



**Laboratoire Aimé Cotton**

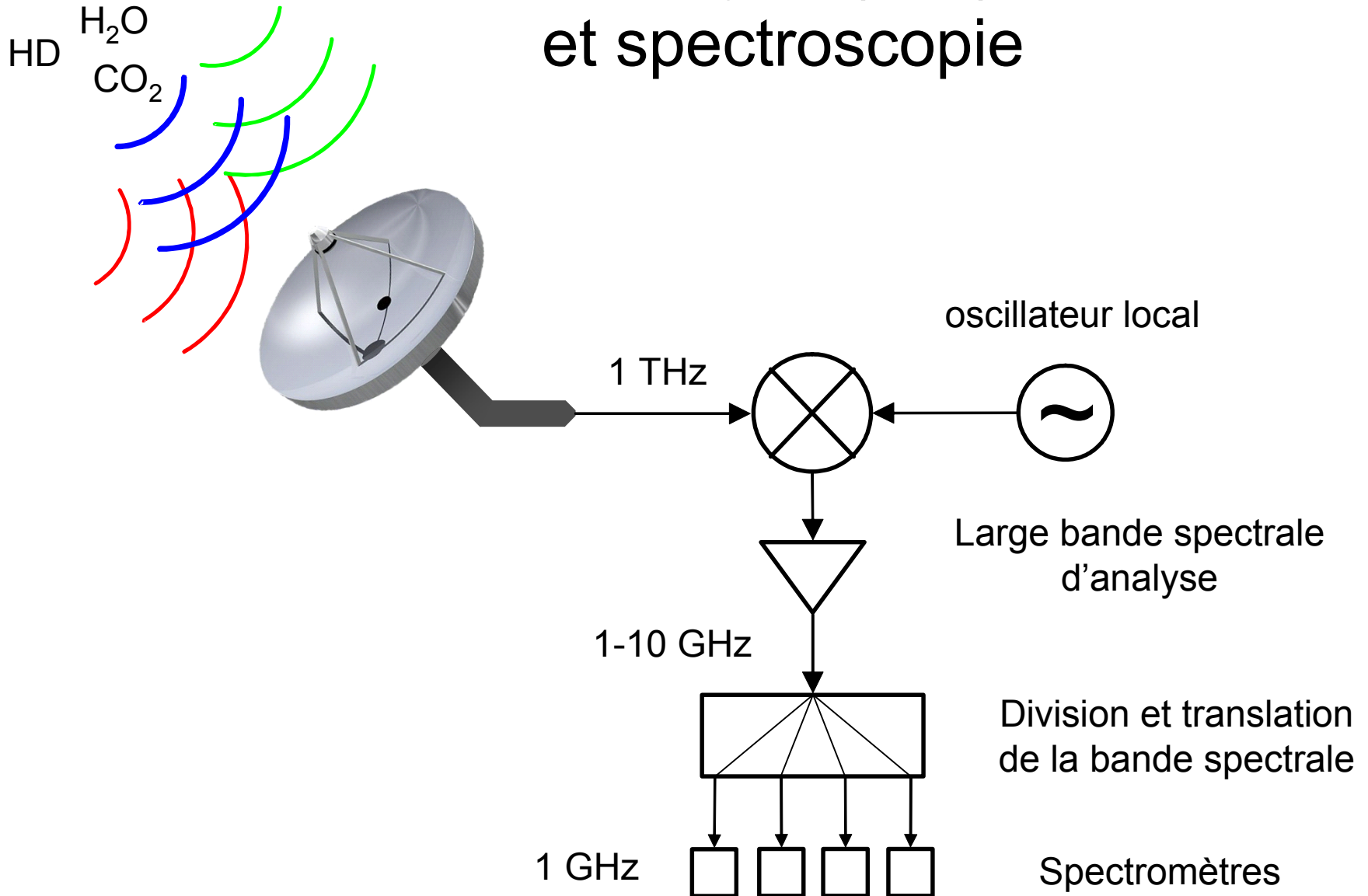
**4 novembre 2004**

**Processus atomiques cohérents appliqués  
à l'analyse spectrale très large bande  
de signaux radio-fréquence**

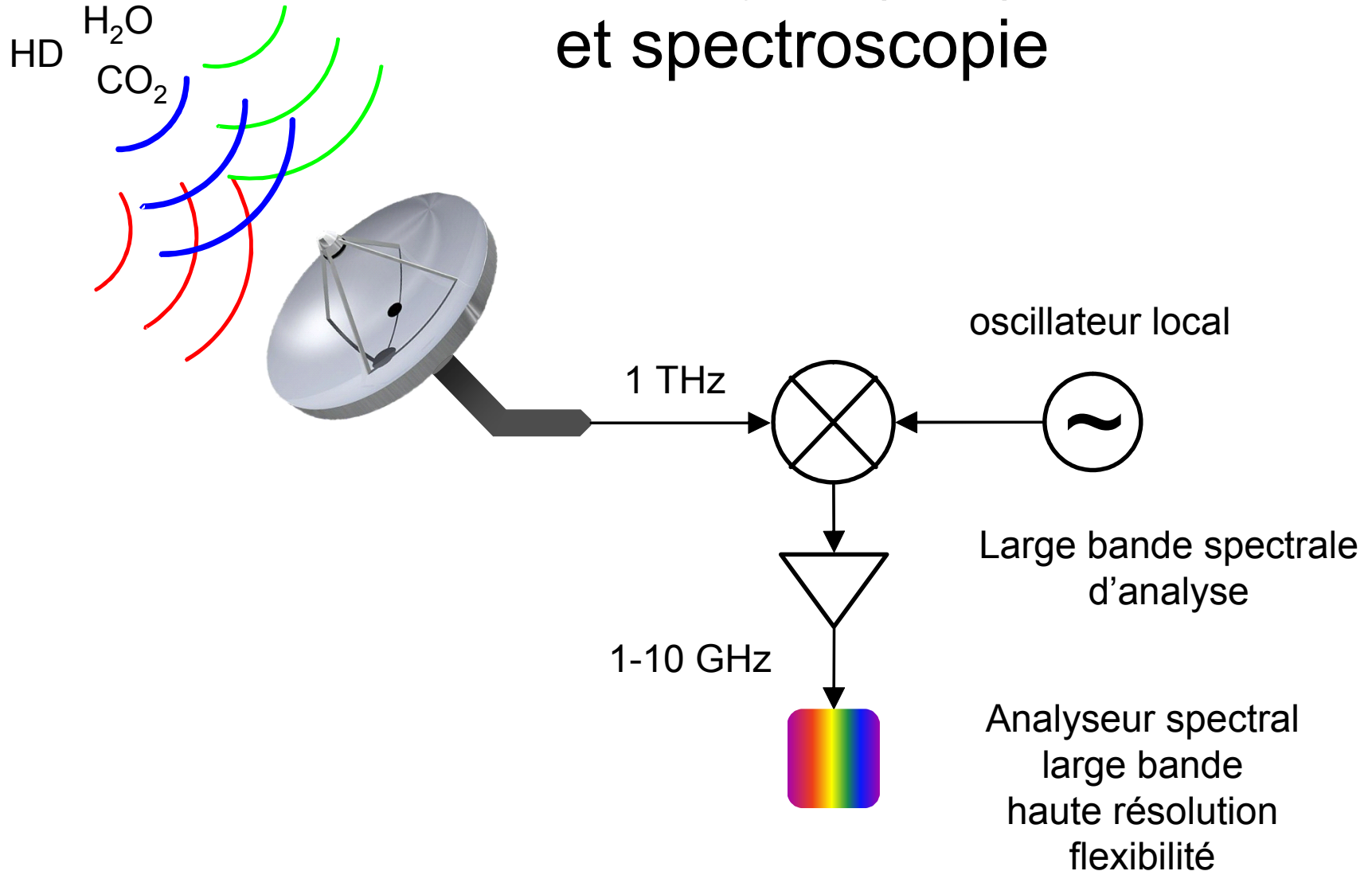
**Vincent Lavielle**

Optique et matériaux  
pour le traitement de l'information

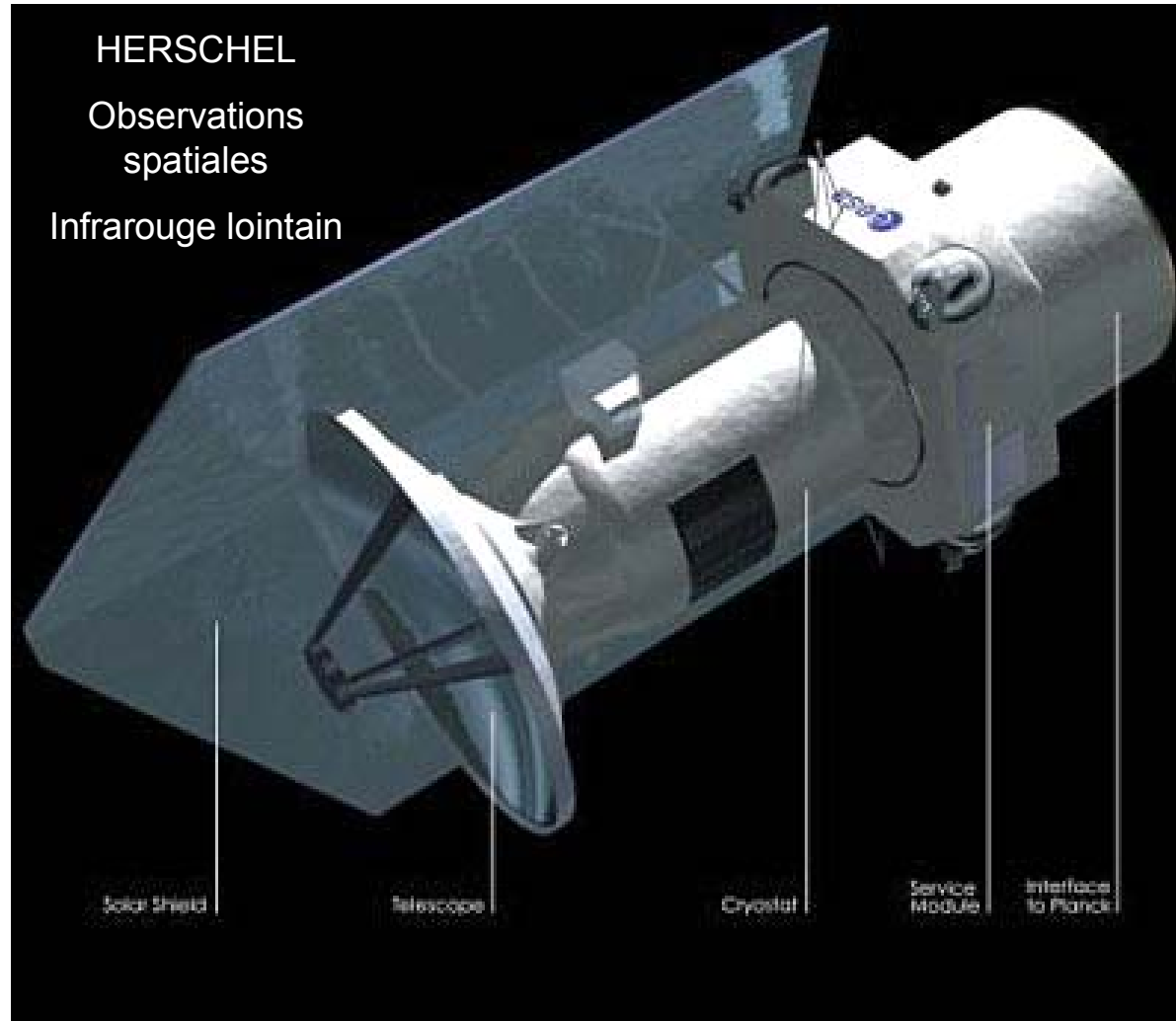
# Détection hétérodyne (sub)millimétrique et spectroscopie



# Détection hétérodyne (sub)millimétrique et spectroscopie



# Détection hétérodyne (sub)millimétrique et spectroscopie



# Le plan de l'exposé

- Les différents analyseurs spectraux
- Le principe de notre analyseur spectral
- Les résultats expérimentaux
- Conclusion et perspectives

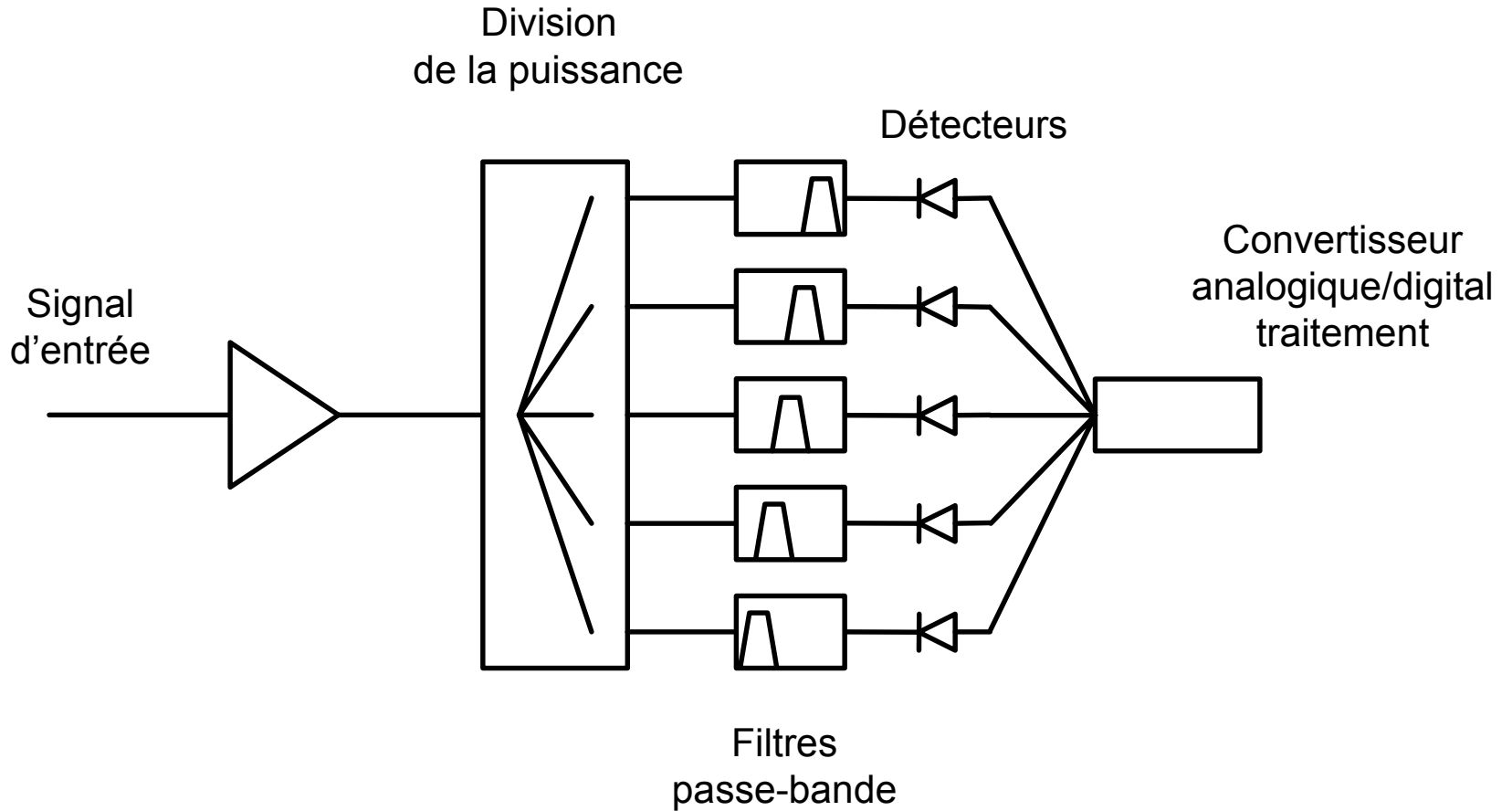


# Les différents analyseurs spectraux

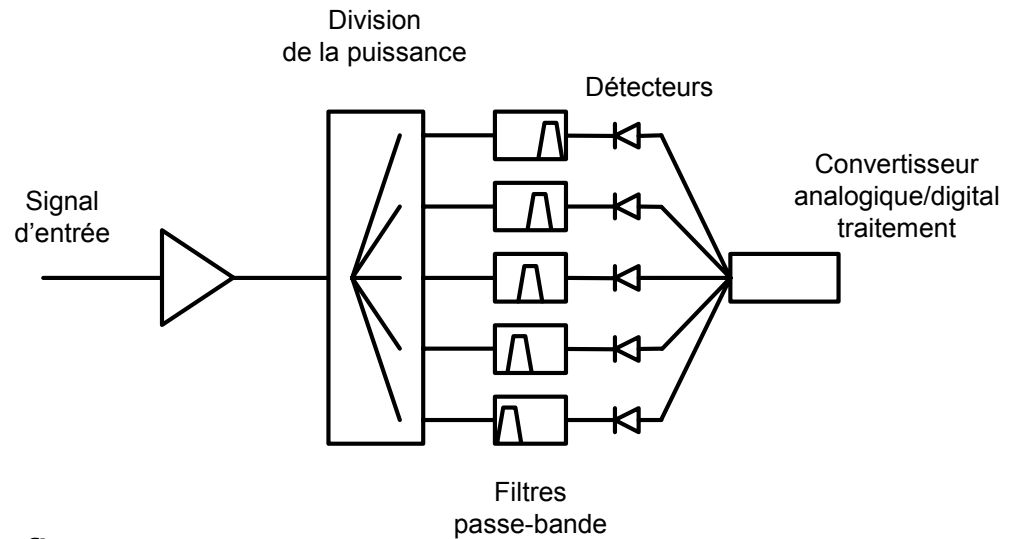
- Les spectromètres à batterie de filtres
- Les spectromètres par autocorrélation
- les spectromètres SAW
- les spectromètres acousto-optiques



# Spectromètres à batterie de filtres



# Spectromètres à batterie de filtres



- 😊 Robustesse
- 🌐 Bande spectrale et résolution fixes
- 🌐 La division de la puissance limite le nombre de canaux à quelques dizaines



## Mission AURA :

19 batteries de filtres de 25 canaux spectraux  
Bande passante de 1,2 GHz  
Résolution maximale de 6 MHz



# Spectromètres par autocorrélation

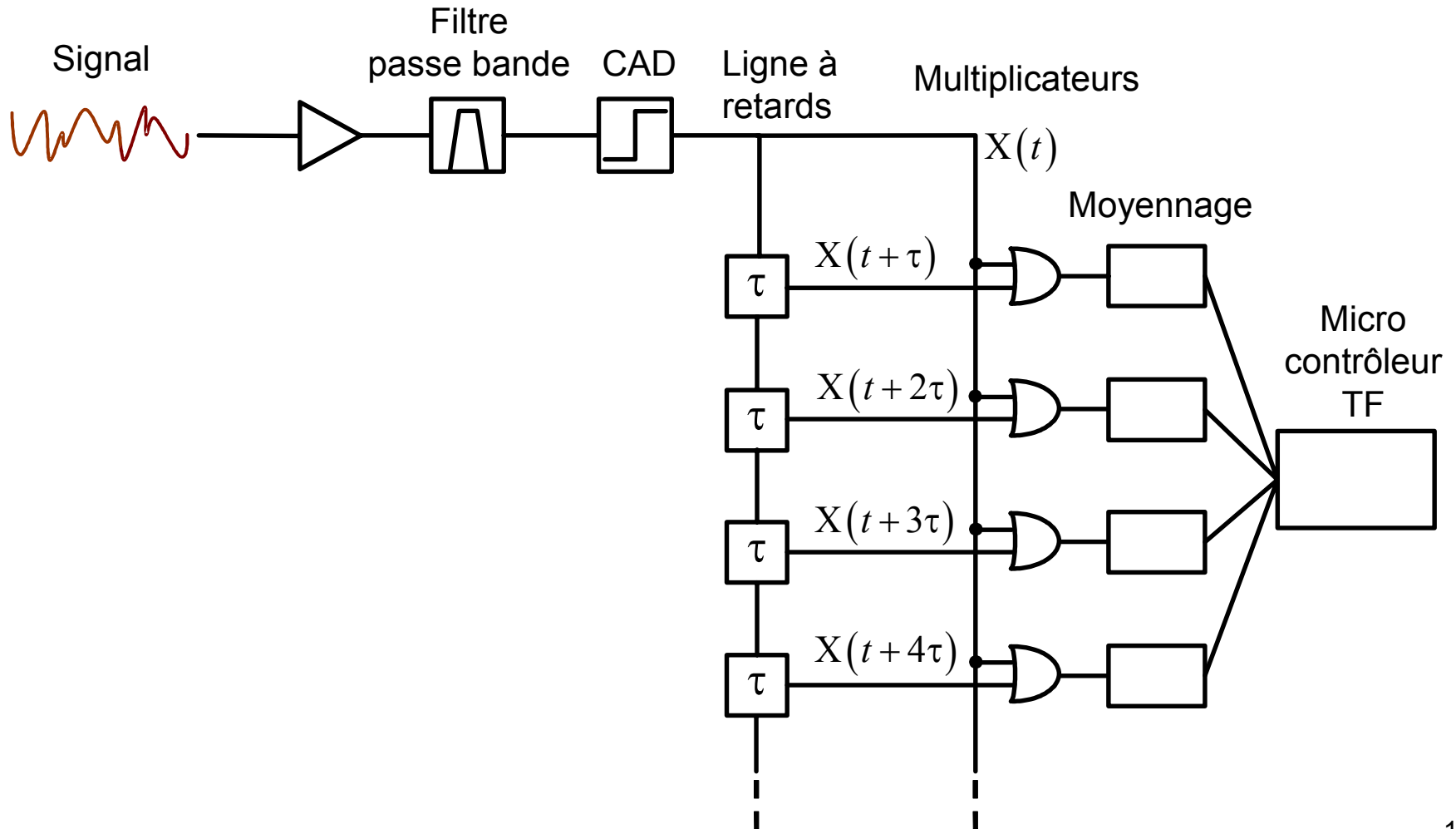
- Autocorrélateurs numériques
- Autocorrélateurs analogiques

Théorème de Wiener-Khintchine

$$S_{XX}(f) = \sum_{n=1}^N \langle X(t) \cdot X(t+n\tau) \rangle \cos(2\pi f n\tau)$$

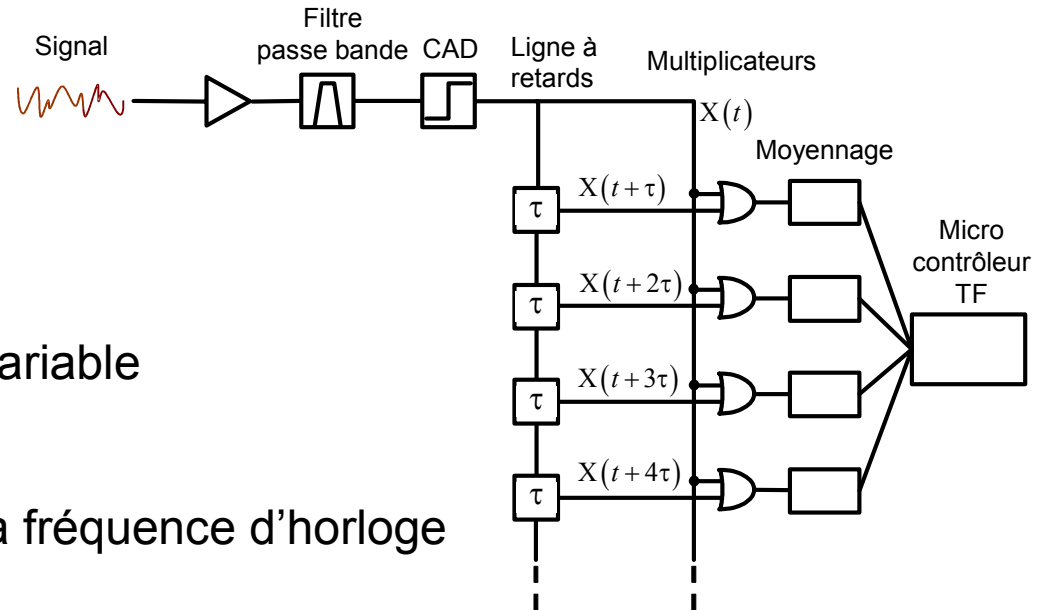
# Spectromètres par autocorrélation

## Autocorrélateurs numériques



# Spectromètres par autocorrélation

## Autocorrélateurs numériques



- 😊 Flexibilité : bande passante variable à nombre fixe de canaux
- 🌐 Bande passante limitée par la fréquence d'horloge



### Mission HERSCHEL :

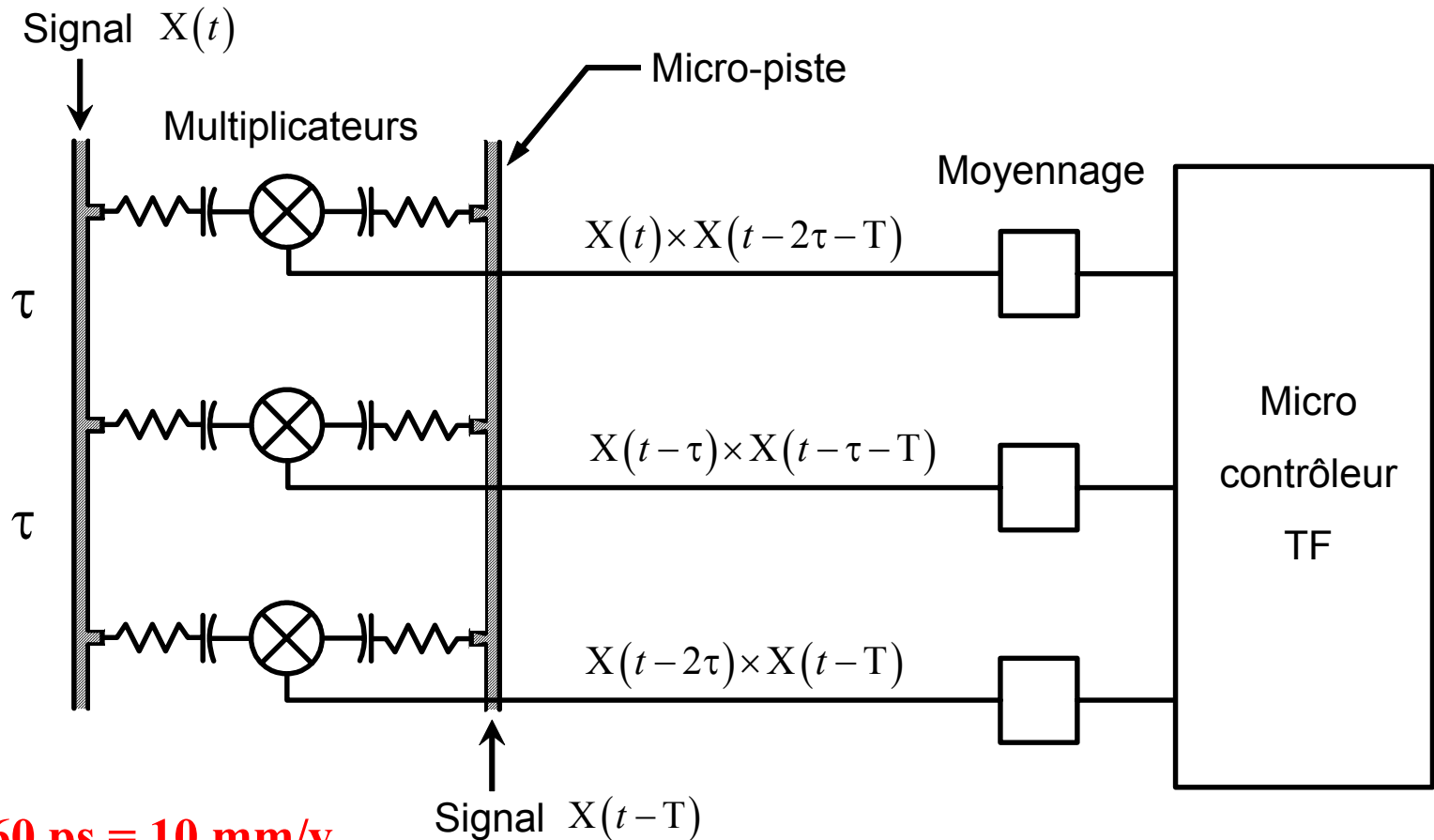
Bande passante de 700 MHz

100 canaux spectraux

Résolution ultime de 140 kHz

# Spectromètres par autocorrélation

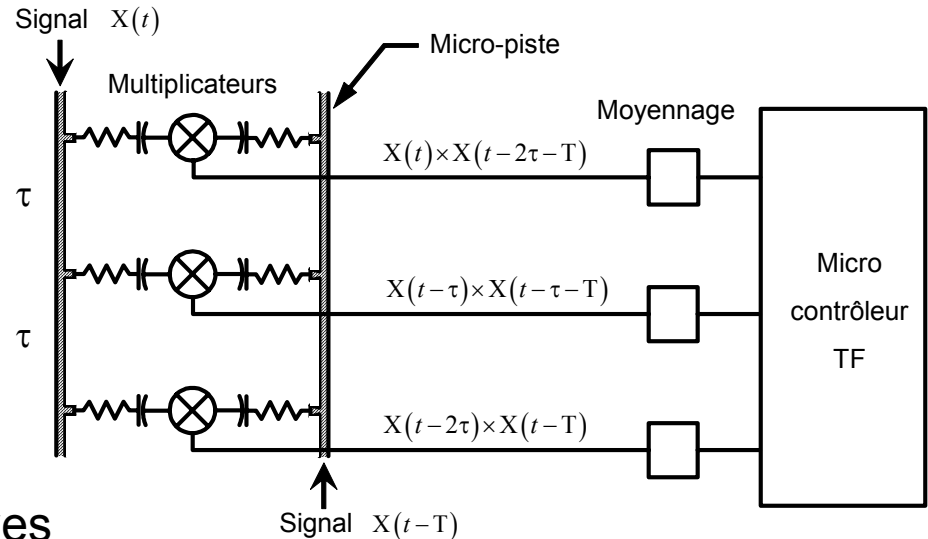
## Autocorrélateurs analogiques



$\tau = 60 \text{ ps} = 10 \text{ mm/v}$

# Spectromètres par autocorrélation

## Autocorrélateurs analogiques



- 😊 Grande bande passante
- 🤖 Bande passante et résolution fixes
- 🤖 Division de la puissance du signal d'entrée

**SOFIA**

**Mission SOFIA :**

Bande passante de 3,6 GHz

128 canaux spectraux

# Recherche de solutions hybrides

## ➡ Limites de l'électronique :

- filtrage difficile
- difficulté à réaliser des retards importants

## ➤ Système hybride : système acoustique et électronique

- utilisation de la faible vitesse de propagation des ondes acoustiques dans les solides

**Micro-pistes :** 10 mm pour 60 ps à  $1,6 \cdot 10^8$  m/s

**SAW :** 0,24  $\mu\text{m}$  pour 60 ps à 4000 m/s

**DAO :** 0,03  $\mu\text{m}$  pour 60 ps à 650 m/s

# Spectromètres à ondes acoustiques de surface

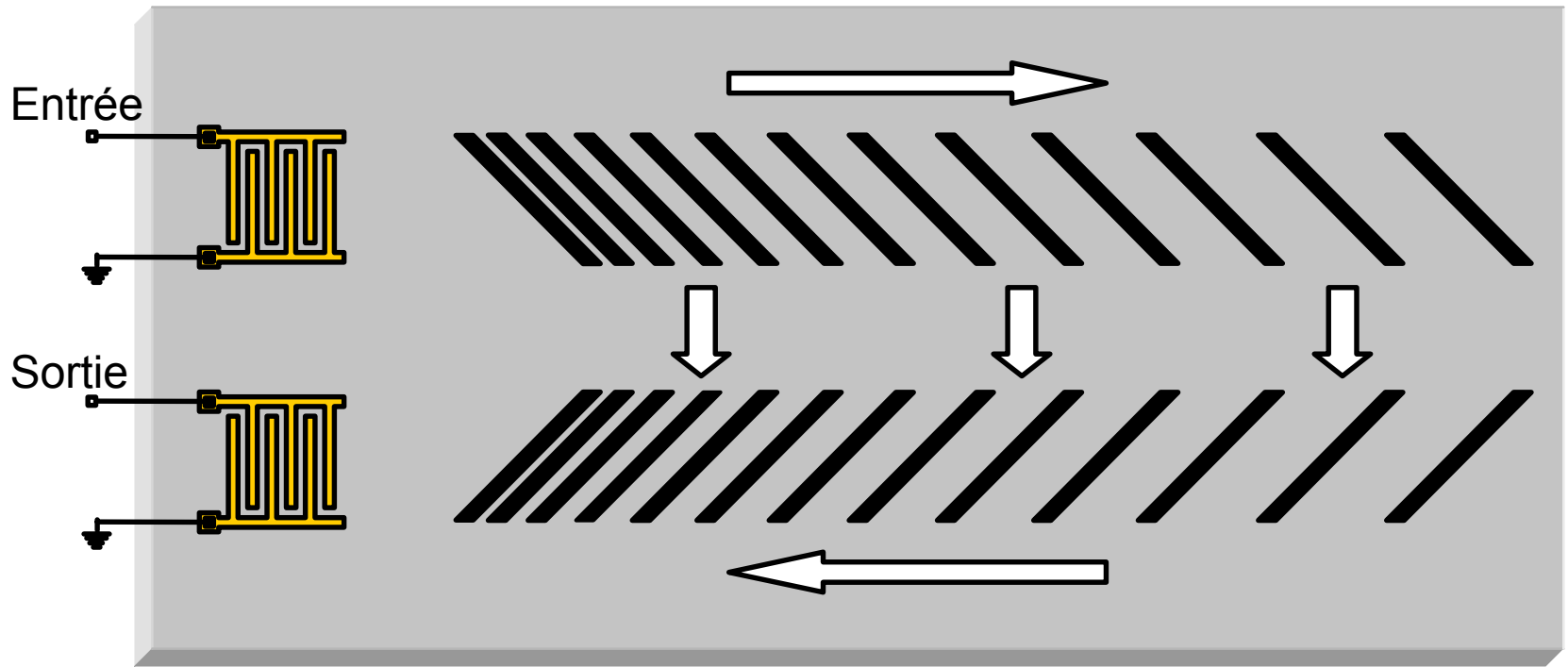
Analyse spectrale par transformée de chirp

$$\tilde{E}(v = rt) = \exp\left(-i\pi r t^2\right) \times \int_{-\infty}^{+\infty} dv \tilde{E}(v) \exp(2i\pi vt) \exp\left(-i\pi \frac{v^2}{r}\right)$$

Retard de groupe :  $\tau(v) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(v)}{dv} = \frac{v}{r}$

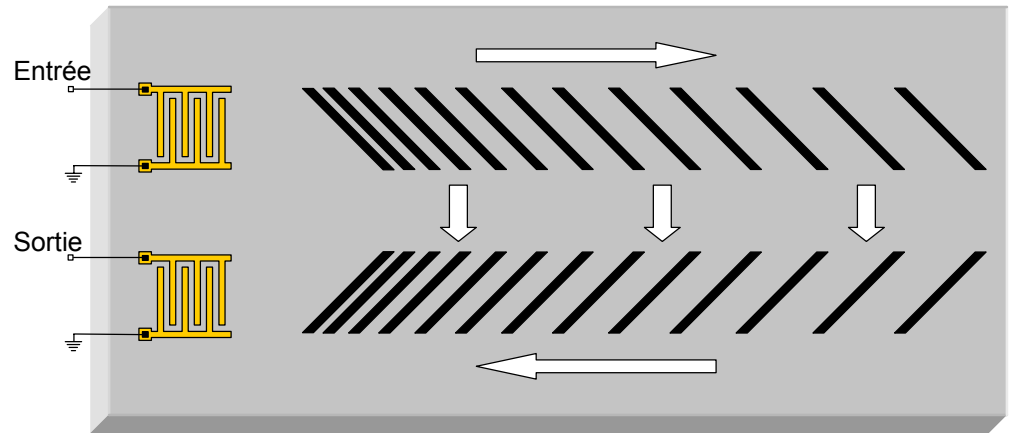
La dispersion du retard de groupe décale dans le temps les composantes  $\tilde{E}(v)$

# Spectromètres à ondes acoustiques de surface





# Spectromètres à ondes acoustiques de surface

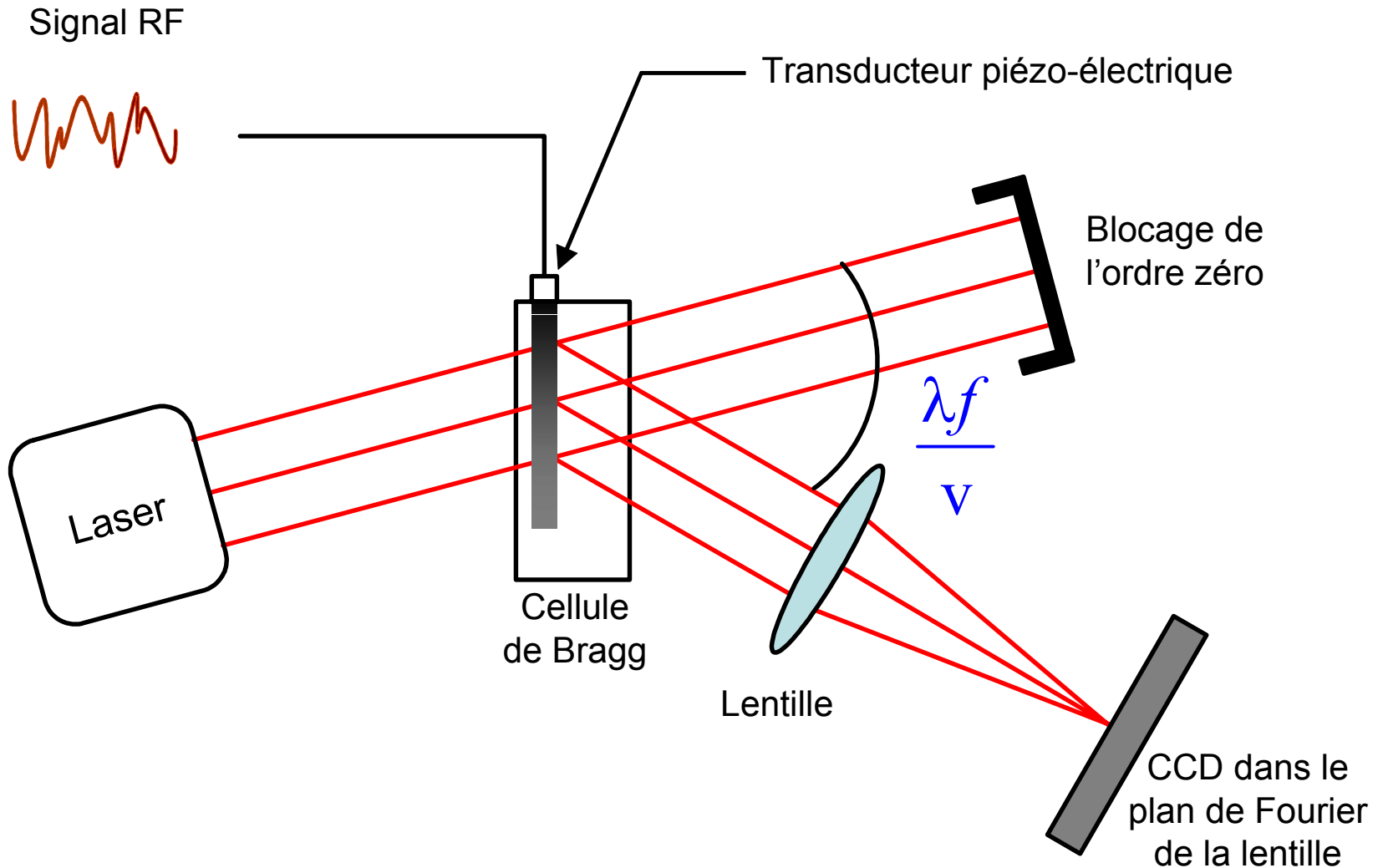


- 😊 Compacité
- 😬 Bande passante et résolution fixes
- 😬 Bande passante < 1-2 GHz

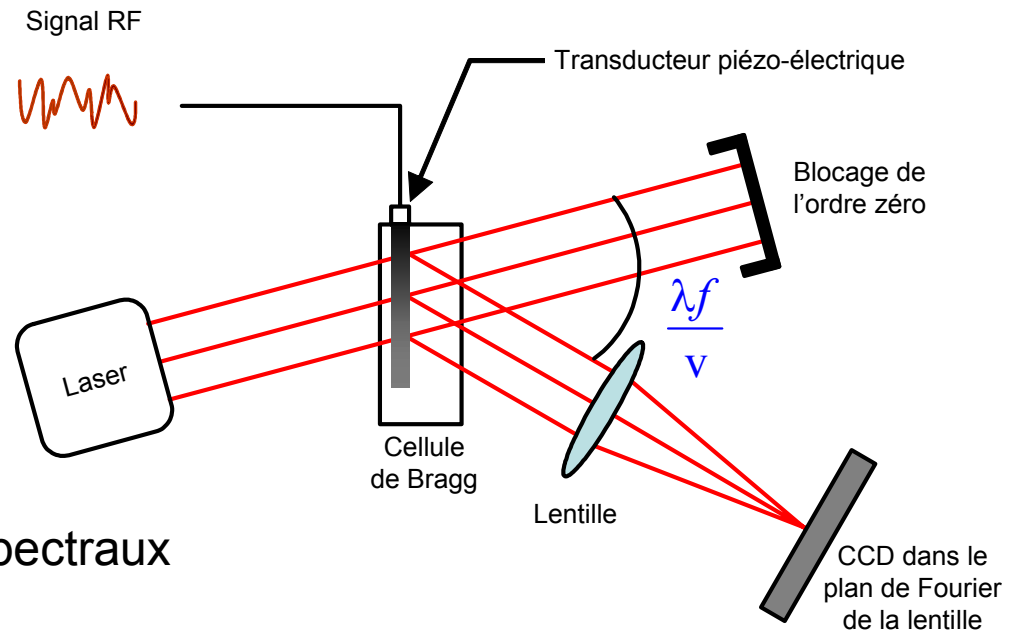
**Mission SOFIA :**

Bande passante de 205 MHz  
4096 canaux spectraux

# Spectromètres acousto-optique



# Spectromètres acousto-optique



- 😊 Capacité de 2000 canaux spectraux
- 🤖 Bande passante < 1-2 GHz
- 🤖 Bande passante et résolution fixes



## Mission ODIN :

Bande passante de 1 GHz

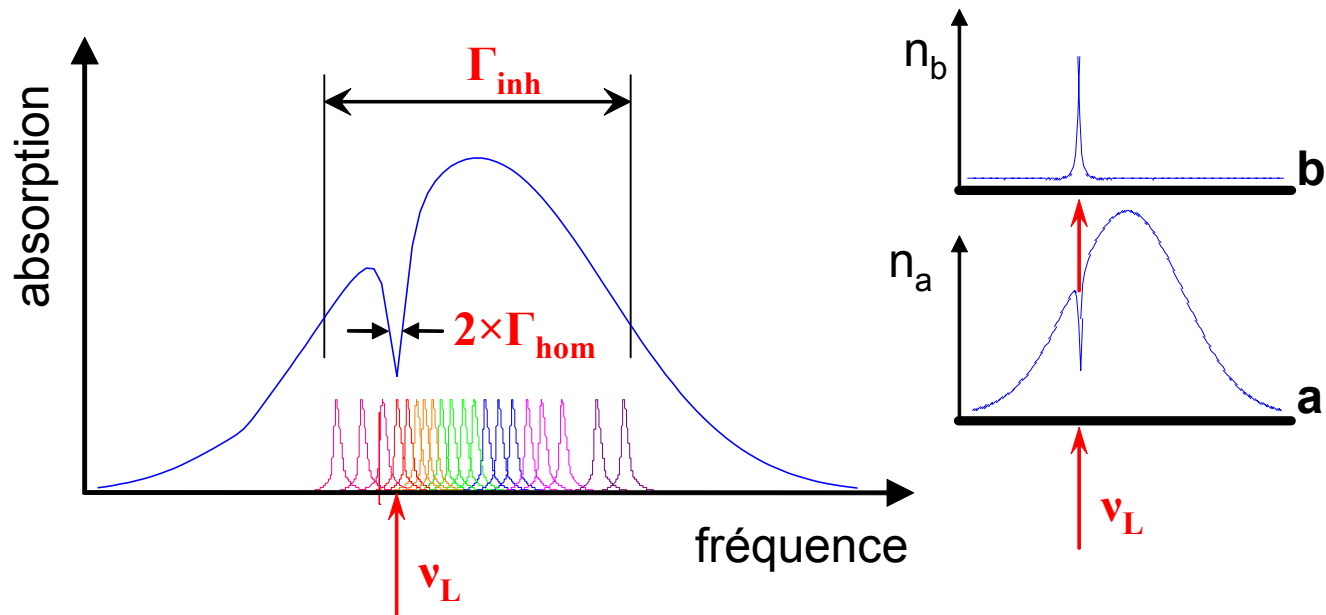
Capacité de 1000 canaux spectraux

# Le principe de notre analyseur spectral

- Le "hole burning" spectral
- Le cristal  $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$
- Le fonctionnement du spectromètre
- Le dispositif expérimental



# Une autre approche: la résonance atomique



- bande passante = largeur inhomogène  $\Gamma_{inh}$
- résolution = largeur homogène  $\Gamma_{hom}$
- nombre de canaux =  $\Gamma_{inh} / \Gamma_{hom}$

# Le cristal $\text{Tm}^{3+}$ : YAG

➤ Ions lanthanides : (coeur)<sup>46</sup>  $4f^n 5s^2 5p^6$  avec  $1 \leq n \leq 13$

Les transitions internes à la sous-couche 4f sont quasi-interdites

La sous-couche 4f est écrantée par les sous-couches 5s et 5p

55 <b>Ce<sup>3+</sup></b> (Pd)4f <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> Cérium	56 <b>Pr<sup>3+</sup></b> (Pd)4f <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> Praséodyme	57 <b>Nd<sup>3+</sup></b> (Pd)4f <sup>3</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> Néodyme	58 <b>Pm<sup>3+</sup></b> (Pd)4f <sup>4</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> Prométhium	59 <b>Sm<sup>3+</sup></b> (Pd)4f <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> Samarium	60 <b>Eu<sup>3+</sup></b> (Pd)4f <sup>6</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> Europium	61 <b>Gd<sup>3+</sup></b> (Pd)4f <sup>7</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> Gadolinium
---	---	--	---	---	---	---

62 <b>Tb<sup>3+</sup></b> (Pd)4f <sup>8</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> Terbium	63 <b>Dy<sup>3+</sup></b> (Pd)4f <sup>9</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> Dysprosium	64 <b>Ho<sup>3+</sup></b> (Pd)4f <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> Holmium	65 <b>Er<sup>3+</sup></b> (Pd)4f <sup>11</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> Erbium	66 <b>Tm<sup>3+</sup></b> (Pd)4f <sup>12</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> Thulium	67 <b>Yb<sup>3+</sup></b> (Pd)4f <sup>13</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> Ytterbium
--	---	---	--	---	---

# Le cristal $\text{Tm}^{3+}$ : YAG

➤ Ions lanthanides : (coeur)<sup>46</sup>  $4f^n 5s^2 5p^6$  avec  $1 \leq n \leq 13$

Les transitions internes à la sous-couche 4f sont quasi-interdites

La sous-couche 4f est écrantée par les sous-couches 5s et 5p

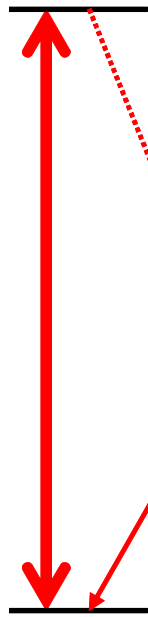
<del>55 <math>\text{Ce}^{3+}</math> (Pd) <math>4f^1 5s^2 5p^6</math> Cérium</del>	<del>56 <math>\text{Pr}^{3+}</math> (Pd) <math>4f^2 5s^2 5p^6</math> Praséodyme</del>	<del>57 <math>\text{Nd}^{3+}</math> (Pd) <math>4f^3 5s^2 5p^6</math> Néodyme</del>	<del>58 <math>\text{Pm}^{3+}</math> (Pd) <math>4f^4 5s^2 5p^6</math> Prométhium</del>	<del>59 <math>\text{Sm}^{3+}</math> (Pd) <math>4f^5 5s^2 5p^6</math> Samarium</del>	<del>60 <math>\text{Eu}^{3+}</math> (Pd) <math>4f^6 5s^2 5p^6</math> Europium</del>	<del>61 <math>\text{Gd}^{3+}</math> (Pd) <math>4f^7 5s^2 5p^6</math> Gadolinium</del>
---	---	--	---	---	---	---

<del>62 <math>\text{Tb}^{3+}</math> (Pd) <math>4f^8 5s^2 5p^6</math> Terbium</del>	<del>63 <math>\text{Dy}^{3+}</math> (Pd) <math>4f^9 5s^2 5p^6</math> Dysprosium</del>	<del>64 <math>\text{Ho}^{3+}</math> (Pd) <math>4f^{10} 5s^2 5p^6</math> Holmium</del>	<del>65 <math>\text{Er}^{3+}</math> (Pd) <math>4f^{11} 5s^2 5p^6</math> Erbium</del>	<del>66 <math>\text{Tm}^{3+}</math> (Pd) <math>4f^{12} 5s^2 5p^6</math> Thulium</del>	<del>67 <math>\text{Yb}^{3+}</math> (Pd) <math>4f^{13} 5s^2 5p^6</math> Ytterbium</del>
--	---	---	--	---	---

# Le cristal $\text{Tm}^{3+}$ : YAG

$$|2\rangle = {}^3\text{H}_4$$

**793 nm**



$$|3\rangle = {}^3\text{F}_4$$

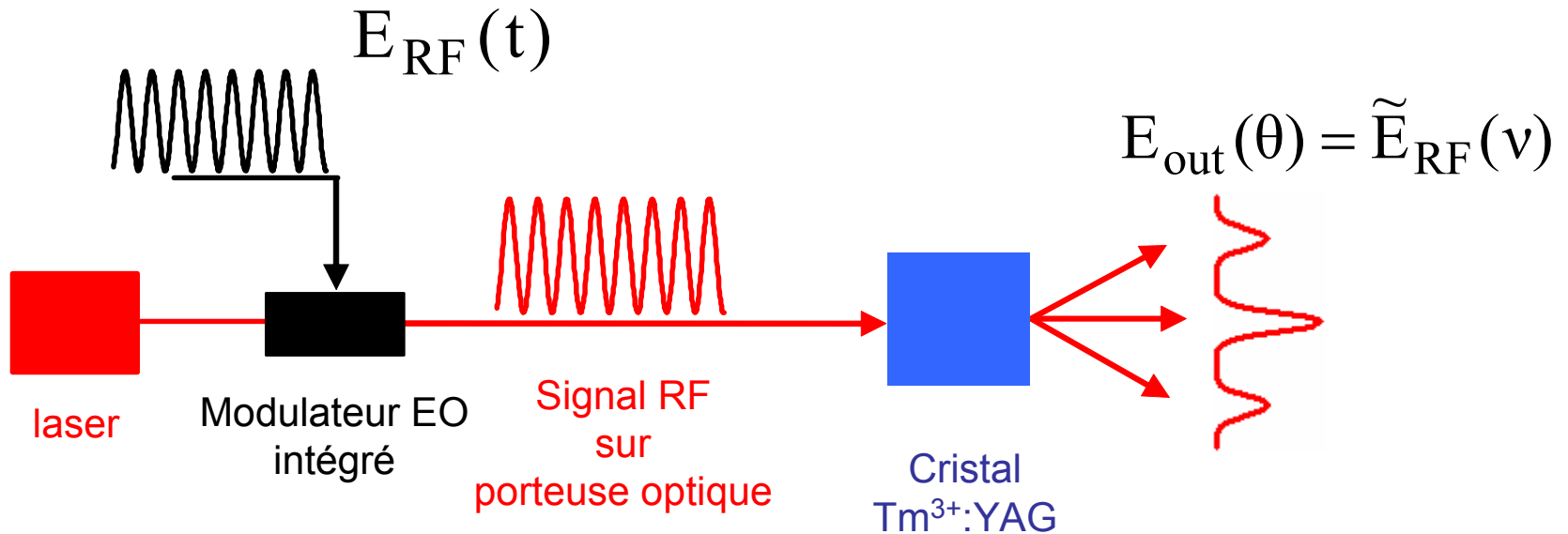
$T_1 = 10 \text{ ms}$

$$|1\rangle = {}^3\text{H}_6$$

<b>Transition à :</b>	<b>793nm</b>
<b>Temps de vie de la gravure :</b>	<b>10ms</b>
<b><math>\Gamma_{\text{inh}}</math> :</b>	<b>&gt;20GHz</b>
<b><math>\Gamma_{\text{hom}}</math> :</b>	<b>150kHz</b>
<b>Température:</b>	<b>5K</b>



# L'architecture de l'analyseur



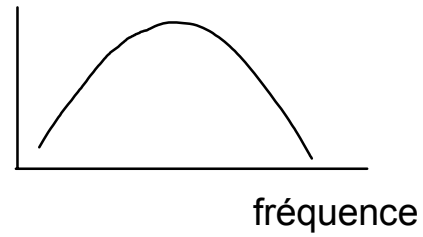
10MHz de résolution requiert  
un réseau de  $4 \cdot 10^7$  traits  
(20mètres avec 2000 traits/mm)

# Principe de l'analyseur spectral

## 1<sup>ère</sup> étape: programmation du cristal

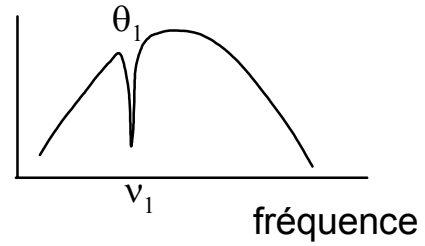
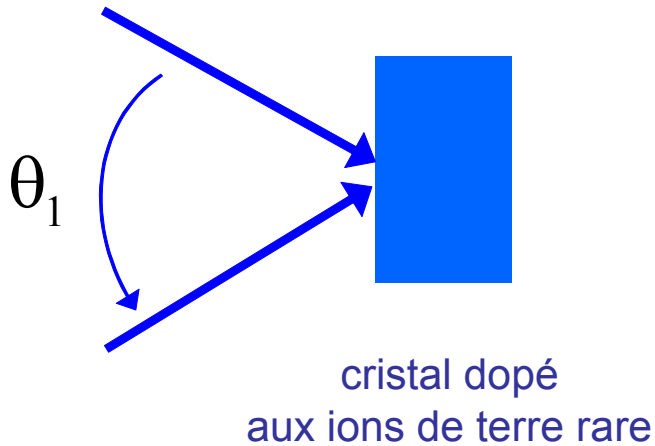


cristal dopé  
aux ions de terre rare



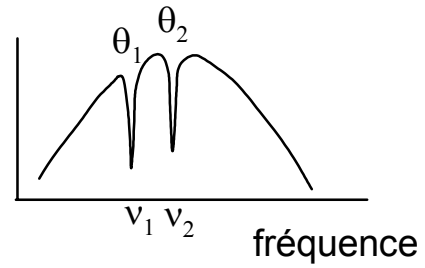
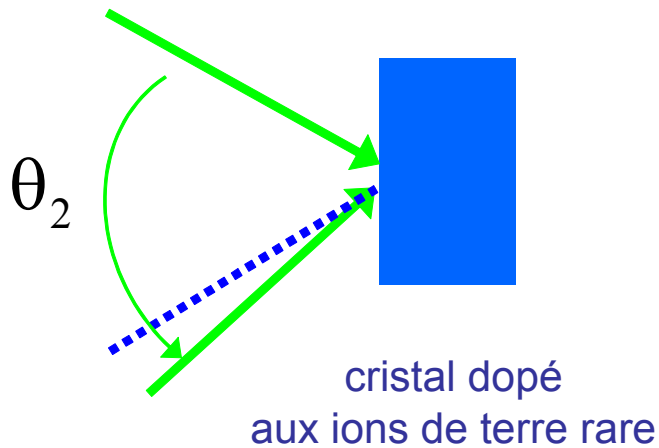
# Principe de l'analyseur spectral

## 1<sup>ère</sup> étape: programmation du cristal



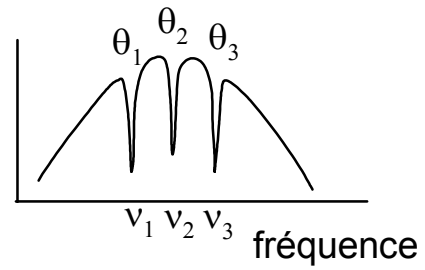
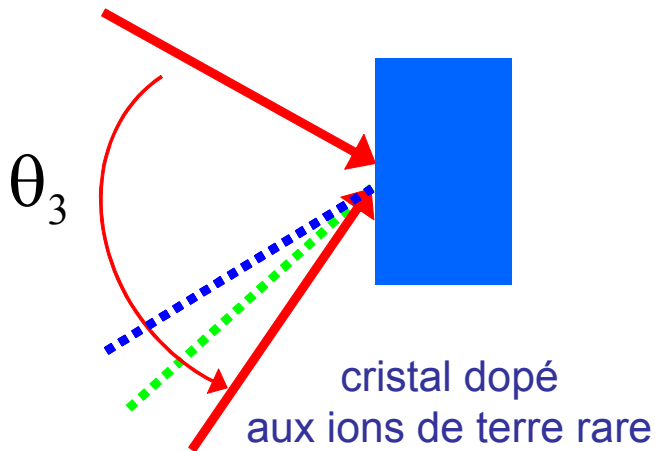
# Principe de l'analyseur spectral

## 1<sup>ère</sup> étape: programmation du cristal



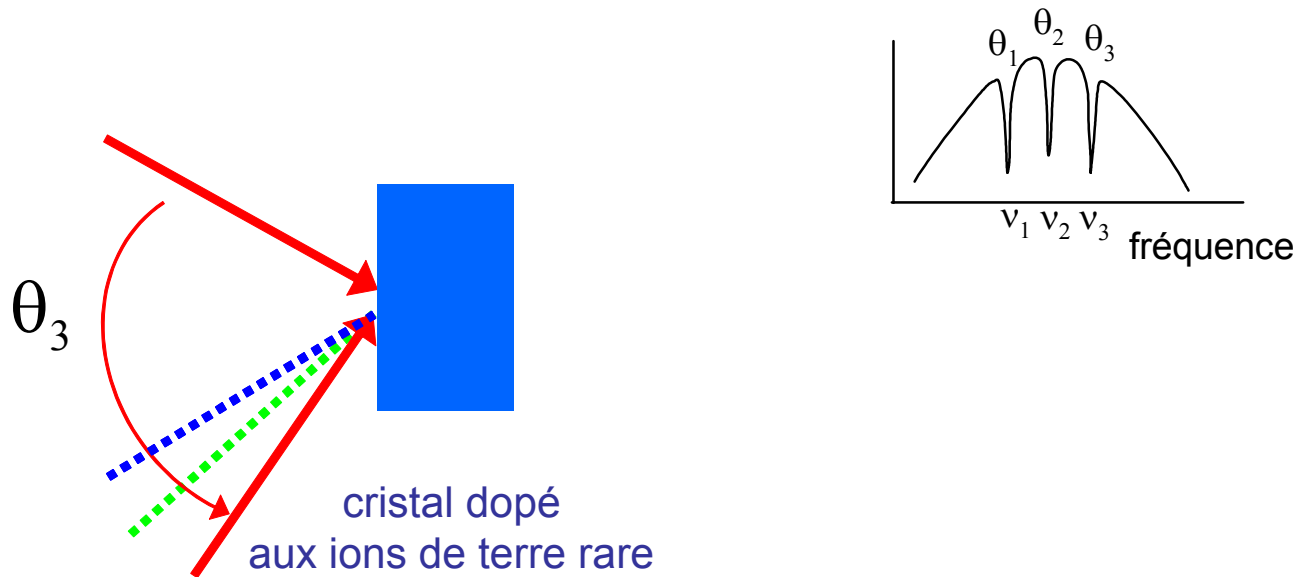
# Principe de l'analyseur spectral

## 1<sup>ère</sup> étape: programmation du cristal



# Principe de l'analyseur spectral

## 1<sup>ère</sup> étape: programmation du cristal

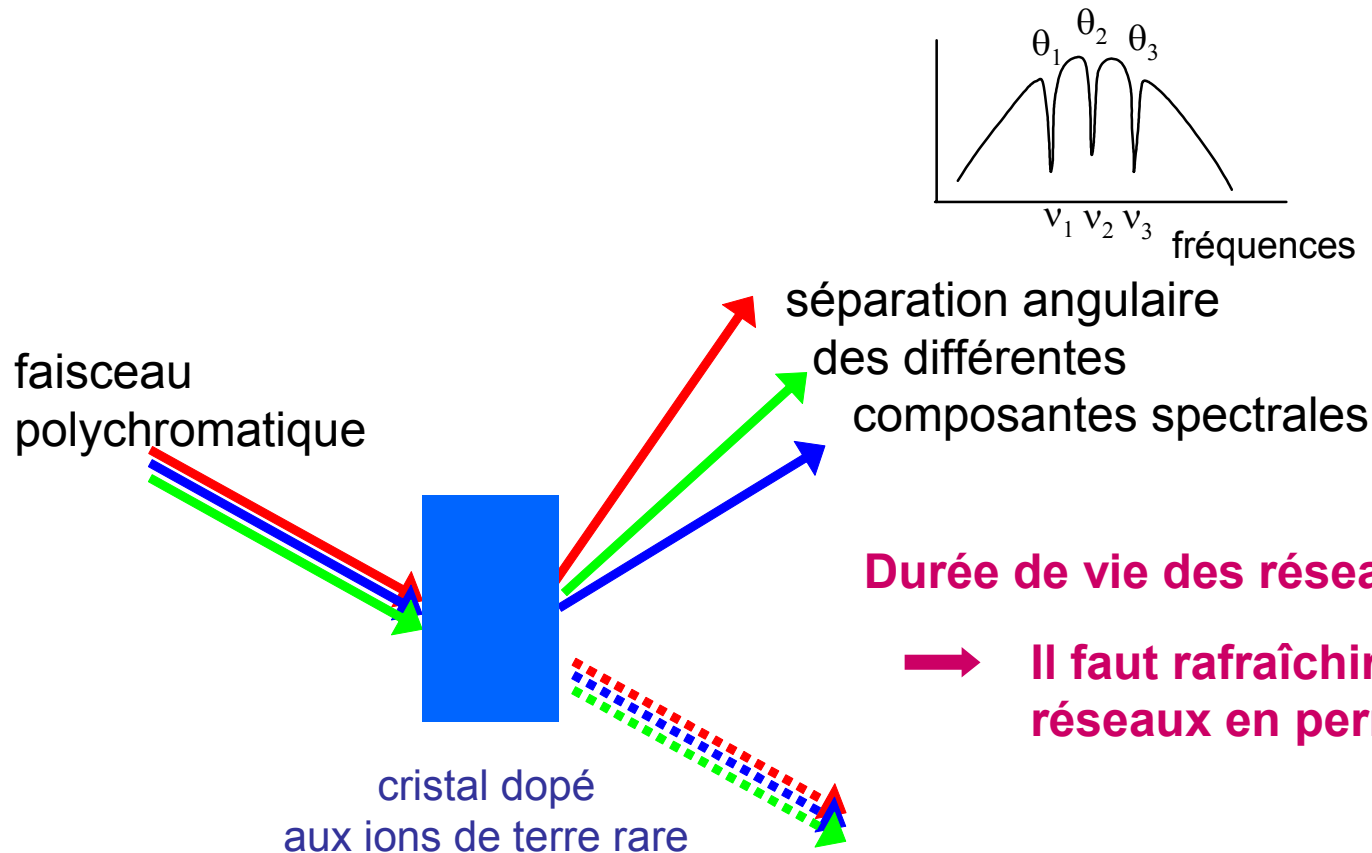


### ➤ enregistrement d'une fonction d'analyse

- ensemble de réseaux de Bragg monochromatiques
- à chaque fréquence est associé un angle spécifique

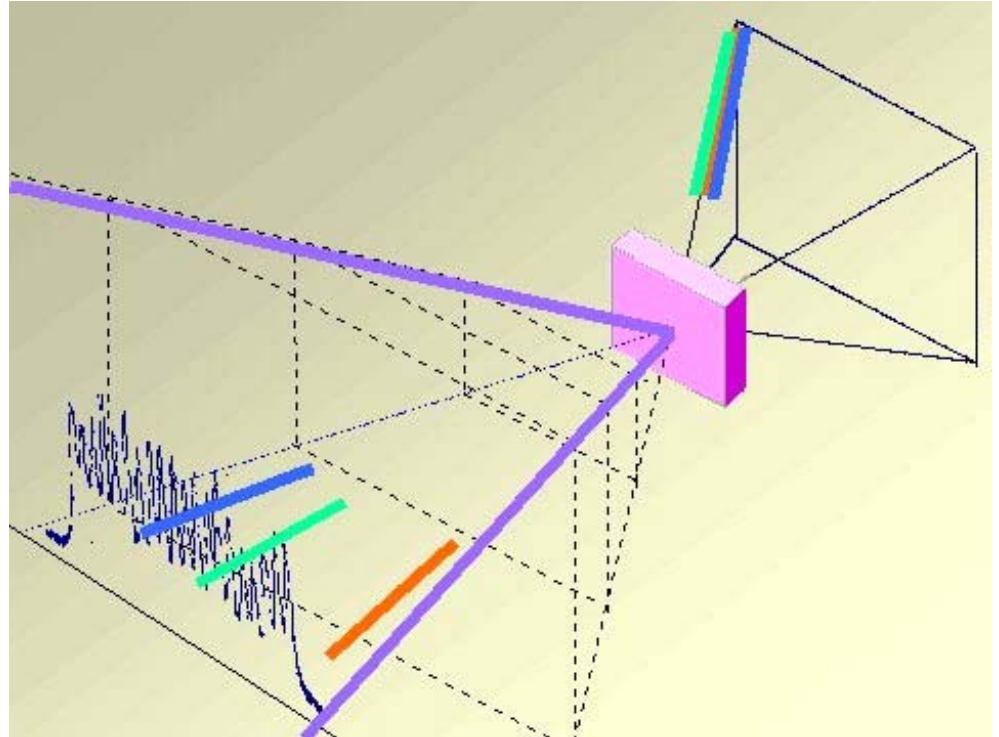
# Principe de l'analyseur spectral

## 2<sup>ème</sup> étape: lecture du réseau pour l'analyse spectrale



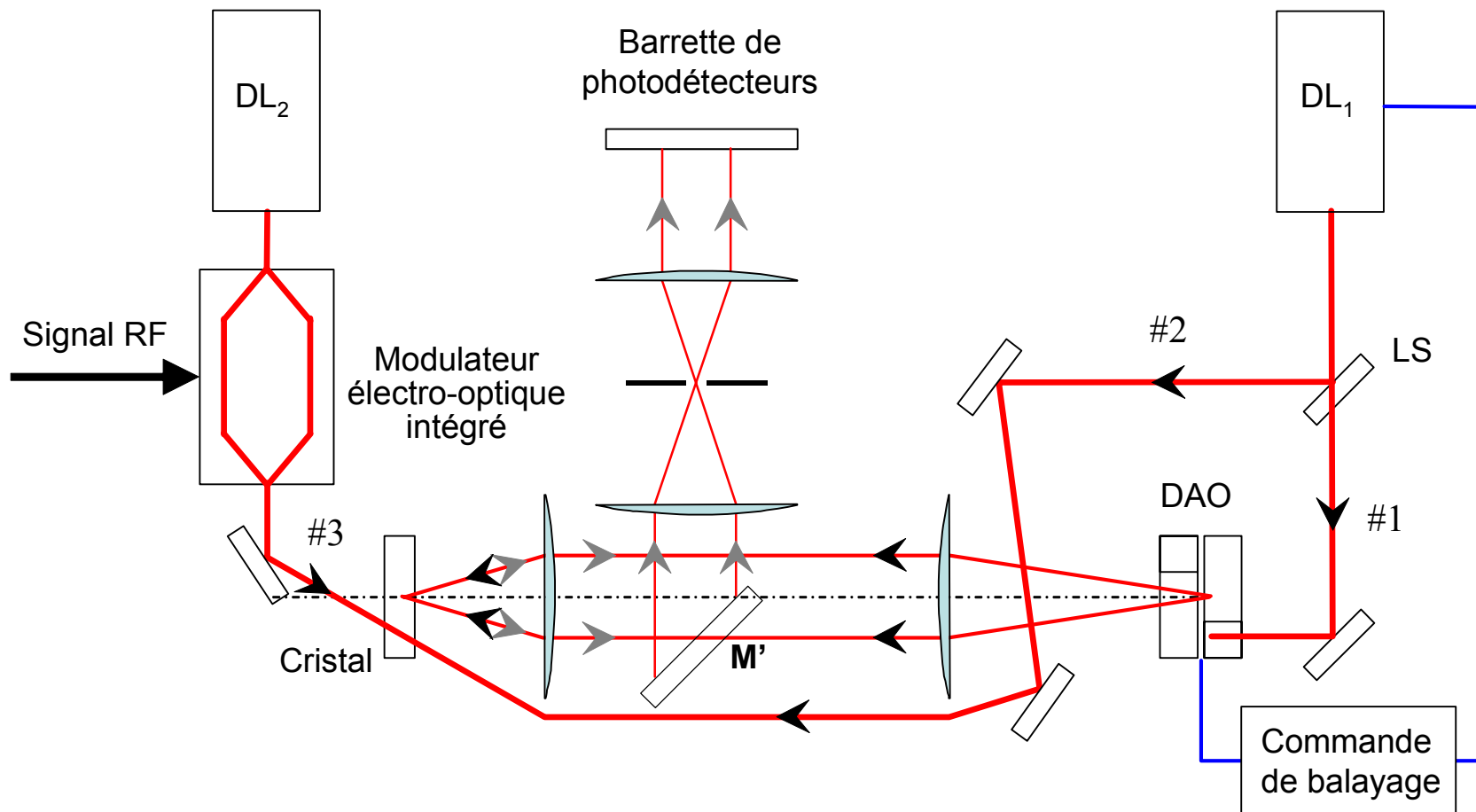
# Configuration des faisceaux

- Géométrie non coplanaire et contre propagative
- Simultanément:  
rafraîchissement des réseaux  
et analyse du signal
- Cadence  
de rafraîchissement  $> 1\text{kHz}$
- Taux de chirp  $> 10\text{GHz/ms}$

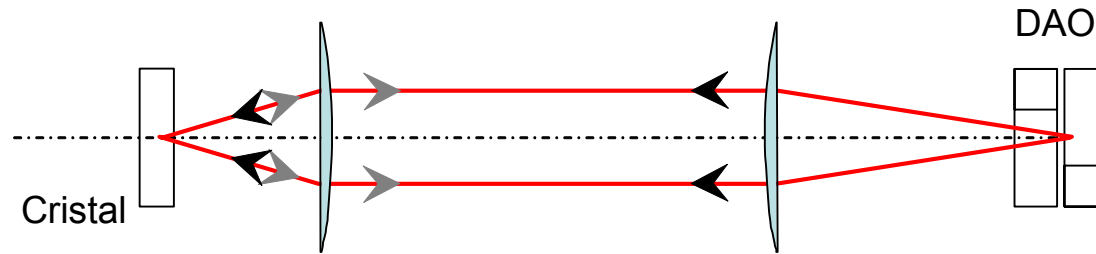




# Architecture optique



# Nombre de canaux spectraux



Nombre de canaux spectraux = nombre de canaux angulaires

$$\text{Nombre de canaux angulaires du défecteur} = \frac{\Delta\theta}{\delta\theta} \quad \delta\theta = \frac{\lambda}{\pi w}$$

**Notre montage :  $w = 1,5 \text{ mm}$ ;  $N = 124$**

Conservation de l'étendue :

nombre de canaux du défecteur = nombre de canaux de l'analyseur

# Tache laser sur le cristal

Réduire l'aire de la tache laser pour augmenter l'intensité

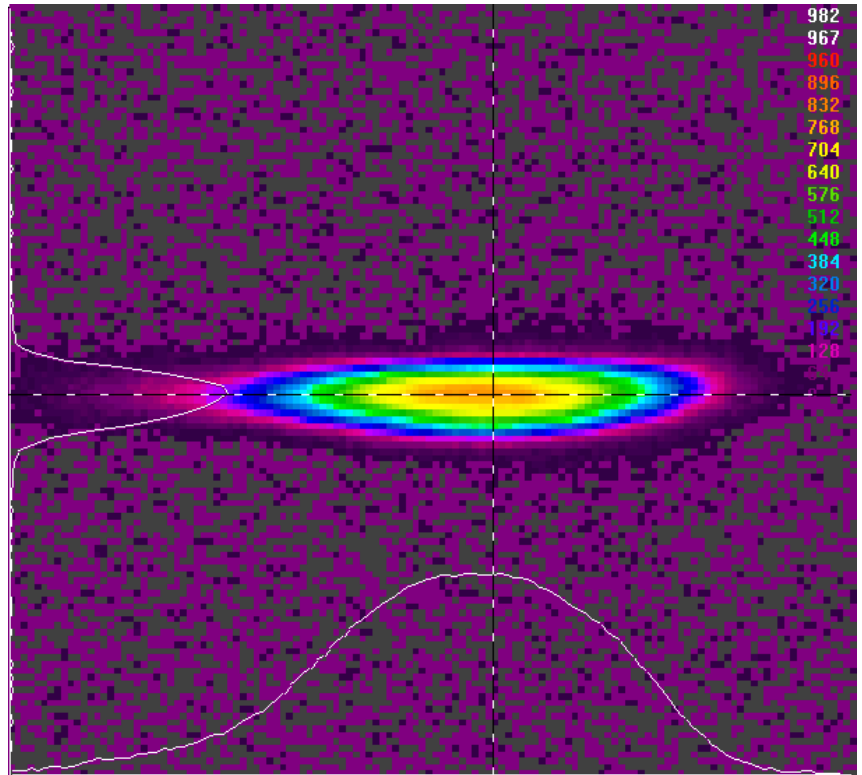
Conserver l'étendue du faisceau pour conserver le nombre de canaux

Ouverture angulaire des optiques limitée



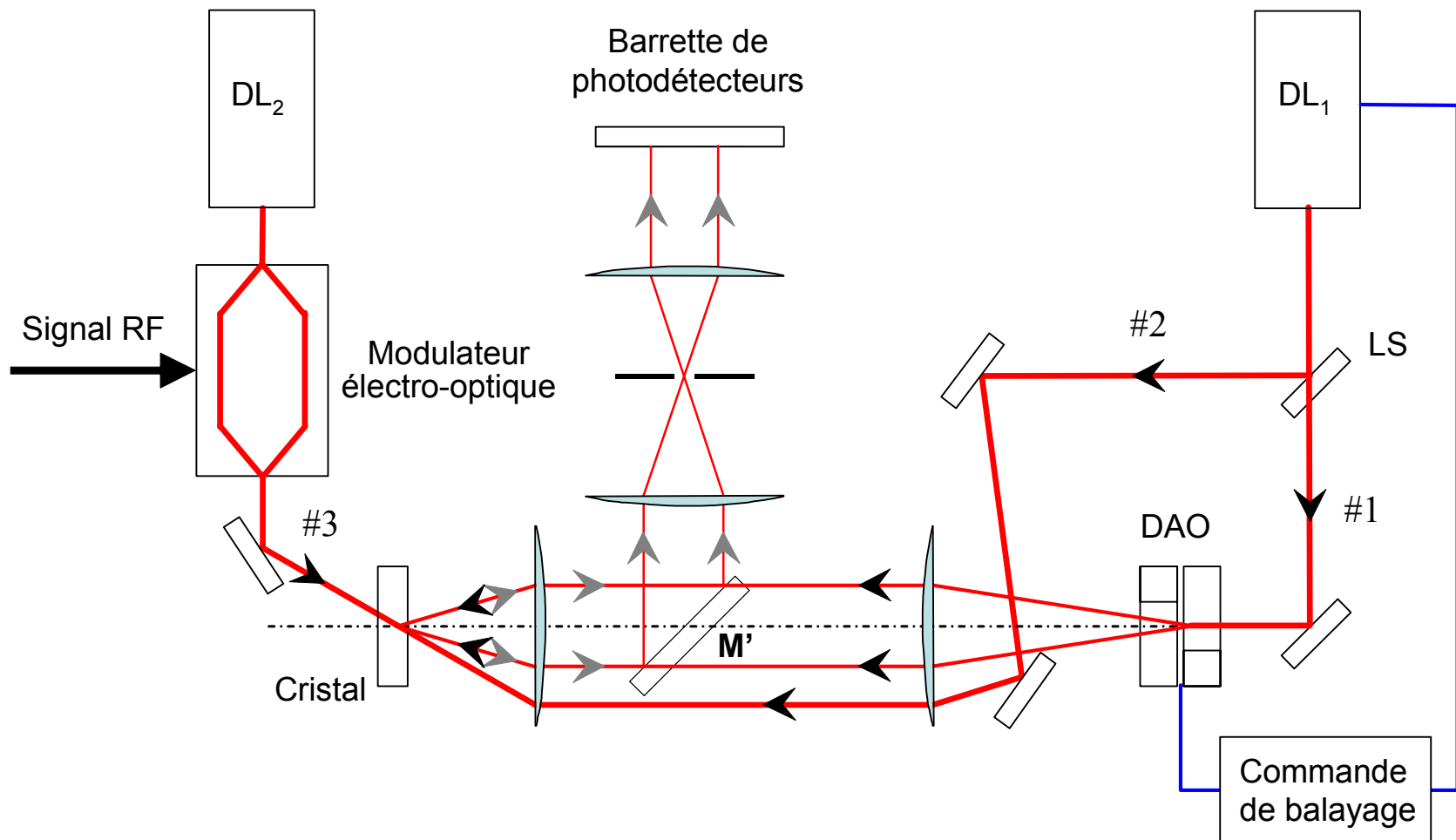
Tache elliptique

140  $\mu\text{m}$   $\updownarrow$

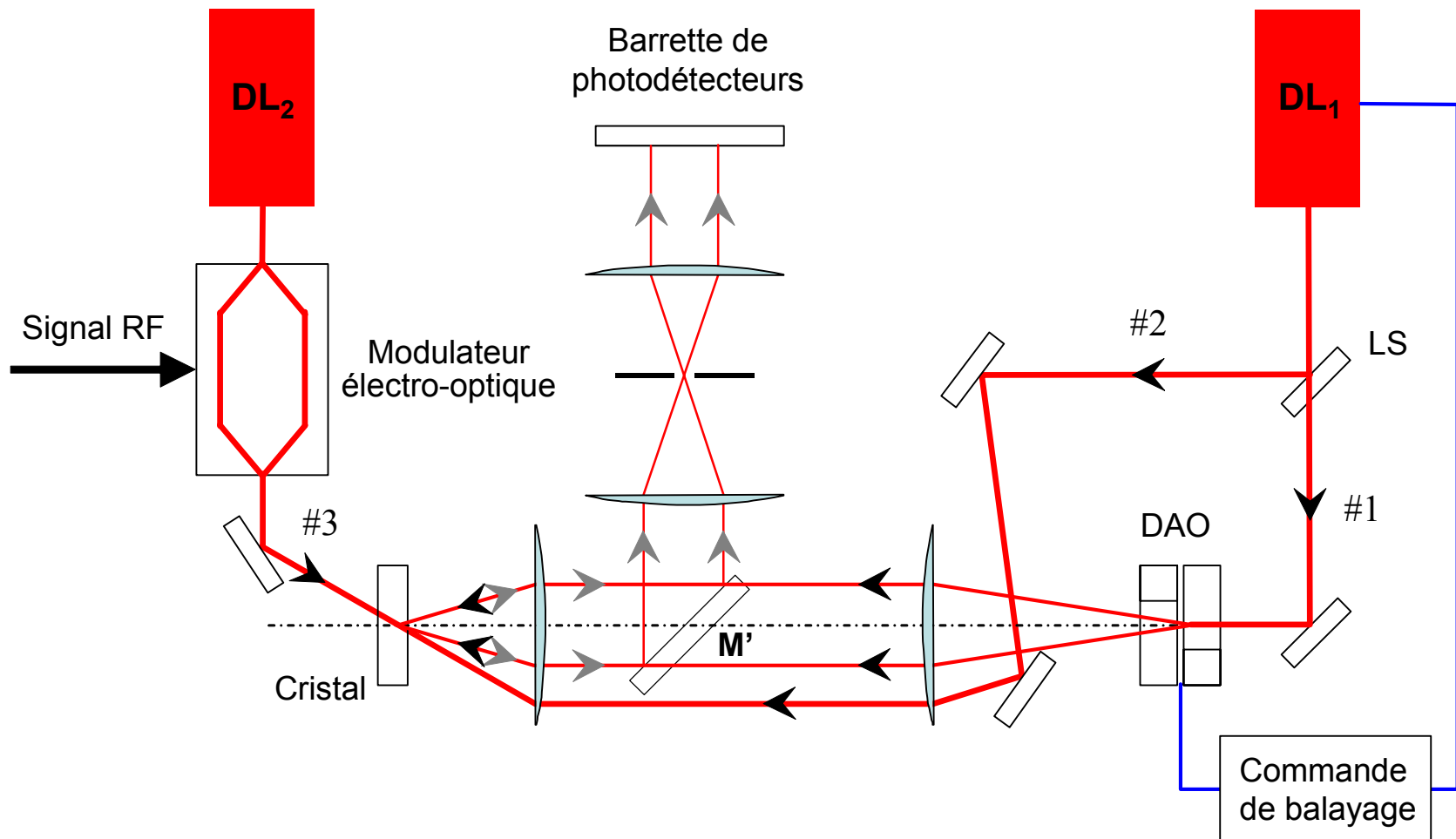


800  $\mu\text{m}$

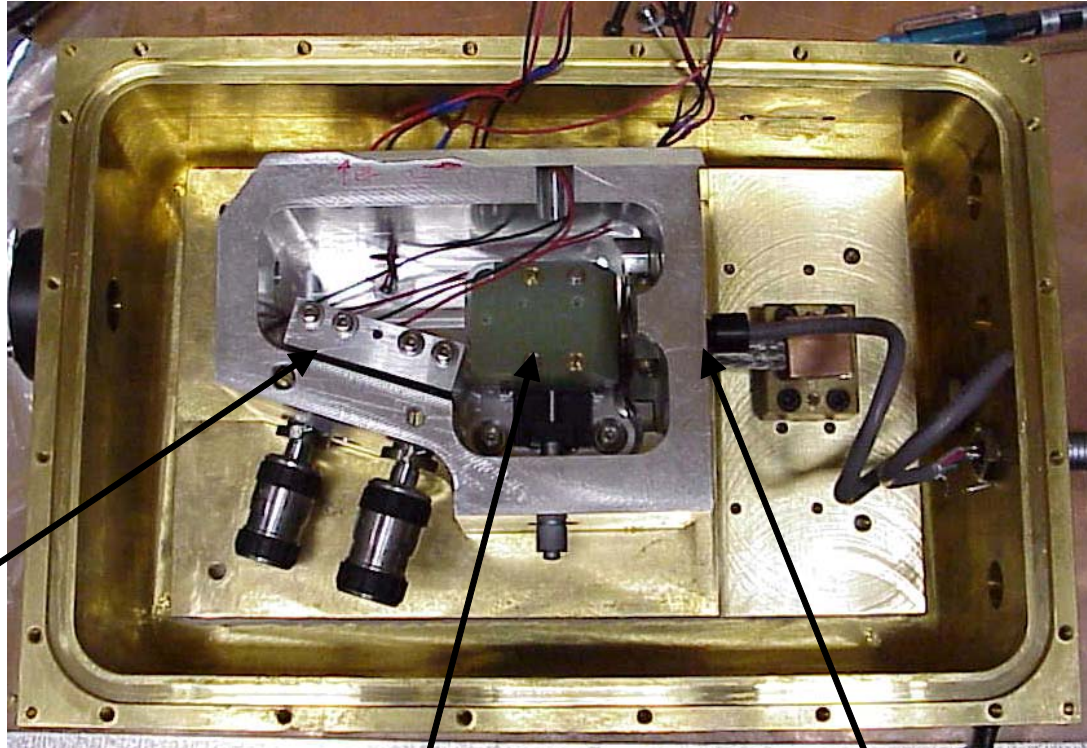
# Architecture optique



# Architecture optique



# Laser agile en fréquence

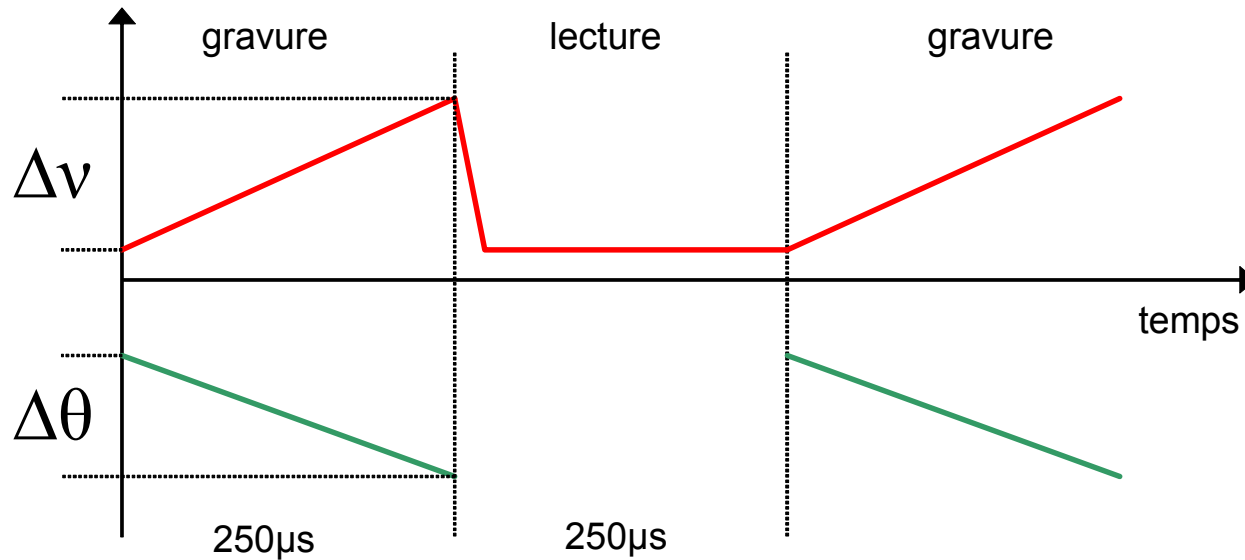


Réseau de diffraction

Prisme  
électro-optique

Diode laser

# Chronogramme d'une expérience à un seul laser



Loi de dispersion  $\frac{\Delta \theta}{\Delta v}$  arbitraire

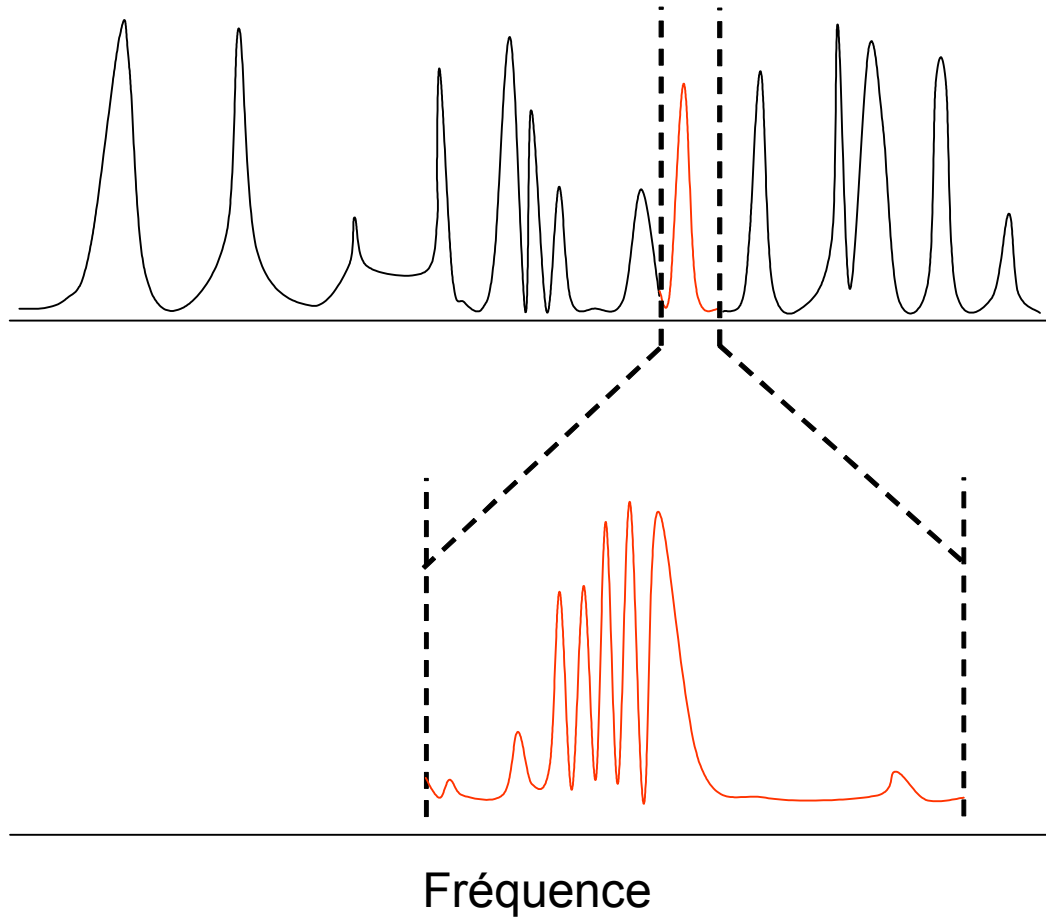
# Les résultats expérimentaux

- Couverture large bande et effet de zoom
- Bande passante et nombre de canaux
- Dynamique du système

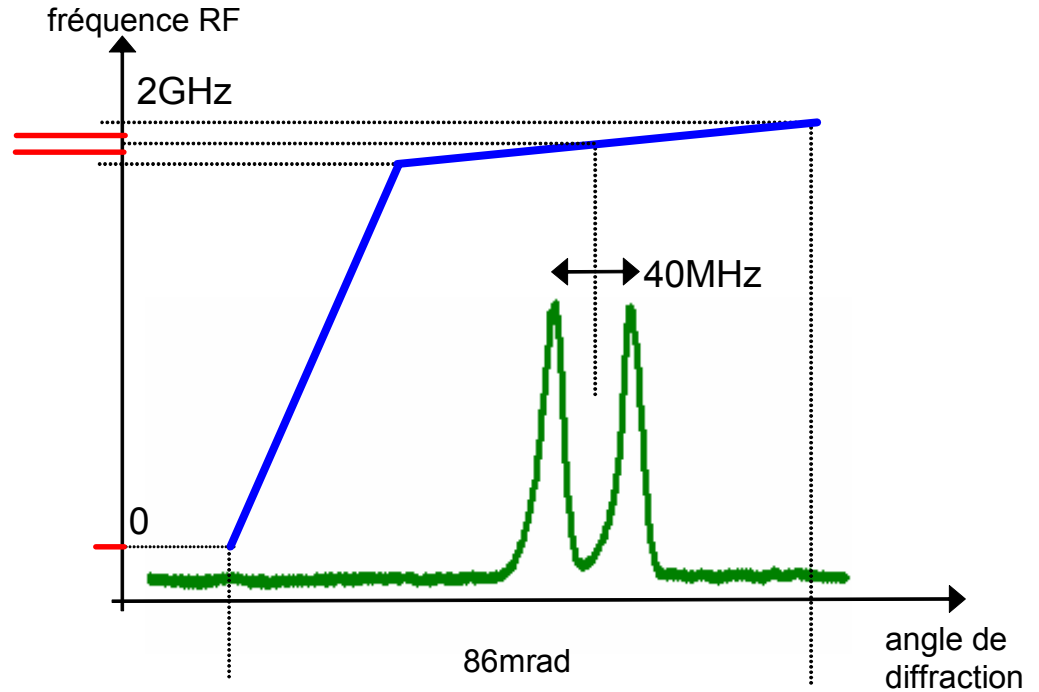
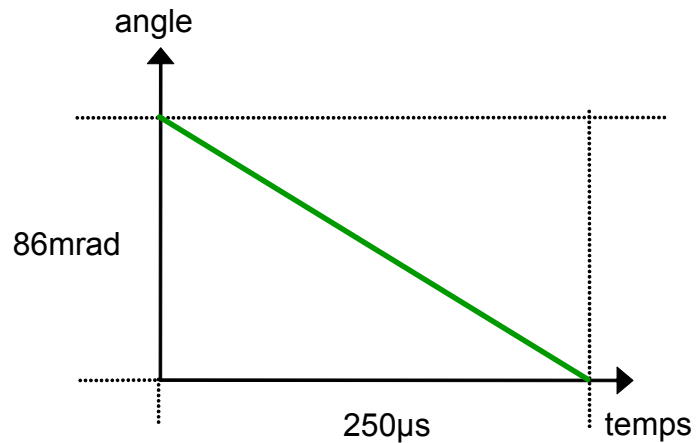
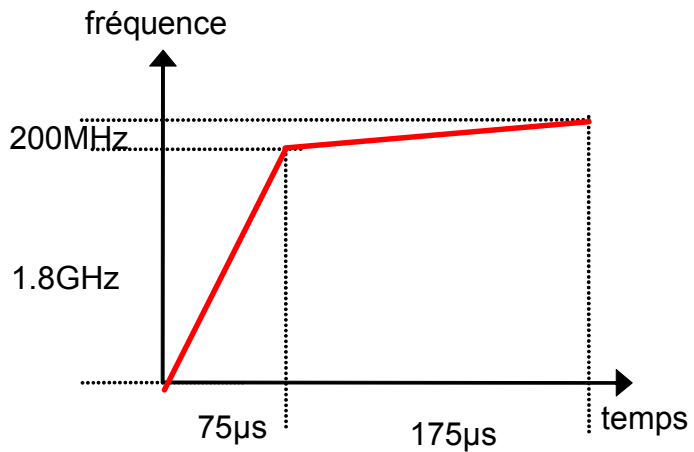




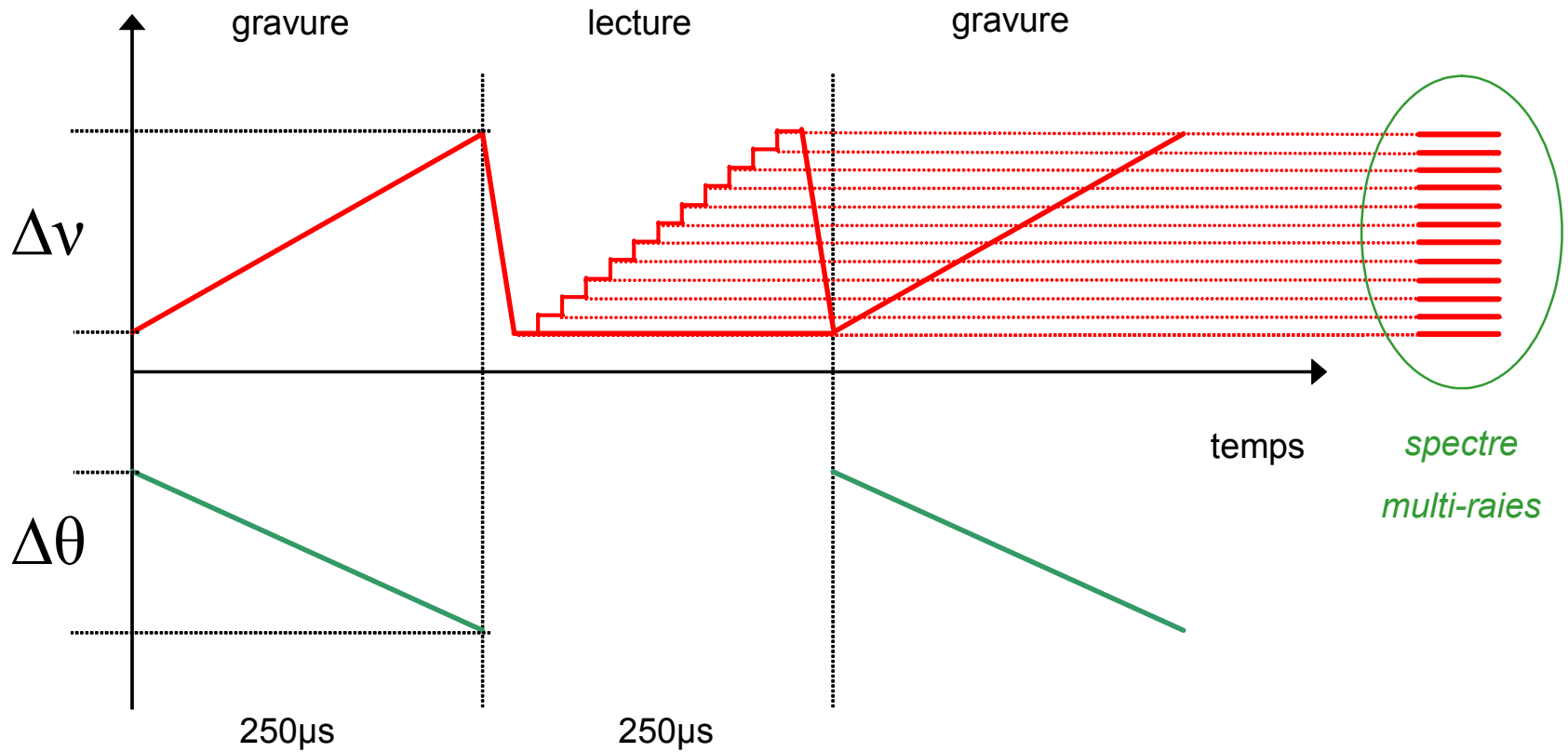
# Couverture large bande et effet de zoom



# Couverture large bande et effet de zoom



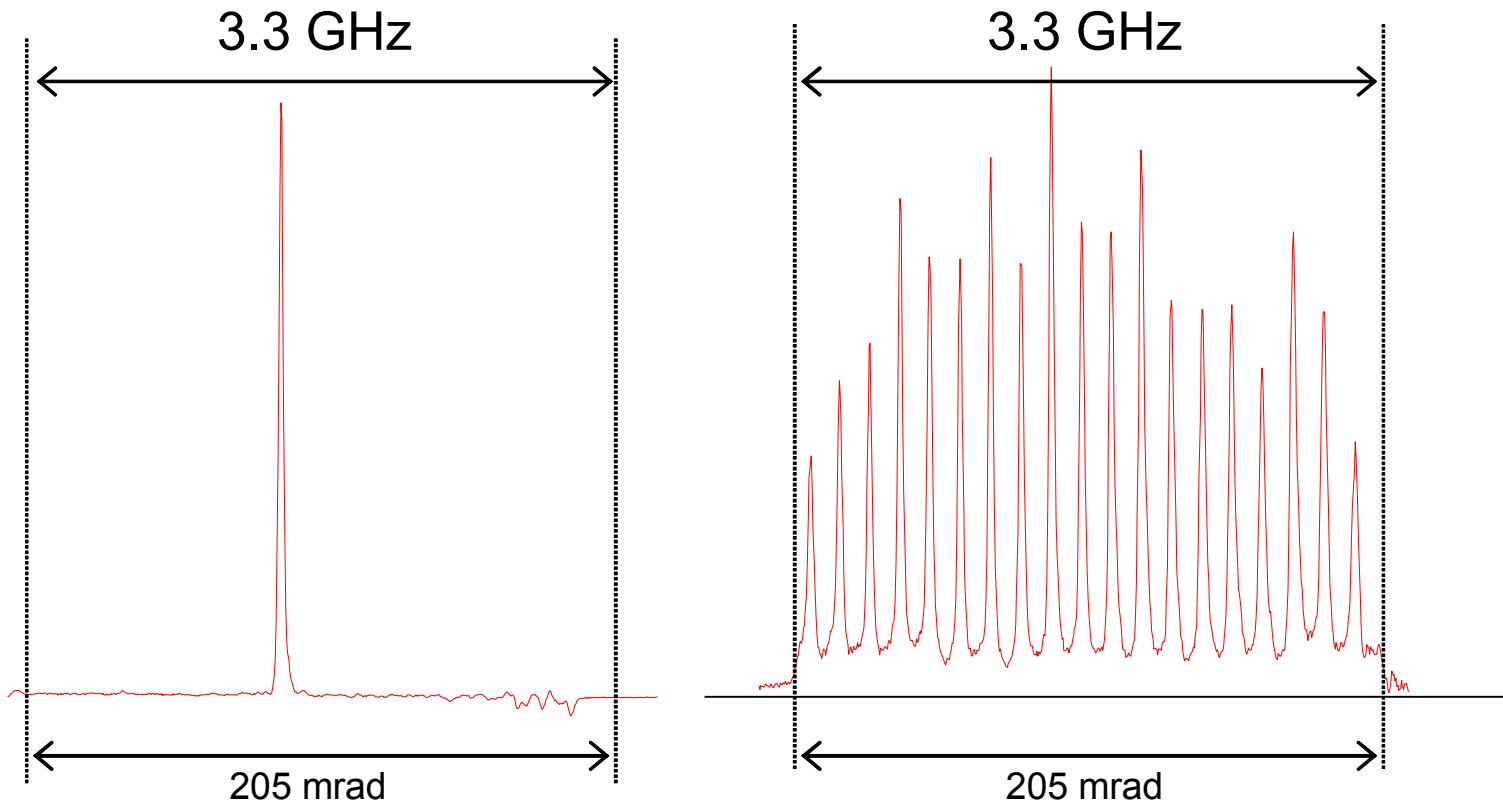
# Analyse d'un signal multi-raies



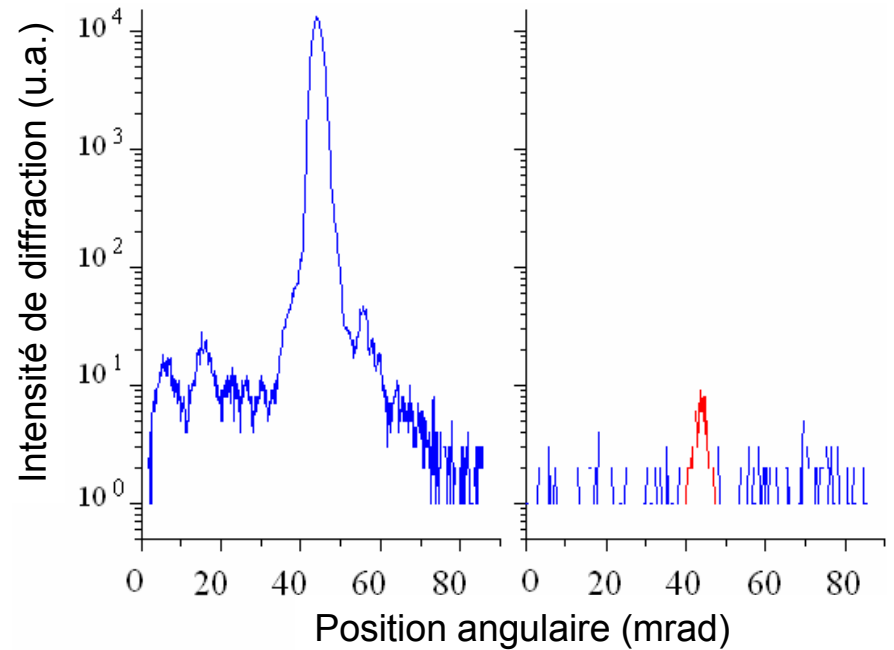
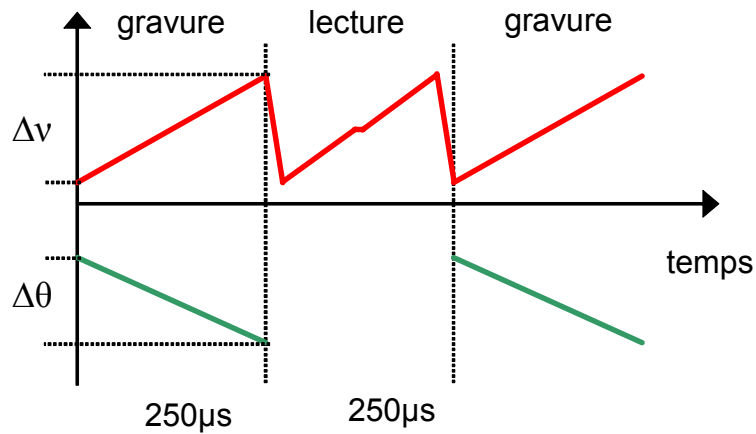
# Derniers résultats obtenus

Bande passante de 3,3 GHz

Capacité de 100 canaux



# Dynamique du système



La dynamique du système de 33 dB est proche de celle du détecteur

# Conclusion et perspectives



# Tableau récapitulatif

	Limitation fondamentale	Limitation pratique	Performance démontrée
Bande passante	Bande passante du cristal	Amplitude des glissements de fréquence	3,3 GHz
Résolution	Résolution du cristal	Gigue du laser	500 kHz
Nombre de canaux	Nombre de canaux angulaires des déflecteurs acousto-optiques		102
Dynamique		Lumière diffusée	33 dB
Zoom			Oui
Probabilité d'interception	100%	Deux lasers sont nécessaires pour 100%	50%
Puissance laser			<10 mW

# Comparaison avec les autres technologies

	filtres	ACN	ACA	SAW	AO	Spectro SHB
<b>Bande passante</b>	1,2 GHz	700 MHz	<b>3,6 GHz</b>	205 MHz	1 GHz	<b>3,3 GHz</b>
<b>Nombre de canaux</b>	25	100	128	4096	<b>2000</b>	<b>102</b>
<b>Dynamique</b>	60 dB	48 dB	38 dB	40 dB	30 dB	33 dB
<b>Flexibilité spectrale</b>	NON	OUI	NON	NON	NON	OUI+
<b>Résolution ultime</b>		140 kHz				500 kHz
<b>Temps d'accès</b>	limité par TF	temps d'intégration	temps d'intégration (>10ms)	limité par TF	lecture de la barrette de détecteurs	lecture de la barrette de détecteurs



# Collaborations :

**THALES**

**Research & Technologies, Orsay**  
**Airborne systems, Elancourt**



LUND UNIVERSITY

**Université de Lund, Suède**

# Soutiens :

