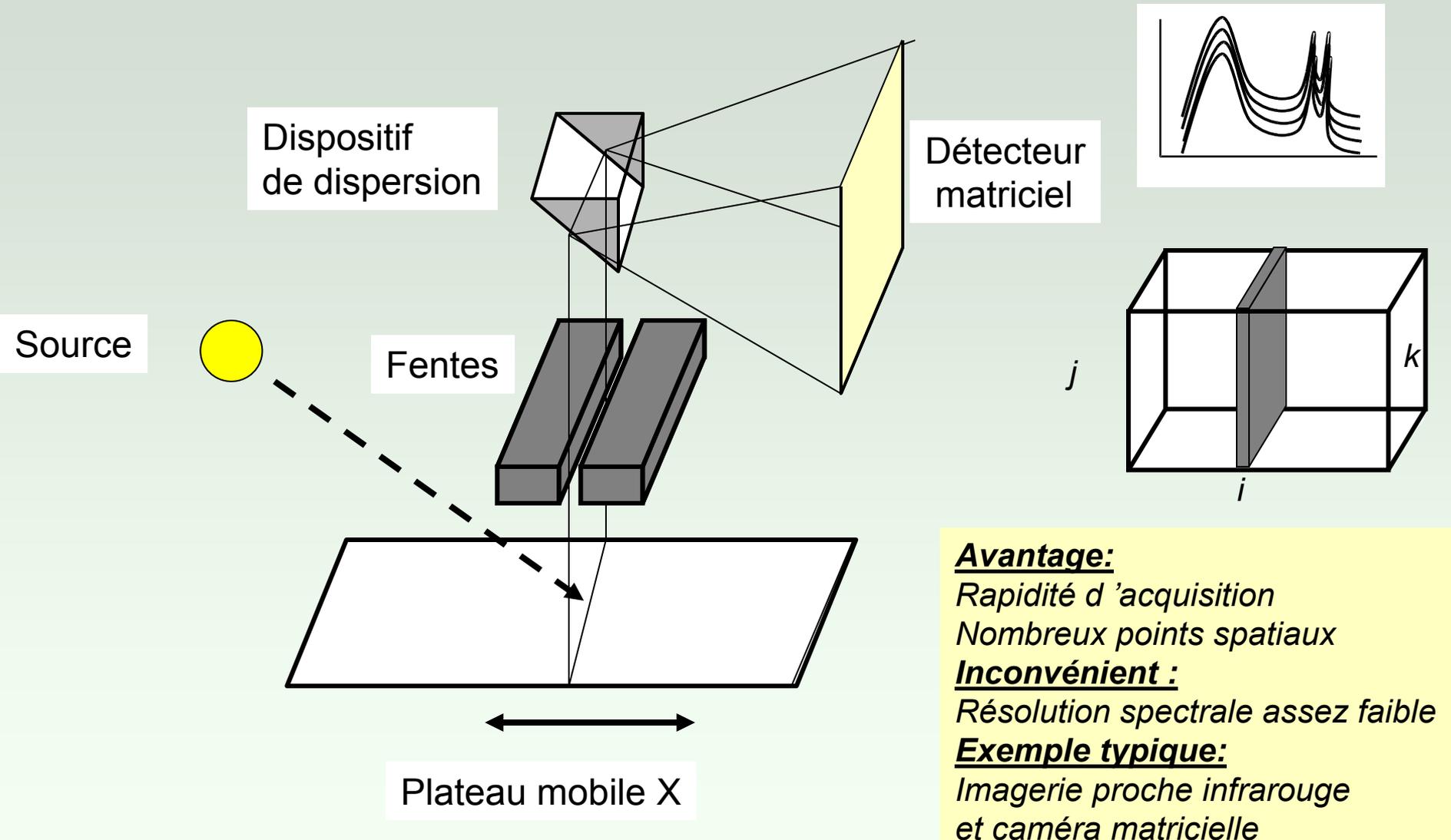
*lenteur d'acquisition*

### **Exemple typique:**

*Spectroscopie infrarouge  
et Raman*

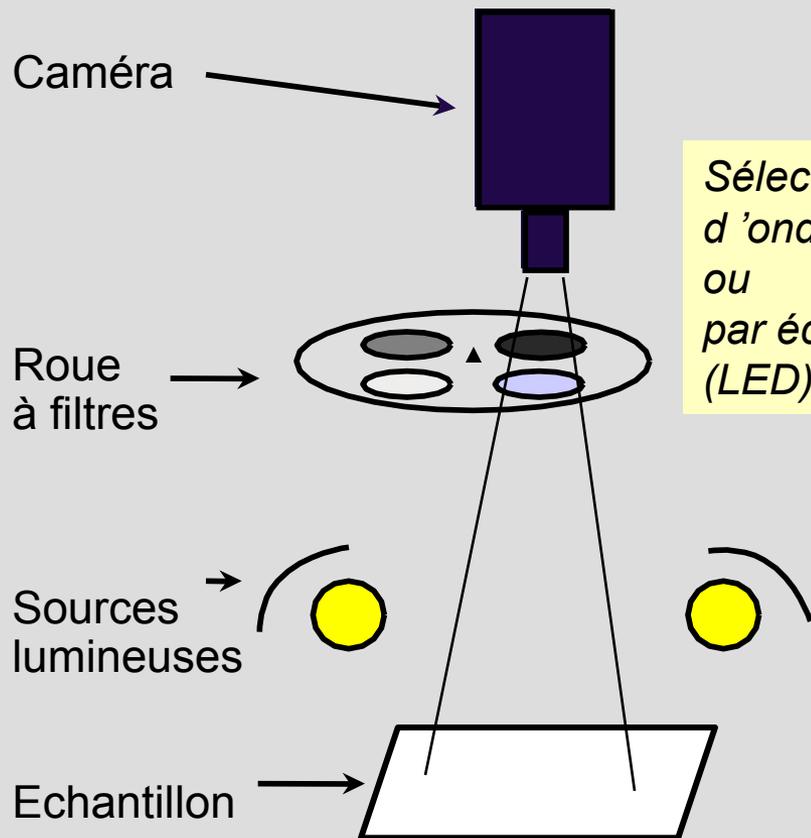
# Principes généraux d'acquisition des images multivariées (2)

## *Balayage par lignes*

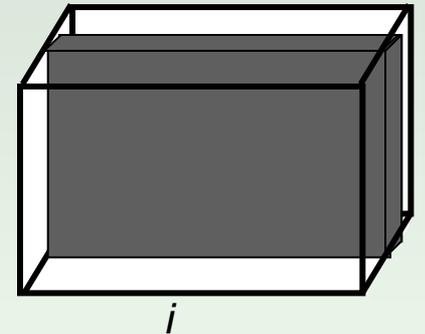
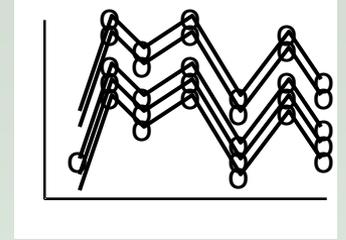


# Principes généraux d'acquisition des images multivariées (3)

## *Balayage matriciel*



*Sélection des longueurs d'onde par filtres optiques ou par éclairage monochromatique (LED)*



### **Avantage:**

*Grande rapidité d'acquisition  
Nombreux points spatiaux  
Simplicité*

### **Inconvénient :**

*Faible résolution spectrale*

### **Exemple typique:**

*Systeme Videometer®*

## Etude de végétaux

*Taylor et McClure, 1989*

Caméra CCD équipée d'un système de roue à 6 filtres interférentiels

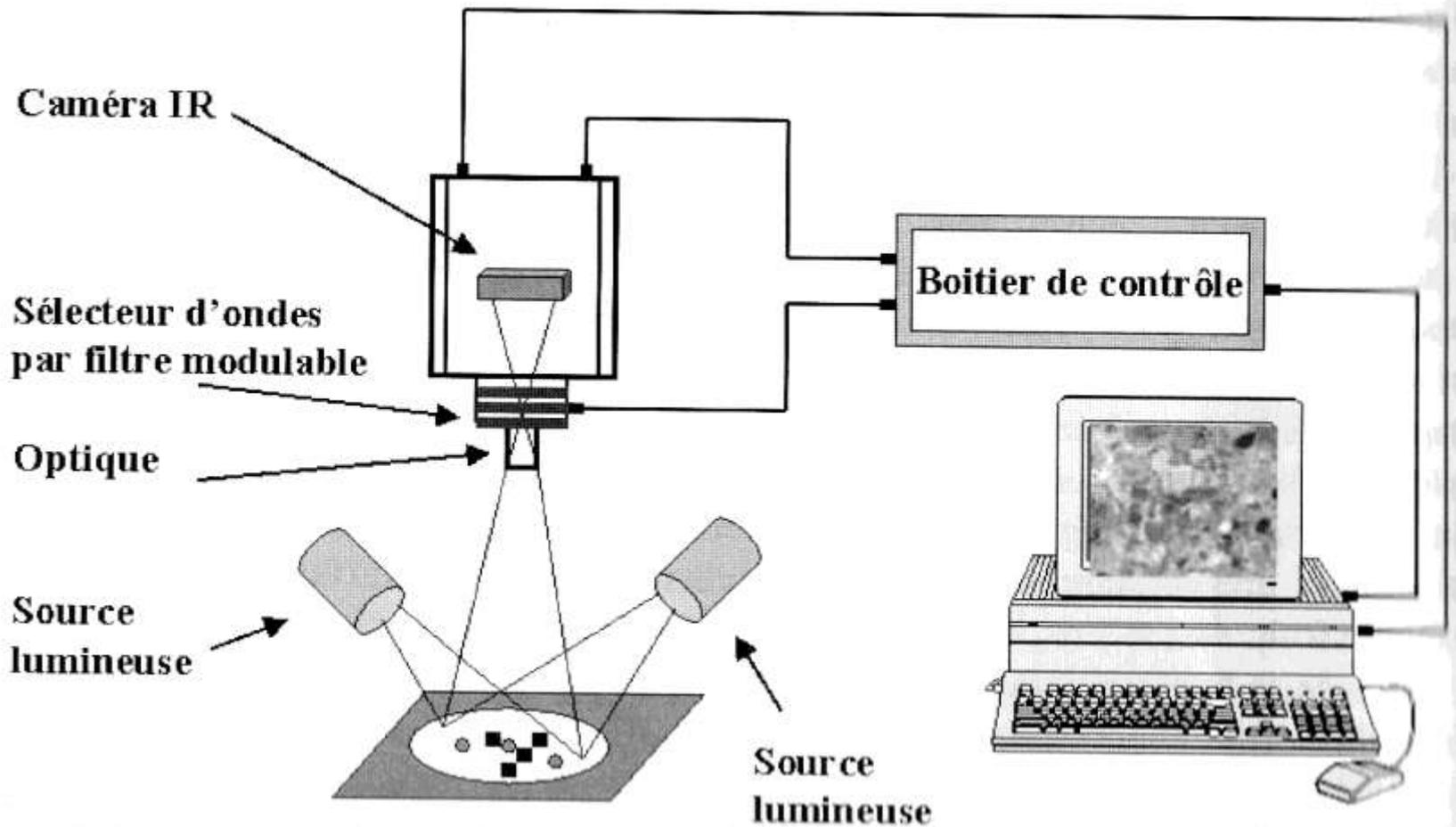
Image 320 x 240 pixels en 256 niveaux de gris

Etude sur des feuilles de *Magnolia*  
(champ de la caméra : de l'ordre de 3x3 cm)

Détection de la chlorophylle (filtre à 670 nm)

Parties malades (800 nm)

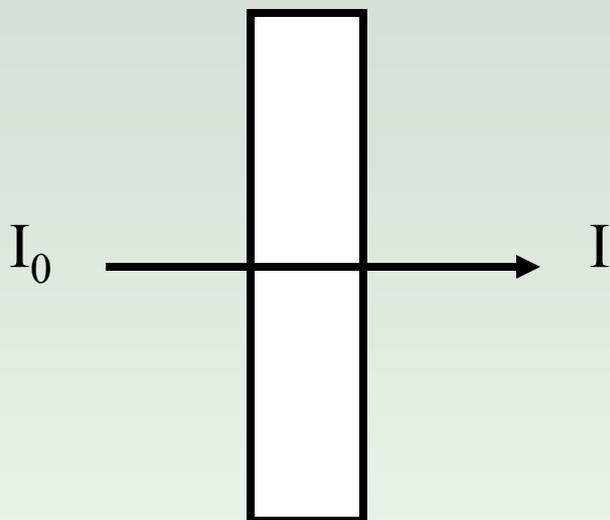
Détection de l'eau (910 et 960 nm)



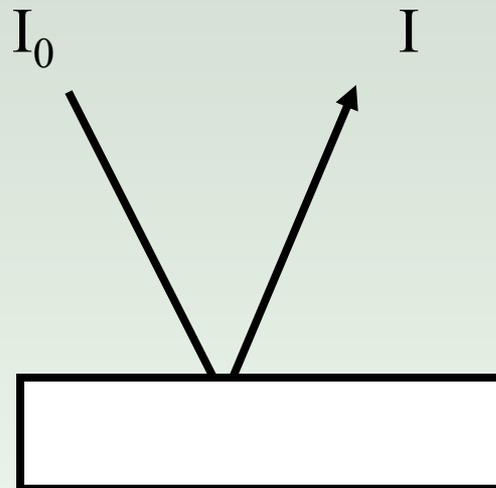
Dispositif d'imagerie hyperspectrale utilisé pour la détection de la farine animale dans les aliments composés à destination animale. (Baeten et al, 2003)

# ACCESSOIRES ET DISPOSITIFS SPECIAUX

# Transmission



# Réflexion



Transmittance:  $T = \frac{I}{I_0}$   
Réflectance :  $R = \frac{I_r}{I_0}$

Absorbance:  $A = -\log\left(\frac{1}{T}\right)$   
 $A = -\log\left(\frac{1}{R}\right)$

# FIBRES OPTIQUES

Utilisées pour transporter la lumière

Partie centrale de 50 à 1000  $\mu\text{m}$  qui guide la lumière entourée d'une gaine réfléchissante de diamètre compris entre 125 et 1050  $\mu\text{m}$ .

## **Matériaux :**

### Verre fluoré

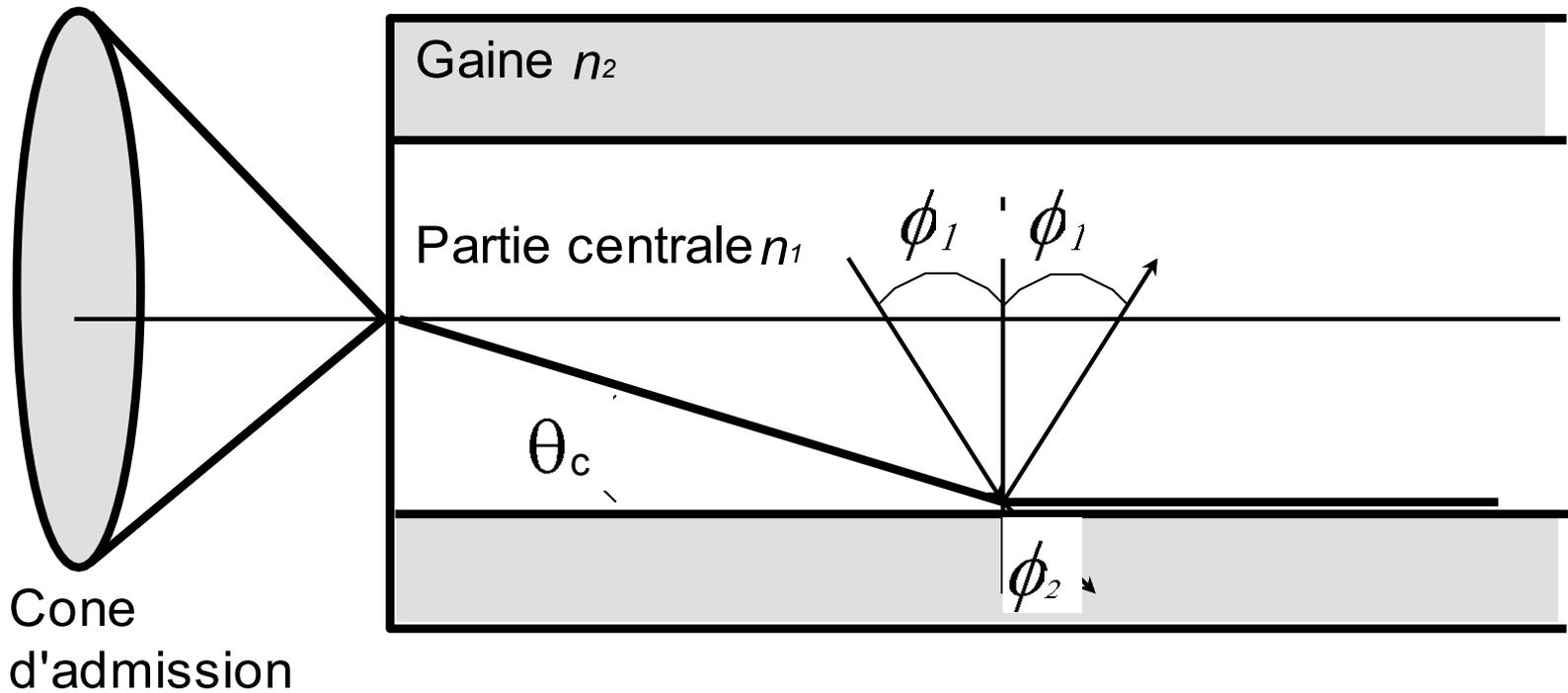
très bonne qualité optique entre 1000 et 4000 nm  
sensible à l'acidité (pH inférieur à 4)

### Chalcogénure

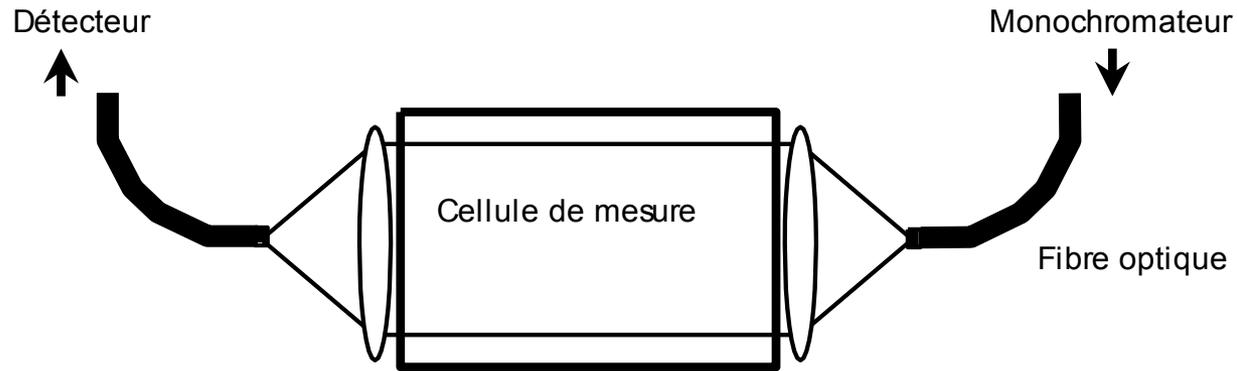
Transmission limitée à quelques mètres

### Halogénures d'argent

### Verre TeX

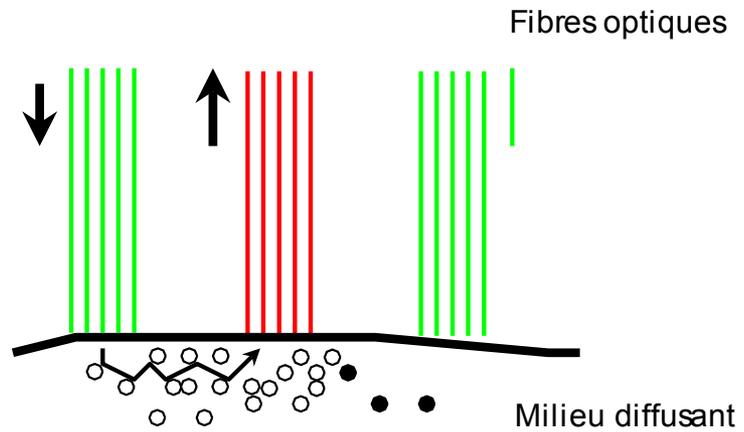
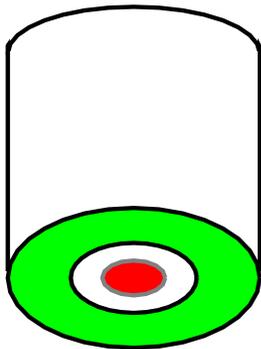


## Fibres optiques



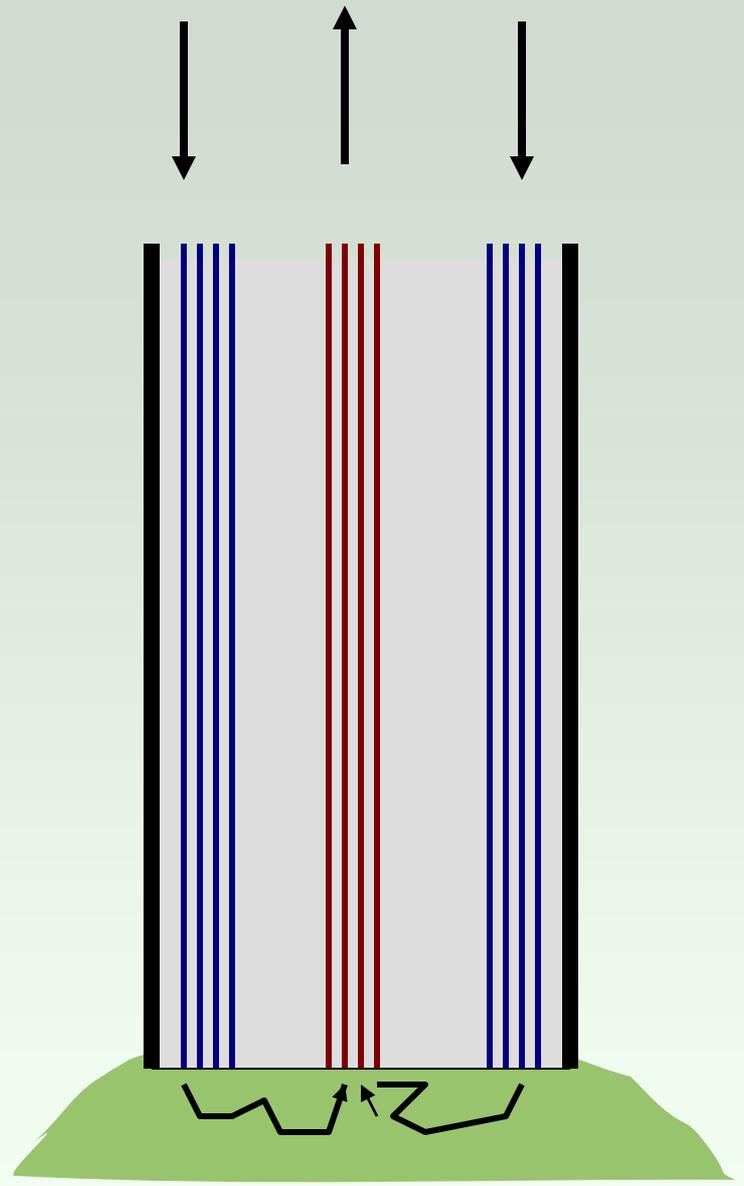
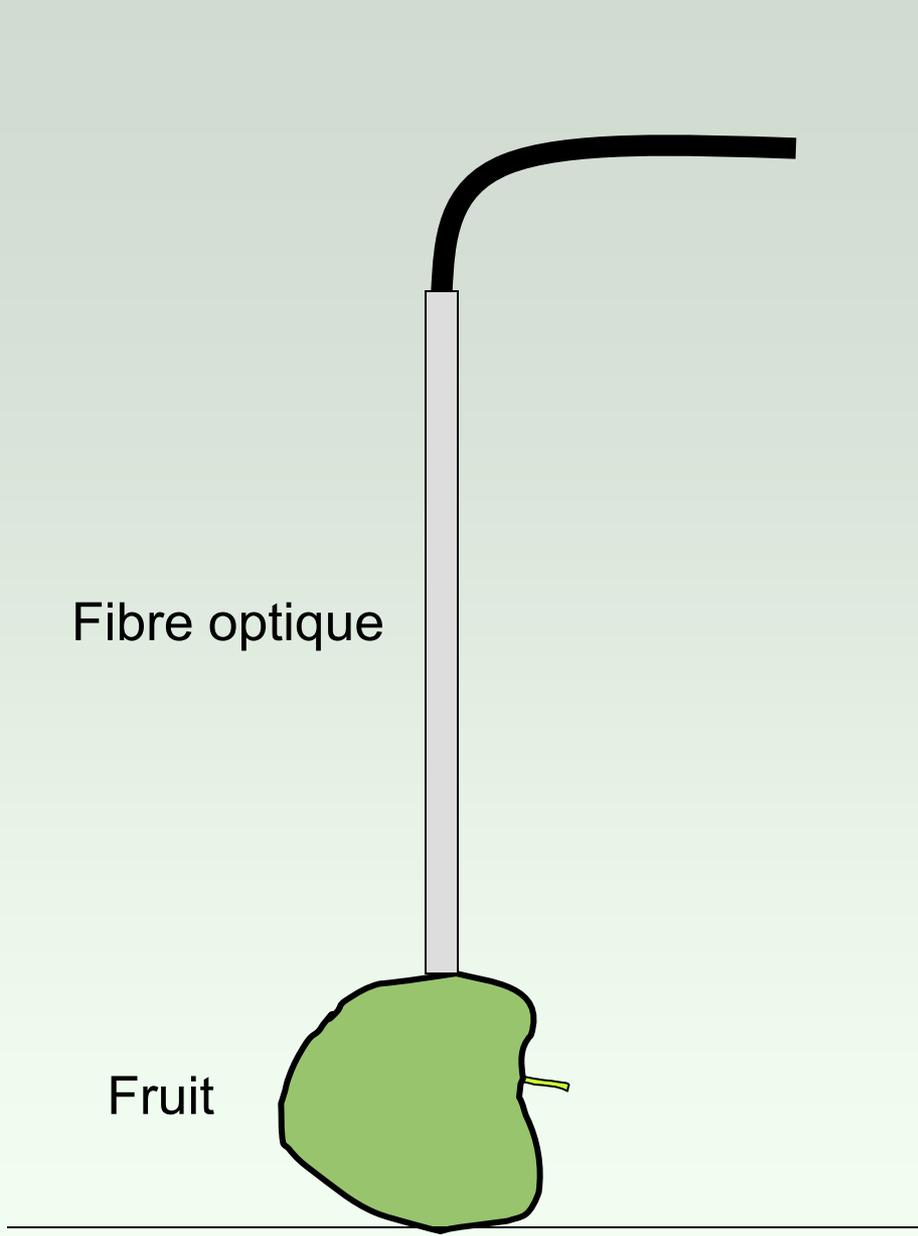
**Système fonctionnant en transmission**

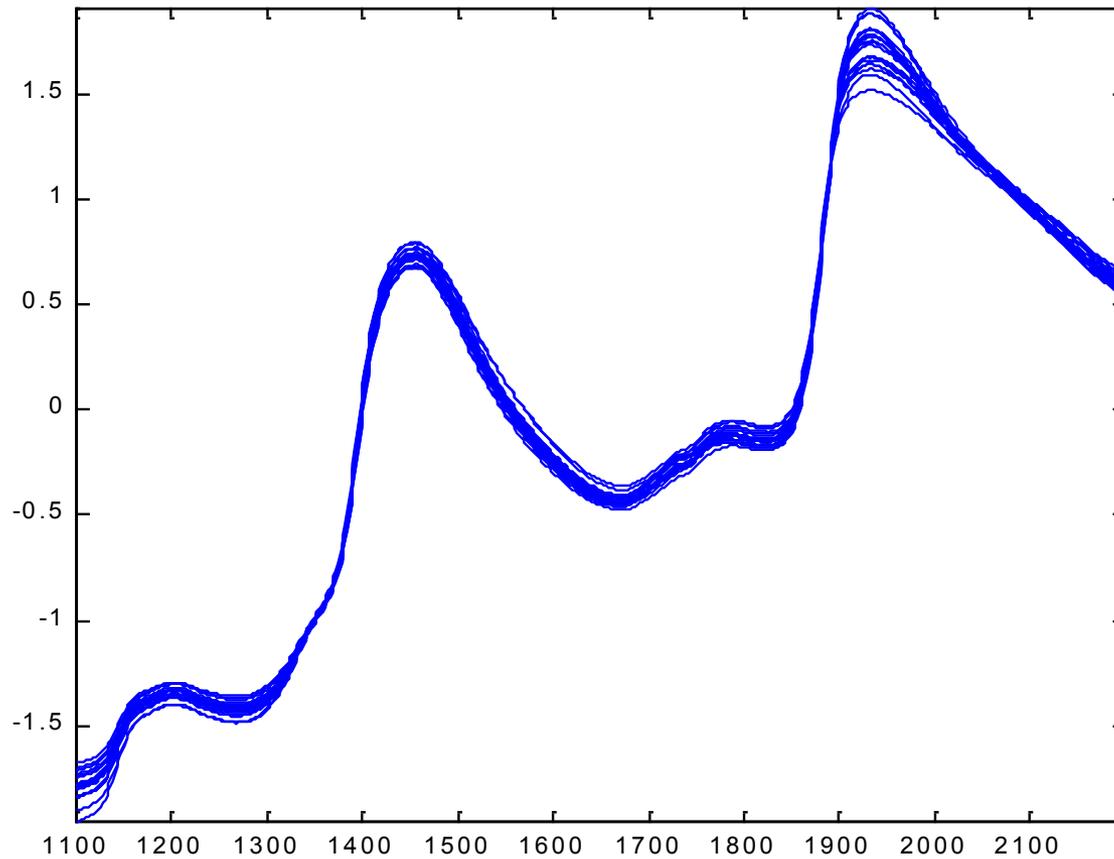
Agencement  
des faisceaux  
de fibres



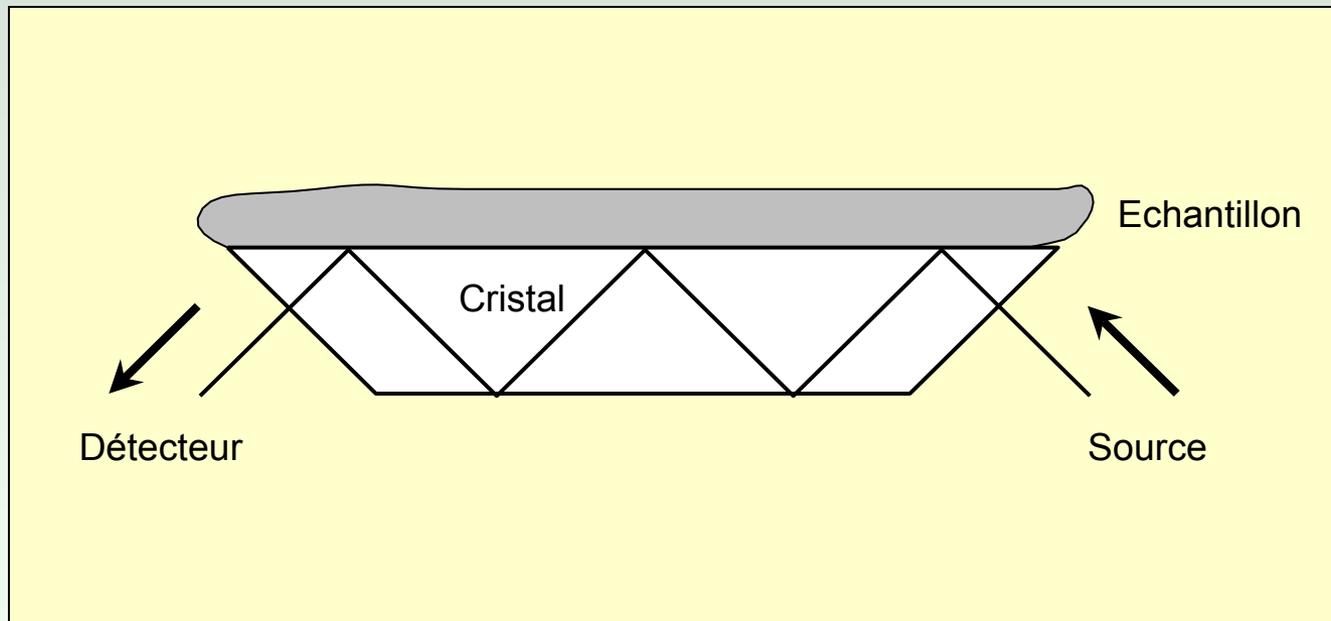
**Système fonctionnant en "interactance"**

# Fibres optiques

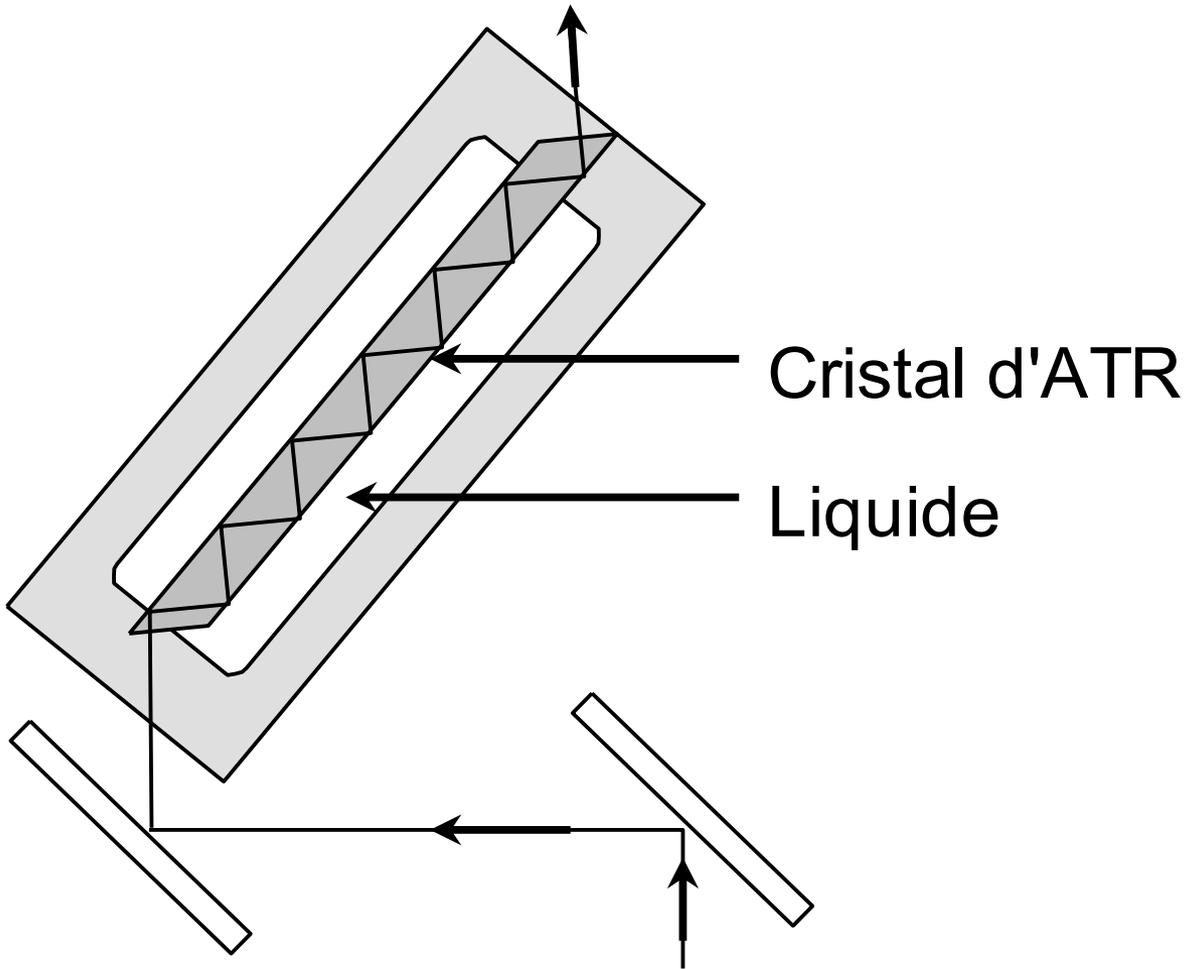


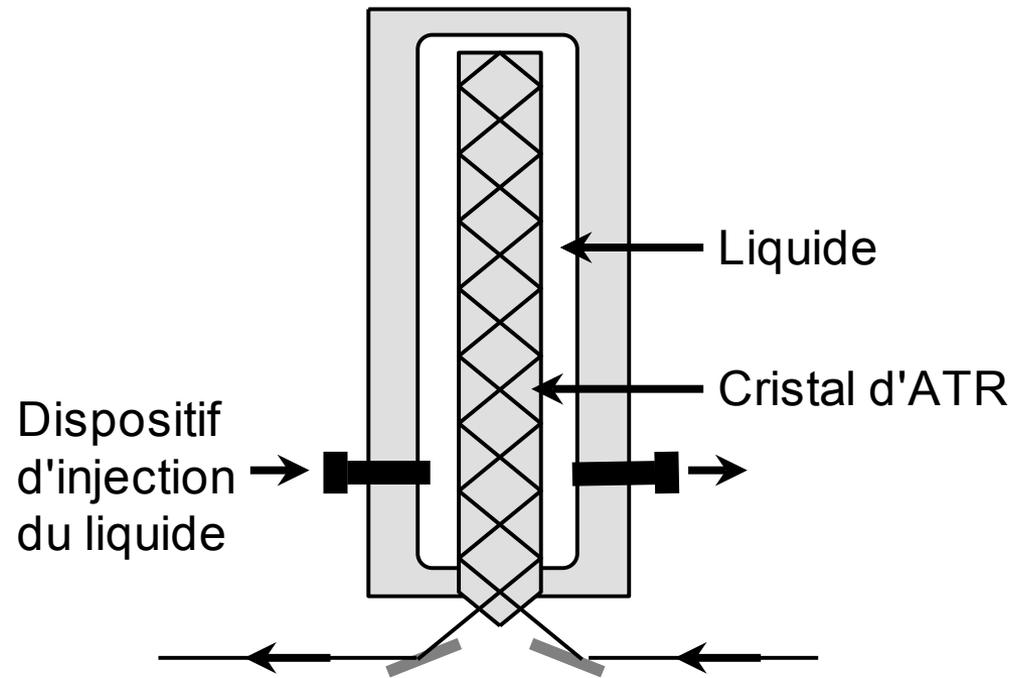


Spectres réduits à la plage spectrale 1100-2100 nm  
et corrigés par la méthode SNV



## Principe de la réflexion totale atténuée





FIN

Merci de votre attention

domibertrand@free.fr  
[dataframe@free.fr](mailto:dataframe@free.fr)

*Publications chargeables*  
à  
« *researchgate, Dominique Bertrand* »