



Laboratoire Aimé Cotton

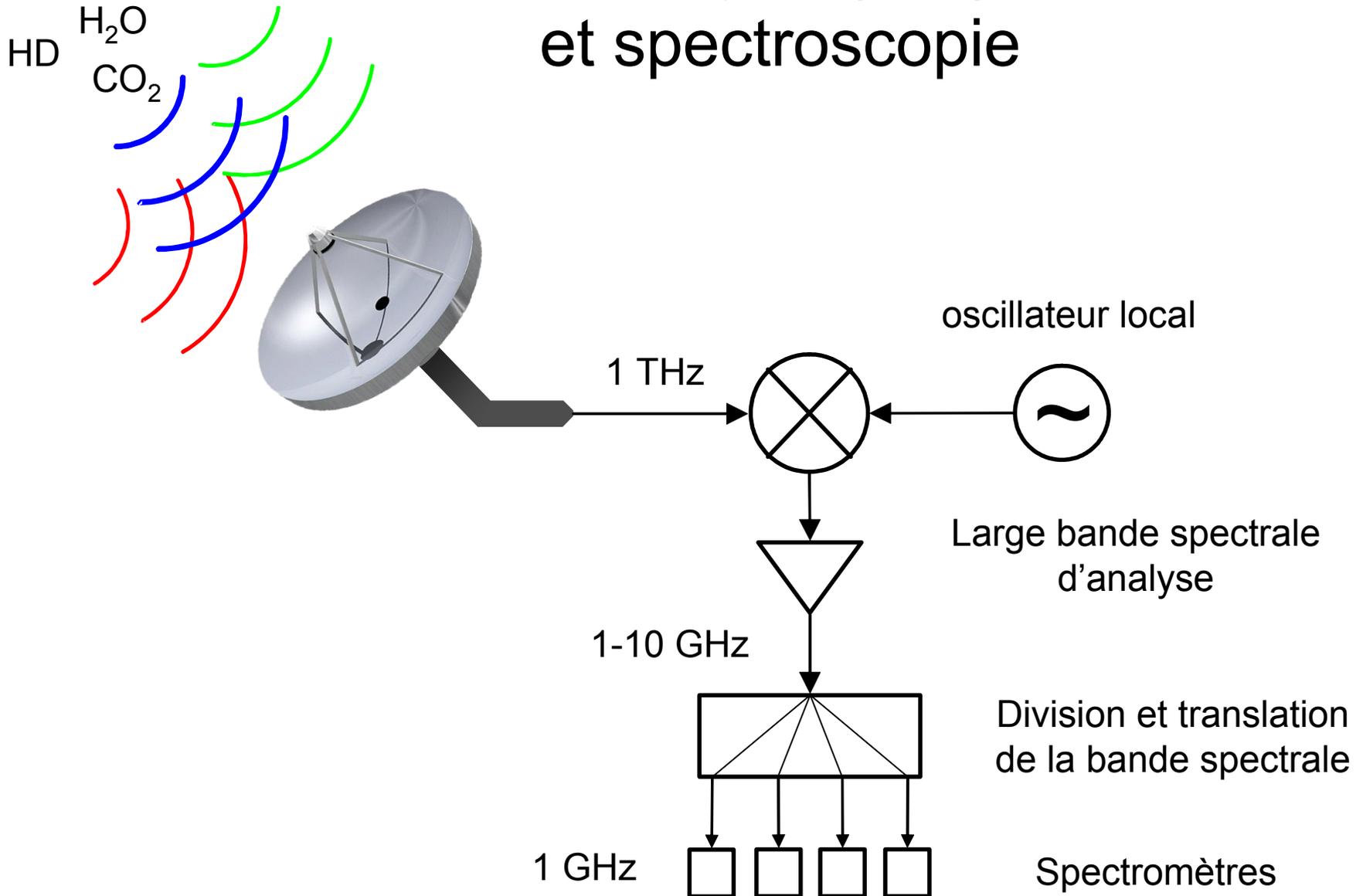
4 novembre 2004

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

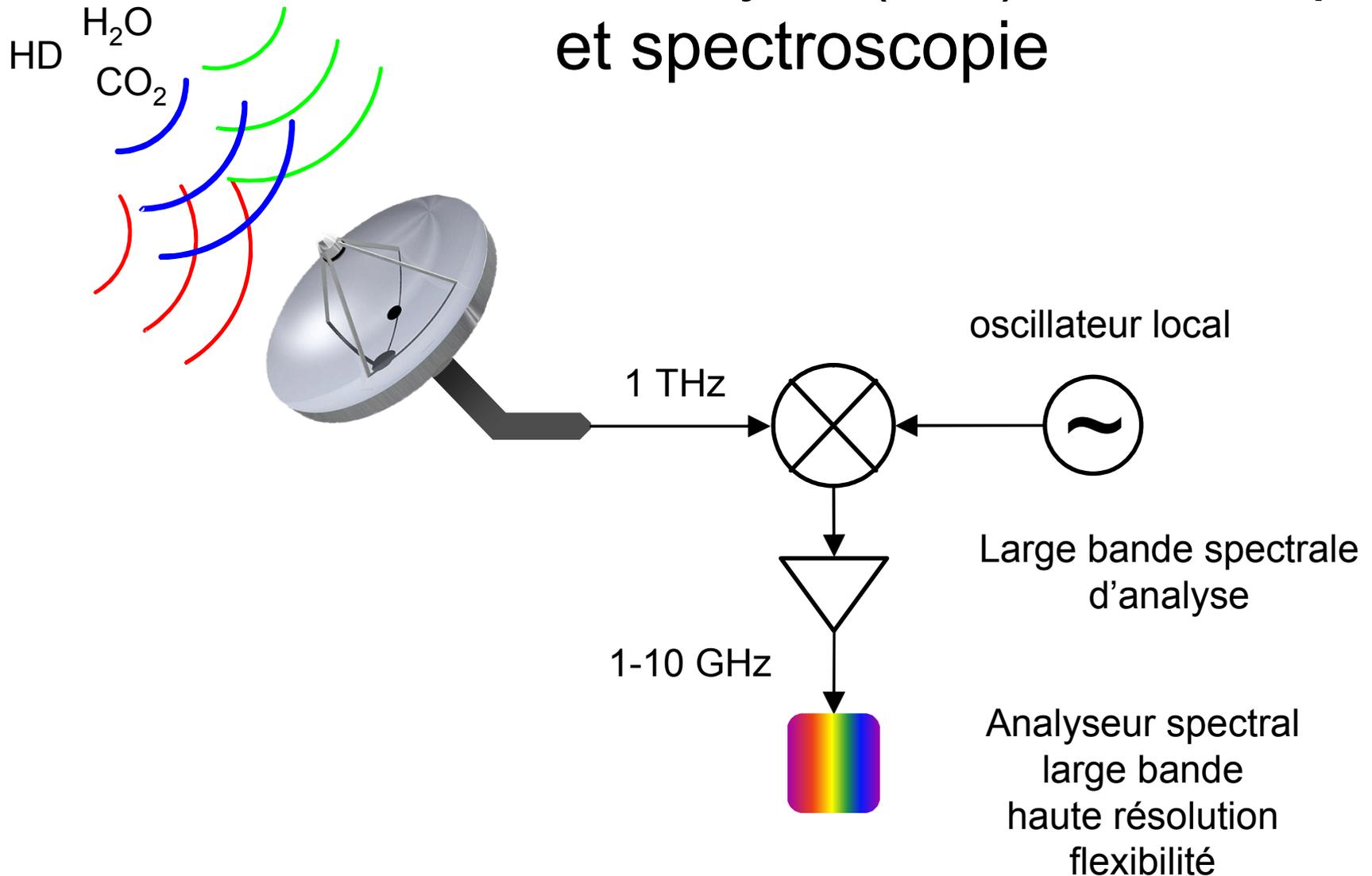
Vincent Lavielle

Optique et matériaux
pour le traitement de l'information

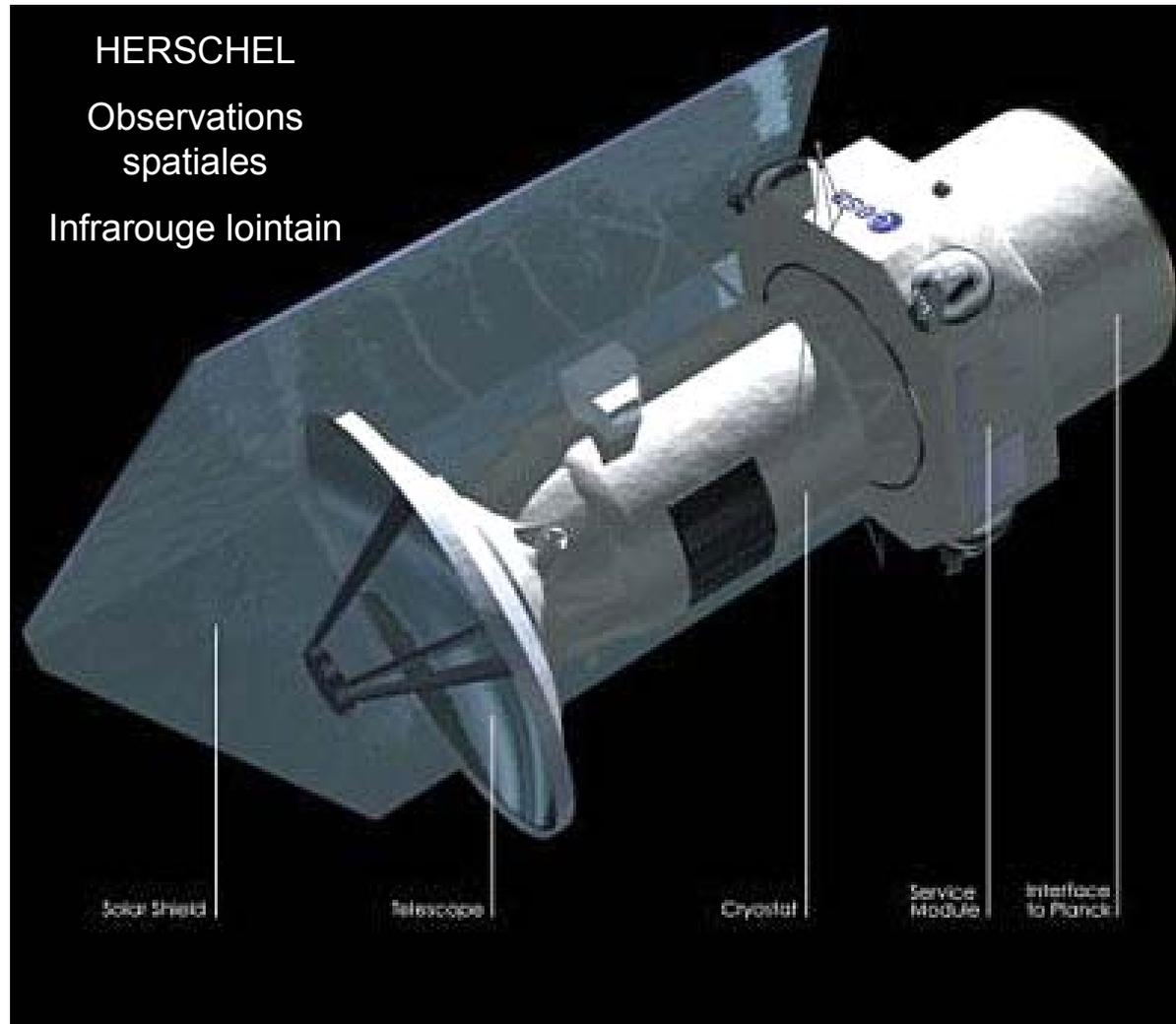
Détection hétérodyne (sub)millimétrique et spectroscopie



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

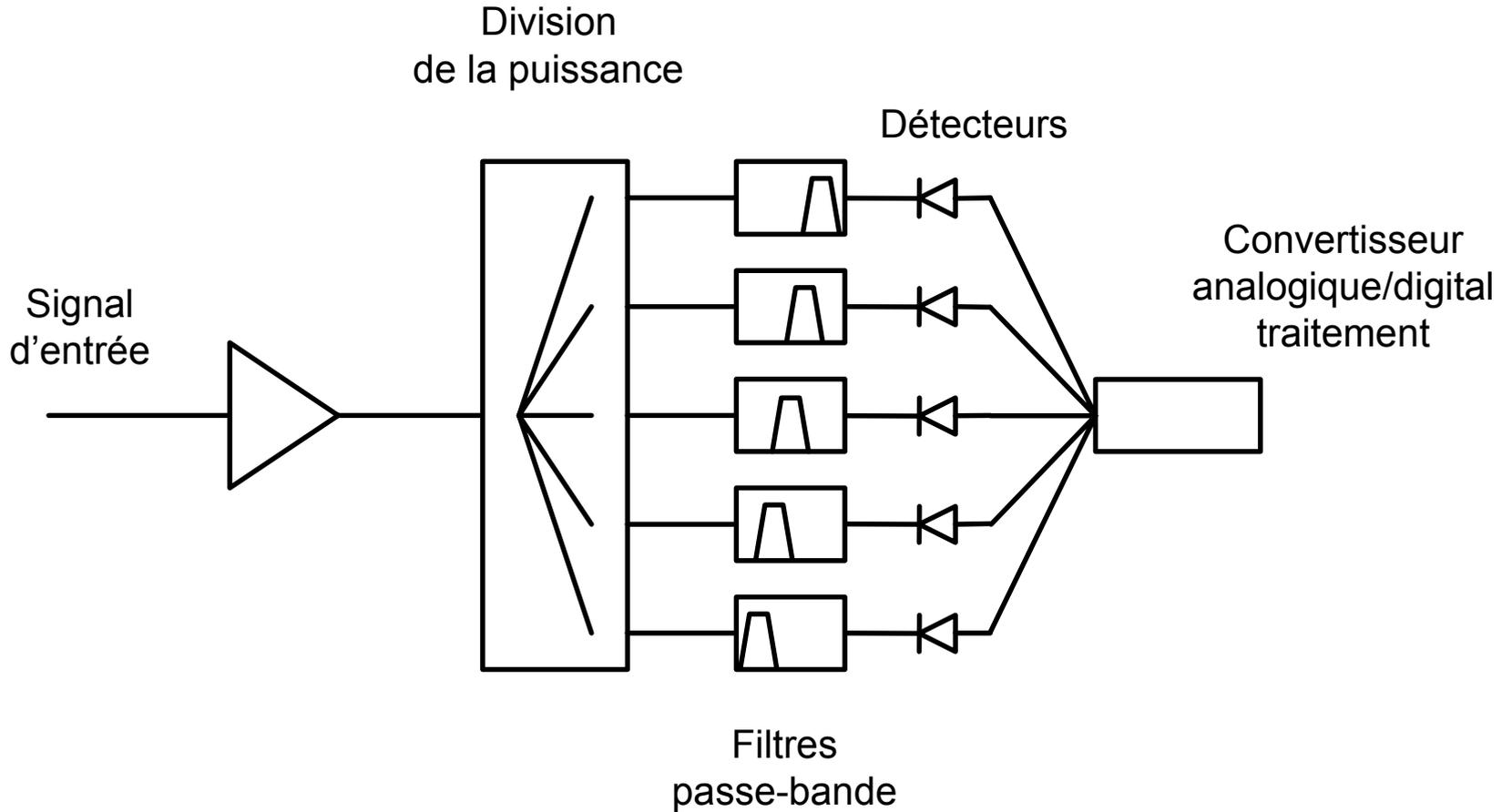


Les différents analyseurs spectraux

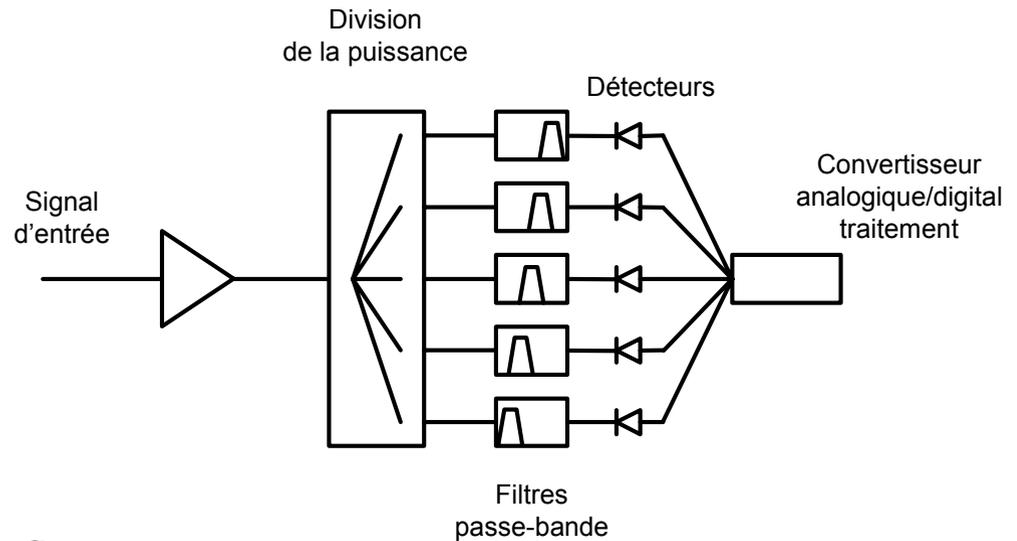
- Les spectromètres à batterie de filtres
- Les spectromètres par autocorrélation
- les spectromètres SAW
- les spectromètres acousto-optiques



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

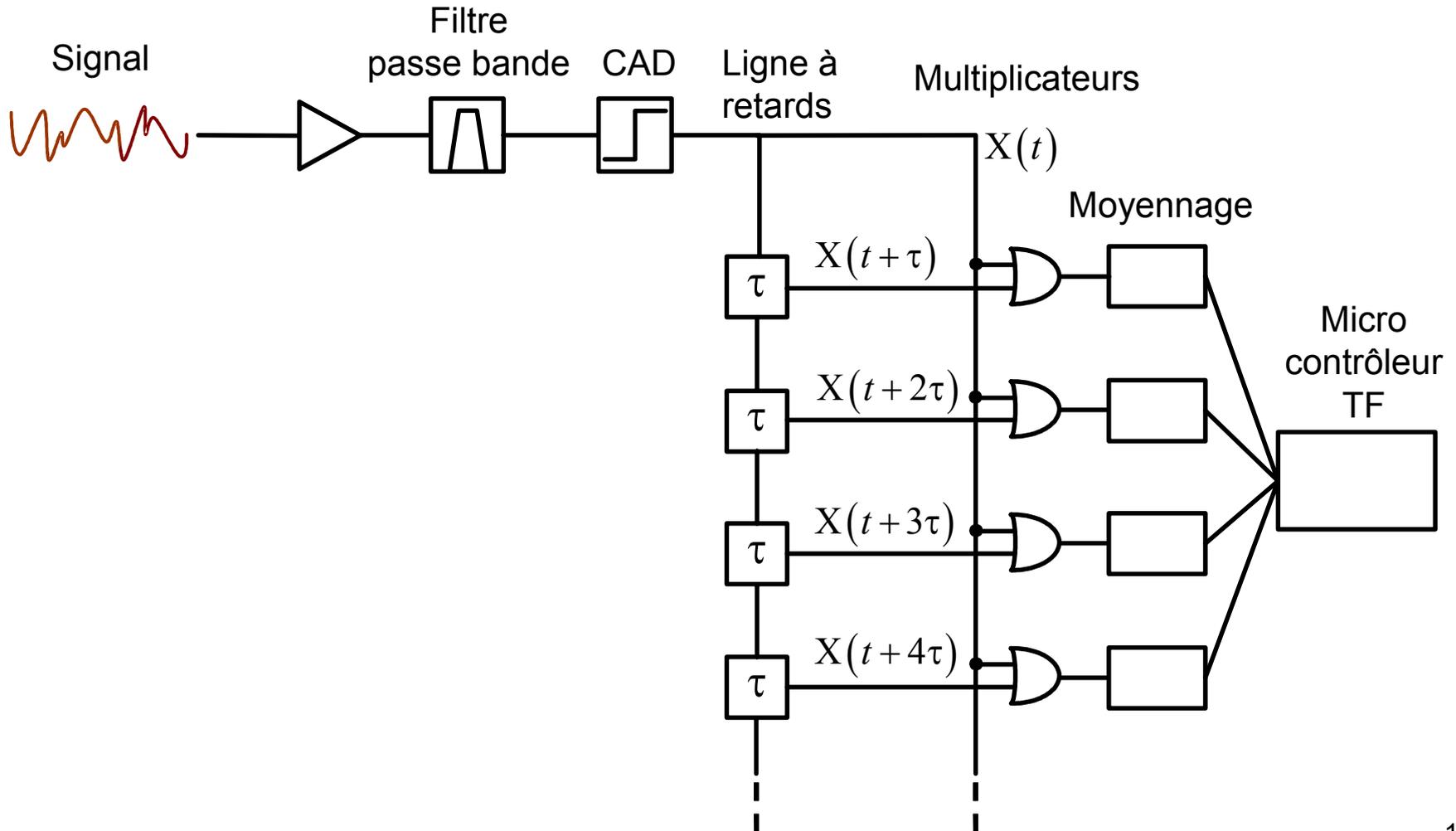
- Autocorrélateurs numériques
- Autocorrélateurs analogiques

Théorème de Wiener-Khintchine

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

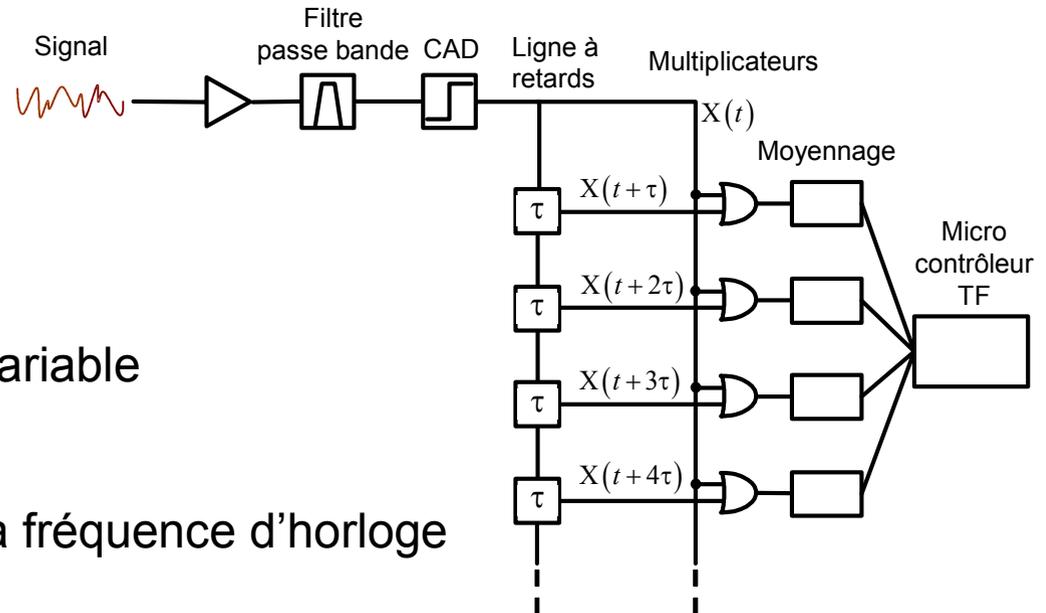
Spectromètres par autocorrélation

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 :

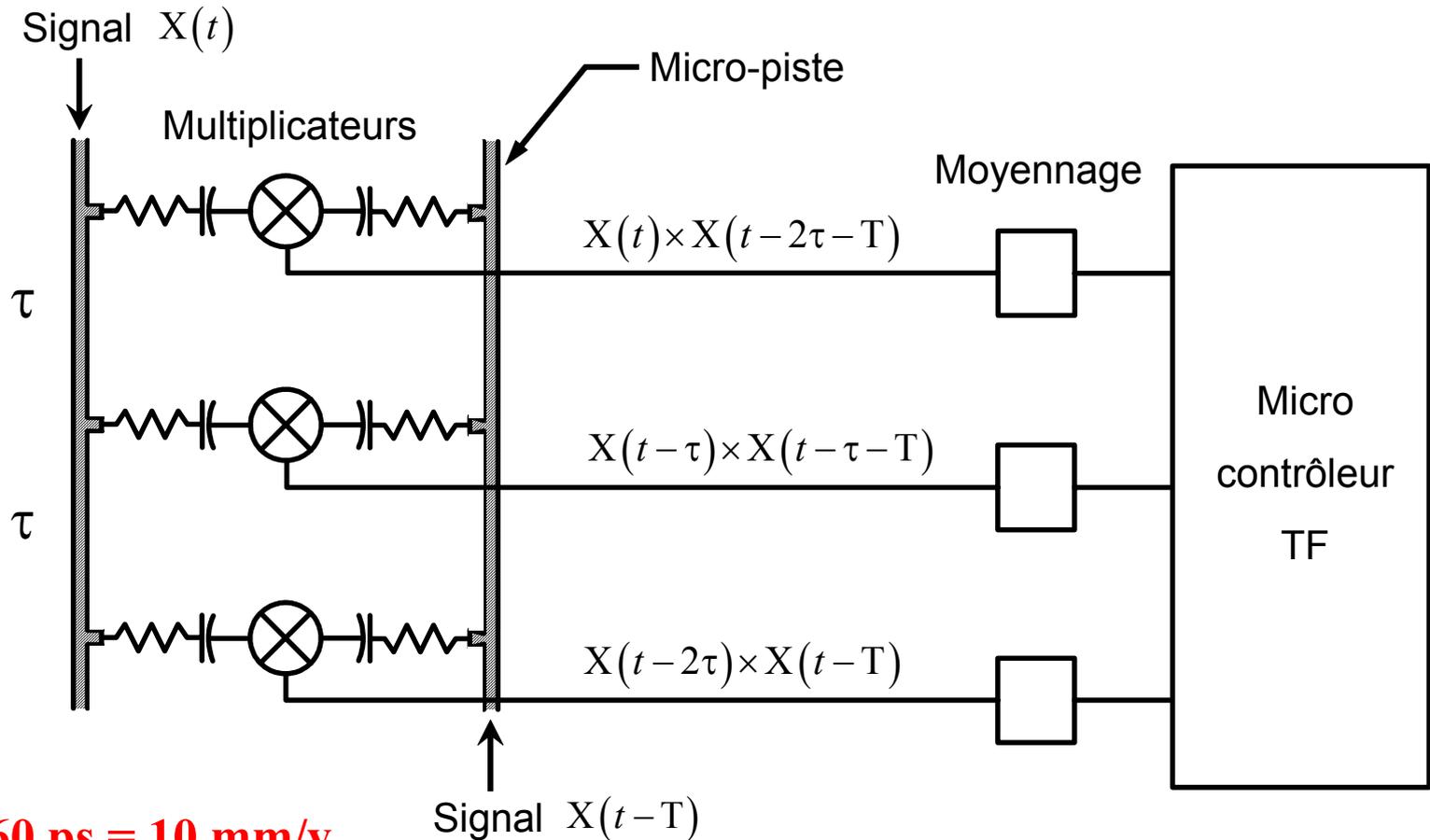
Bande passante de 700 MHz

100 canaux spectraux

Résolution ultime de 140 kHz

Spectromètres par autocorrélation

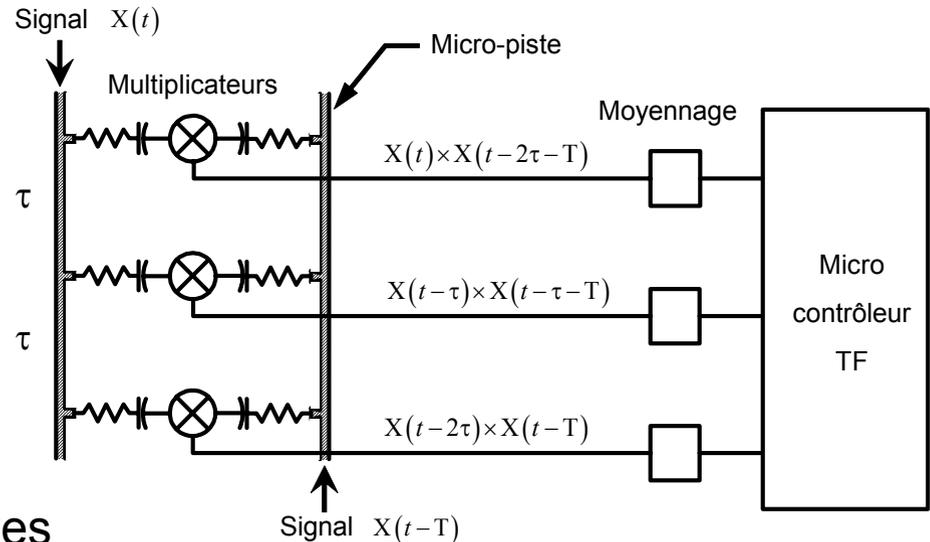
Autocorrélateurs analogiques



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

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 μ m pour 60 ps à 4000 m/s

DAO : 0,03 μ m pour 60 ps à 650 m/s

Spectromètres à ondes acoustiques de surface

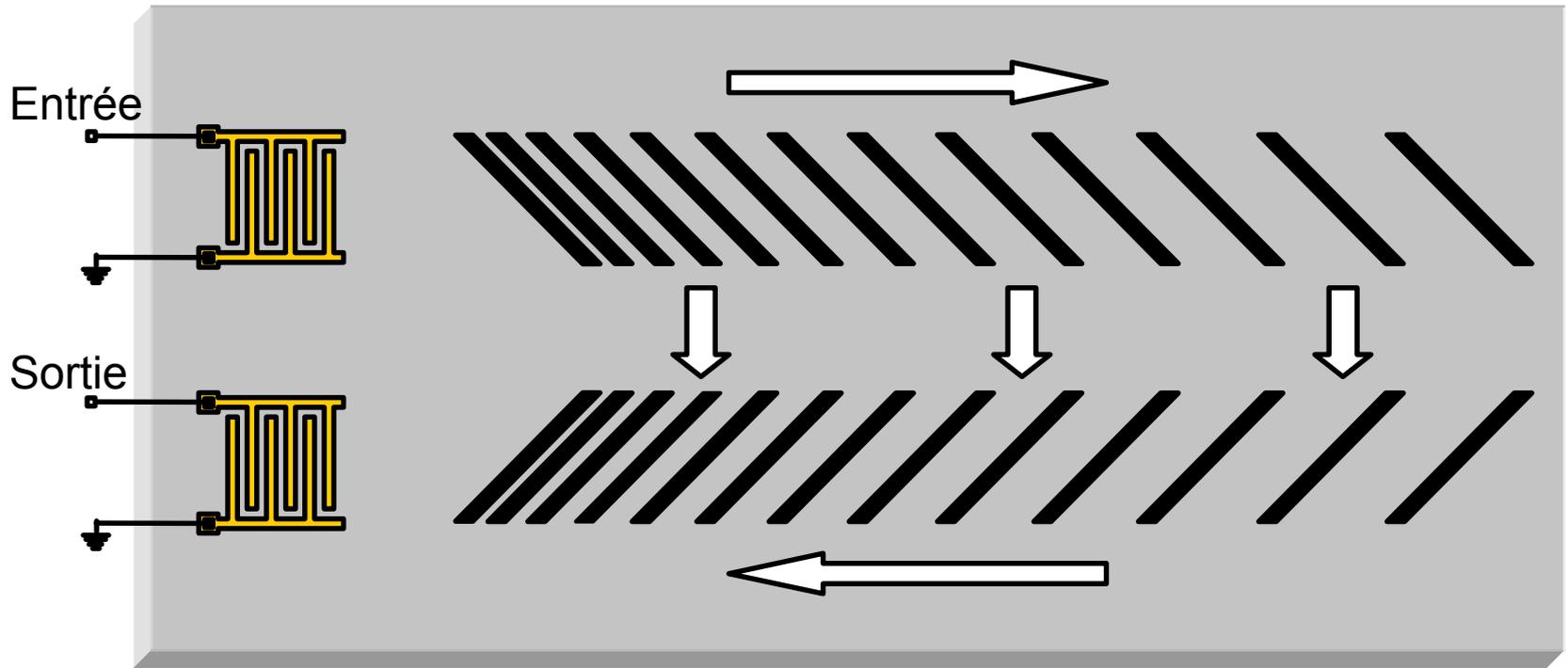
Analyse spectrale par transformée de chirp

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

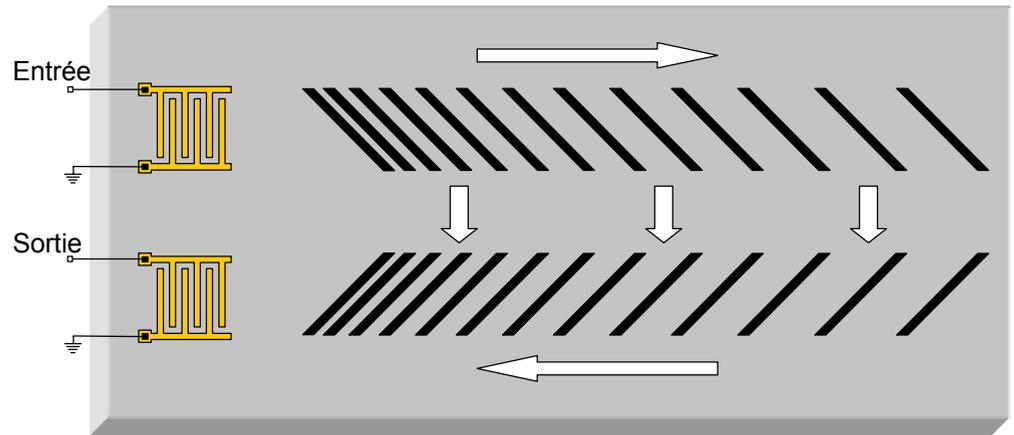
Retard de groupe : $\tau(v) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(v)}{dv} = \frac{v}{r}$

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

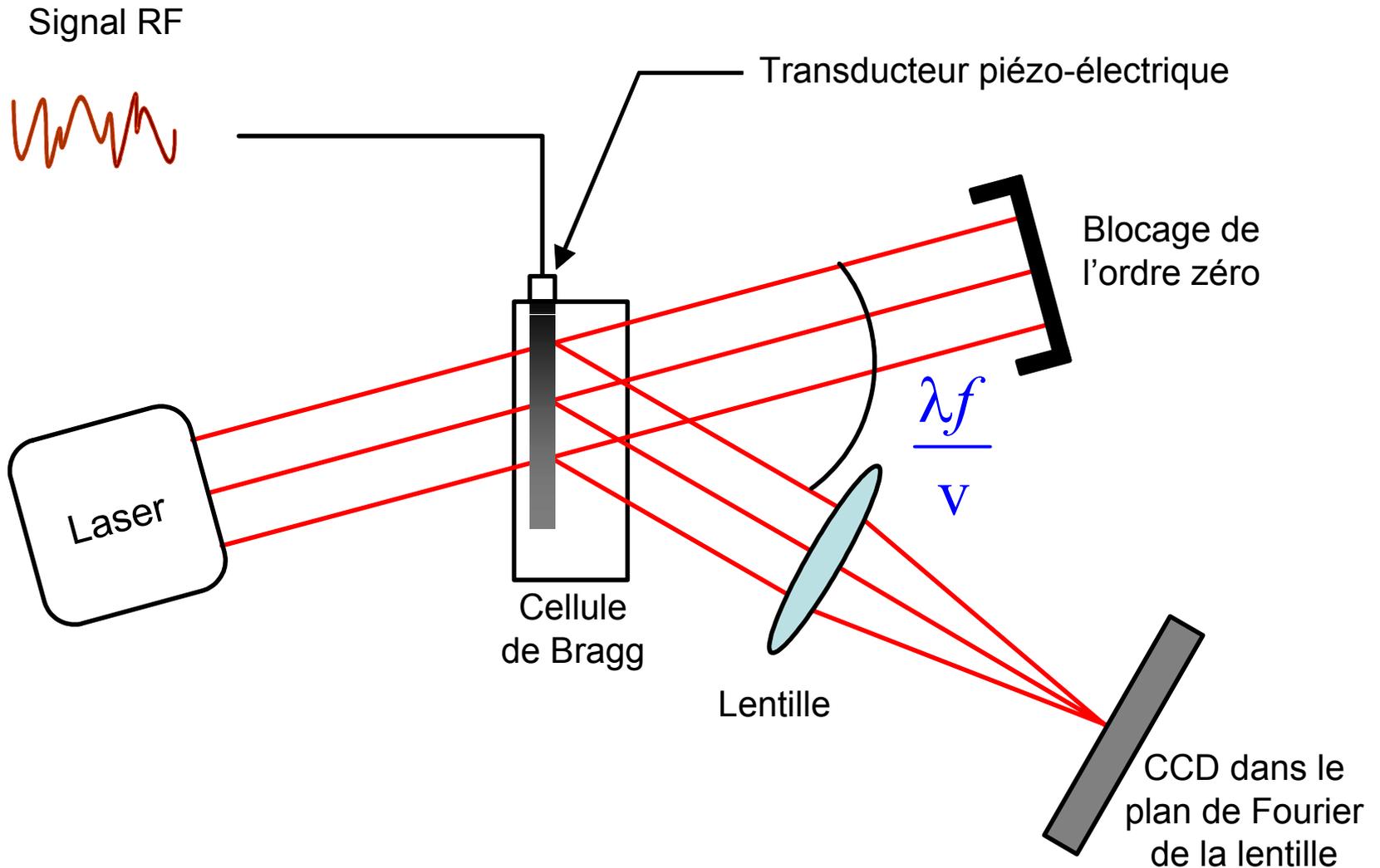


- 😊 Compacité
- 😞 Bande passante et résolution fixes
- 😞 Bande passante < 1-2 GHz

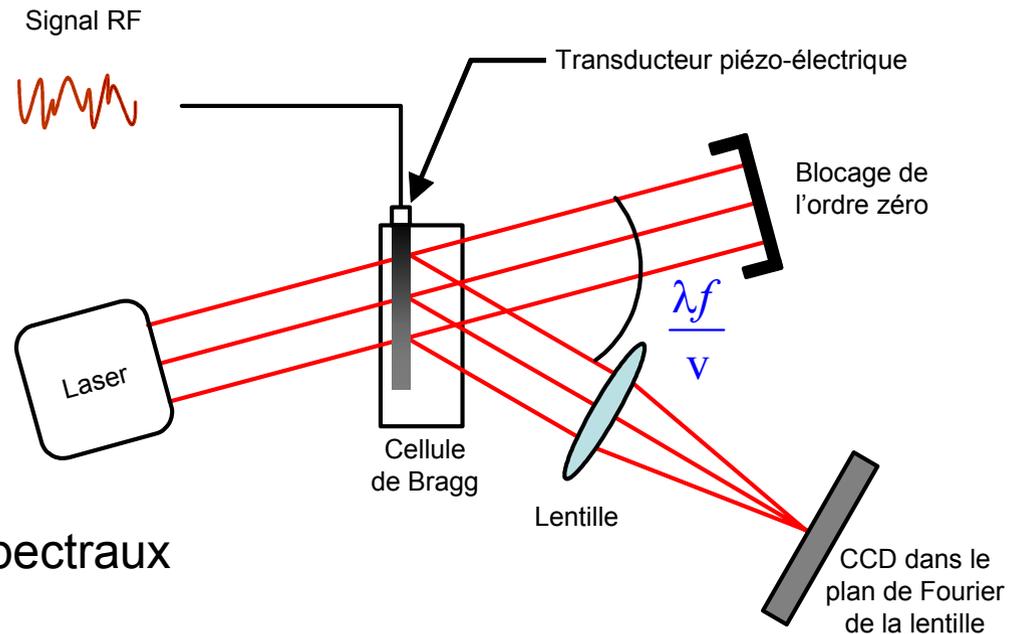
Mission SOFIA :

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

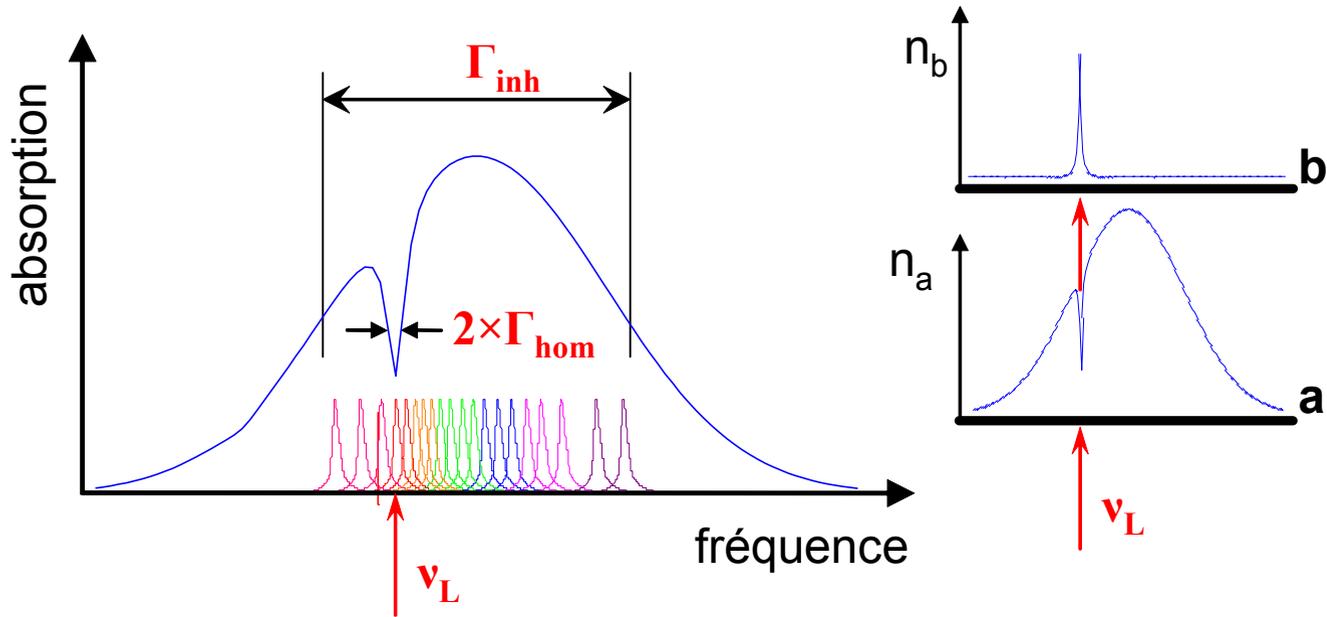
Capacité de 1000 canaux spectraux

Le principe de notre analyseur spectral

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



Une autre approche: la résonance atomique



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

Le cristal Tm^{3+} : YAG

➤ Ions lanthanides : (coeur)⁴⁶ $4f^n 5s^2 5p^6$ 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 Ce³⁺ (Pd)4f ¹ 5s ² 5p ⁶ Cérium	56 Pr³⁺ (Pd)4f ² 5s ² 5p ⁶ Praséodyme	57 Nd³⁺ (Pd)4f ³ 5s ² 5p ⁶ Néodyme	58 Pm³⁺ (Pd)4f ⁴ 5s ² 5p ⁶ Prométhium	59 Sm³⁺ (Pd)4f ⁵ 5s ² 5p ⁶ Samarium	60 Eu³⁺ (Pd)4f ⁶ 5s ² 5p ⁶ Europium	61 Gd³⁺ (Pd)4f ⁷ 5s ² 5p ⁶ Gadolinium
---	---	--	---	---	---	---

62 Tb³⁺ (Pd)4f ⁸ 5s ² 5p ⁶ Terbium	63 Dy³⁺ (Pd)4f ⁹ 5s ² 5p ⁶ Dysprosium	64 Ho³⁺ (Pd)4f ¹⁰ 5s ² 5p ⁶ Holmium	65 Er³⁺ (Pd)4f ¹¹ 5s ² 5p ⁶ Erbium	66 Tm³⁺ (Pd)4f ¹² 5s ² 5p ⁶ Thulium	67 Yb³⁺ (Pd)4f ¹³ 5s ² 5p ⁶ Ytterbium
--	---	---	--	---	---

Le cristal Tm^{3+} : YAG

➤ Ions lanthanides : (coeur)⁴⁶ $4f^n 5s^2 5p^6$ 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

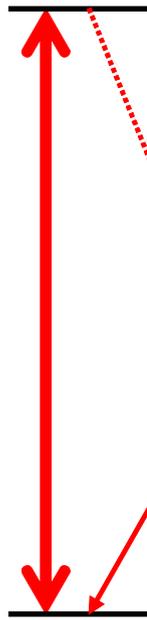
55 Ce^{3+} (Pd) $4f^1 5s^2 5p^6$ Cérium	56 Pr^{3+} (Pd) $4f^2 5s^2 5p^6$ Praséodyme	57 Nd^{3+} (Pd) $4f^3 5s^2 5p^6$ Néodyme	58 Pm^{3+} (Pd) $4f^4 5s^2 5p^6$ Prométhium	59 Sm^{3+} (Pd) $4f^5 5s^2 5p^6$ Samarium	60 Eu^{3+} (Pd) $4f^6 5s^2 5p^6$ Europium	61 Gd^{3+} (Pd) $4f^7 5s^2 5p^6$ Gadolinium
---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

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

Le cristal Tm^{3+} : YAG

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

793 nm



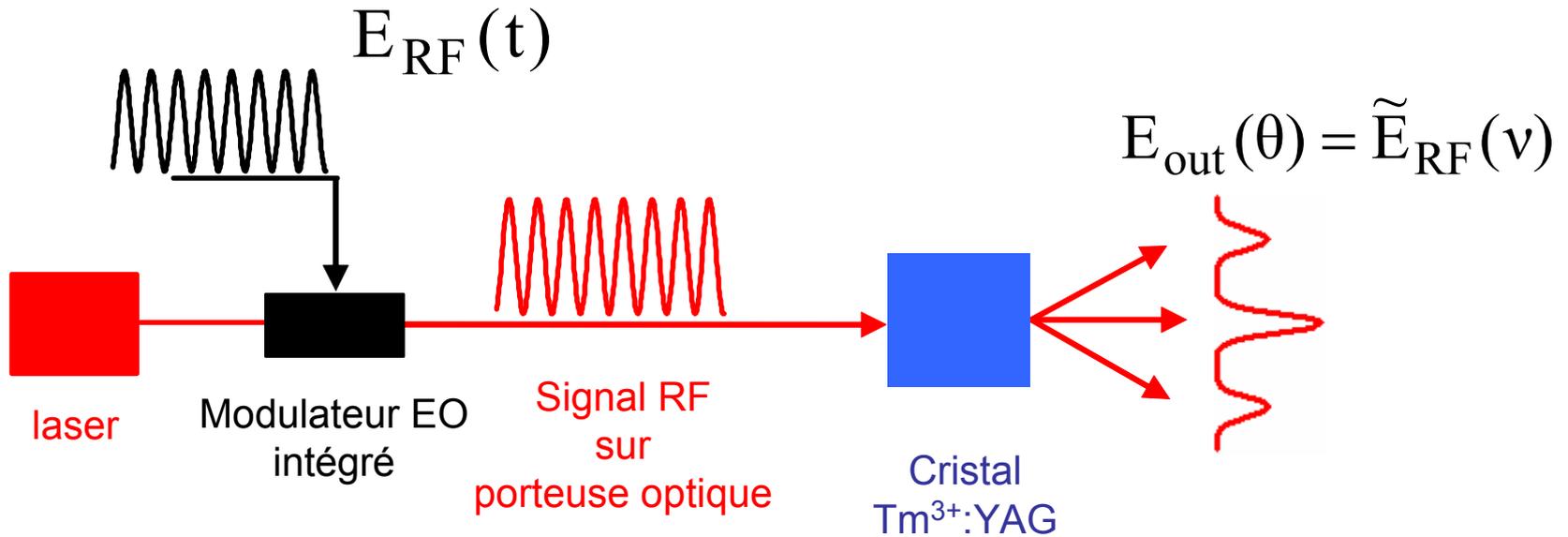
$$|3\rangle = {}^3\text{F}_4$$

$T_1 = 10 \text{ ms}$

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

Transition à :	793nm
Temps de vie de la gravure :	10ms
Γ_{inh} :	>20GHz
Γ_{hom} :	150kHz
Température:	5K

L'architecture de l'analyseur



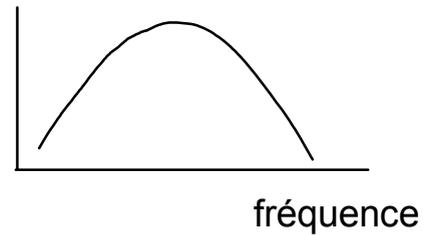
10MHz de résolution requiert
un réseau de $4 \cdot 10^7$ traits
(20mètres avec 2000 traits/mm)

Principe de l'analyseur spectral

1^{ère} étape: programmation du cristal

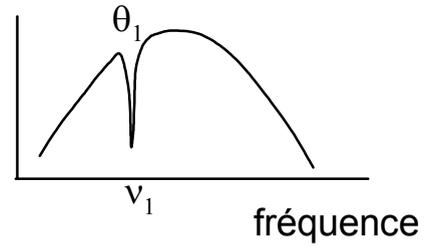
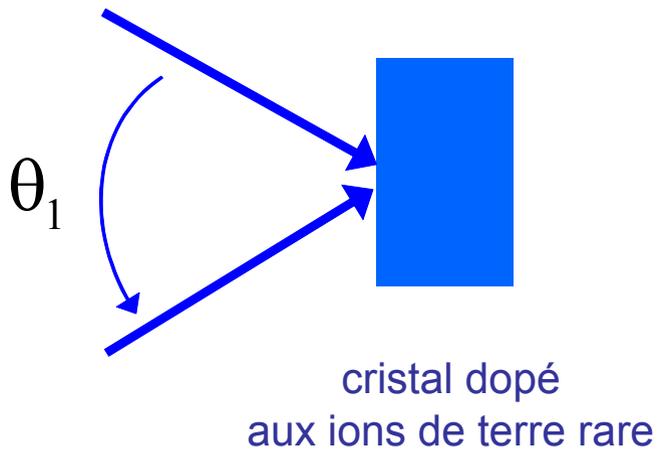


cristal dopé
aux ions de terre rare



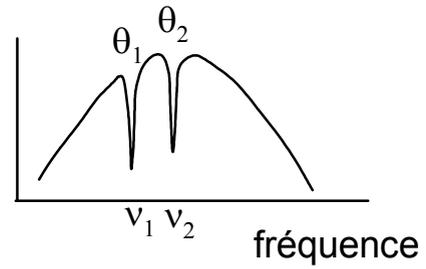
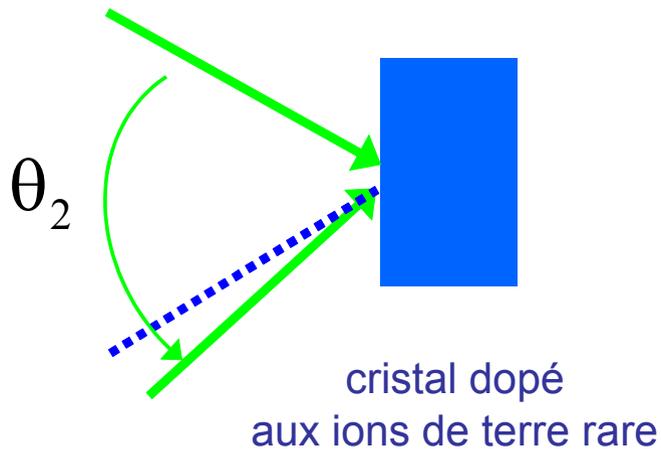
Principe de l'analyseur spectral

1^{ère} étape: programmation du cristal



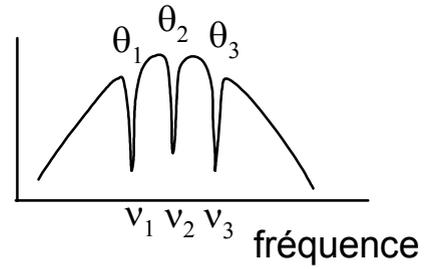
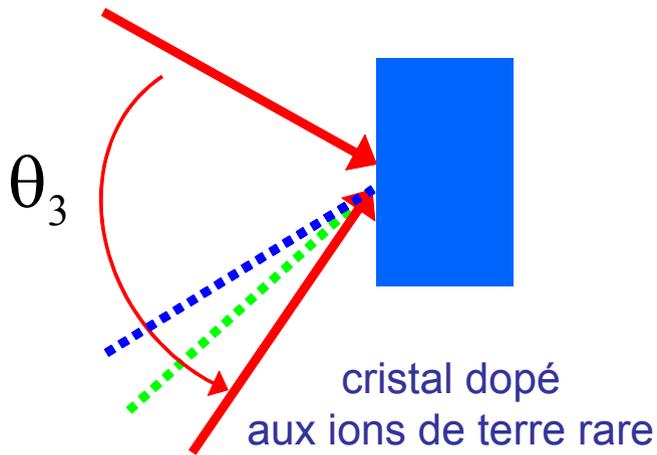
Principe de l'analyseur spectral

1^{ère} étape: programmation du cristal



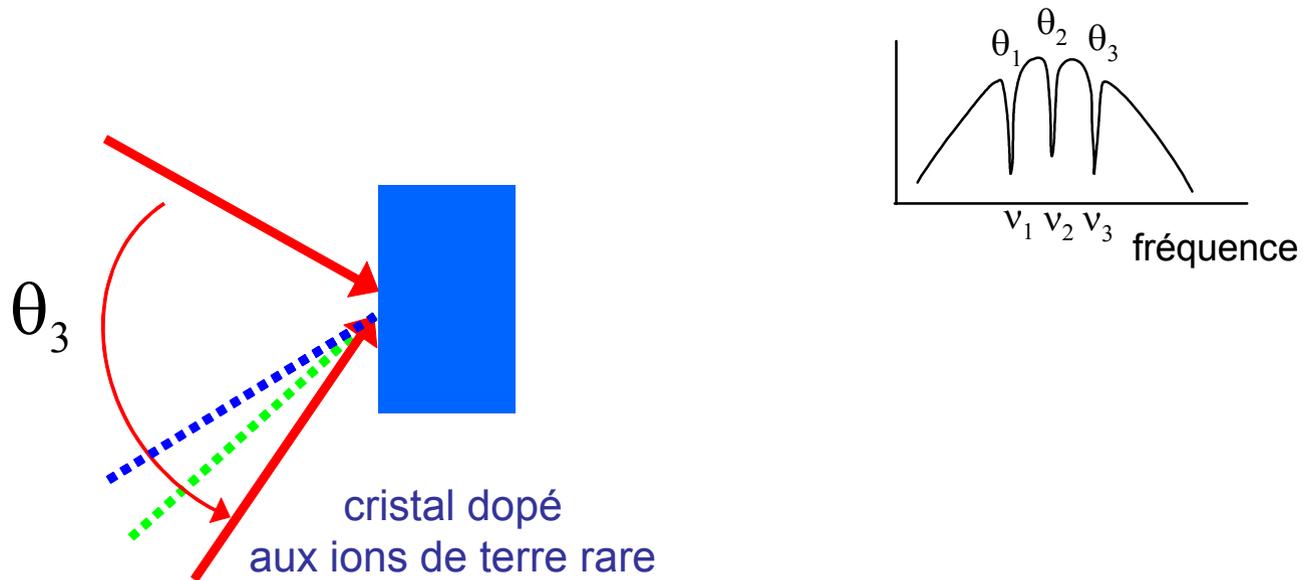
Principe de l'analyseur spectral

1^{ère} étape: programmation du cristal



Principe de l'analyseur spectral

1^{ère} étape: programmation du cristal

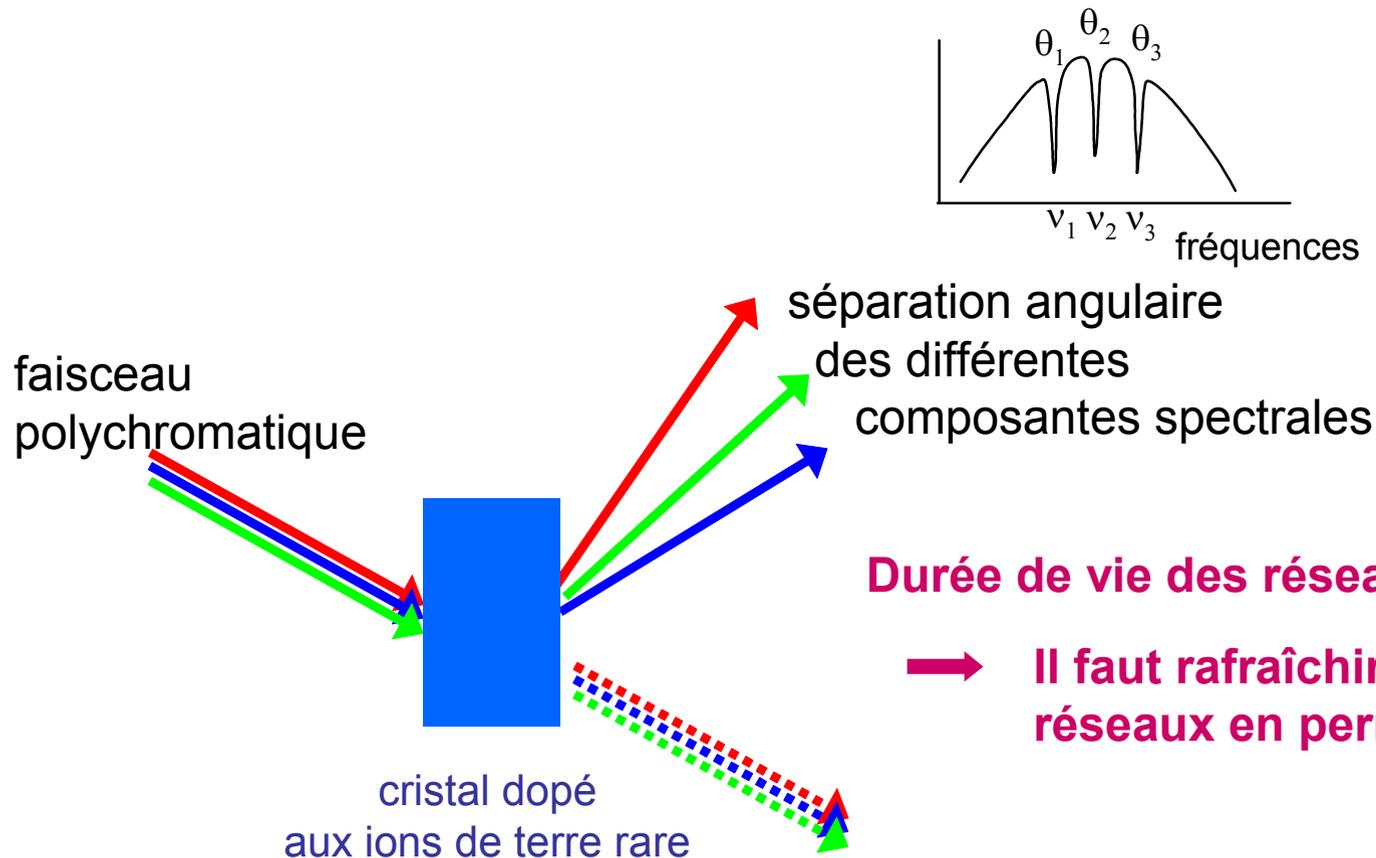


➤ enregistrement d'une fonction d'analyse

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

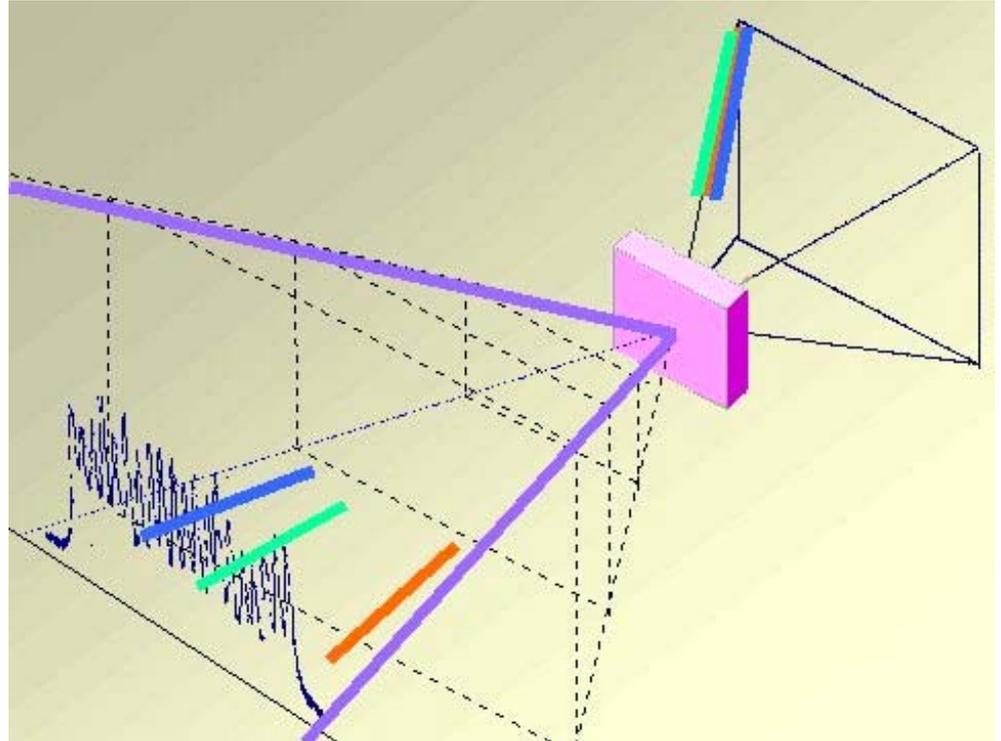
Principe de l'analyseur spectral

2^{ème} étape: lecture du réseau pour l'analyse spectrale

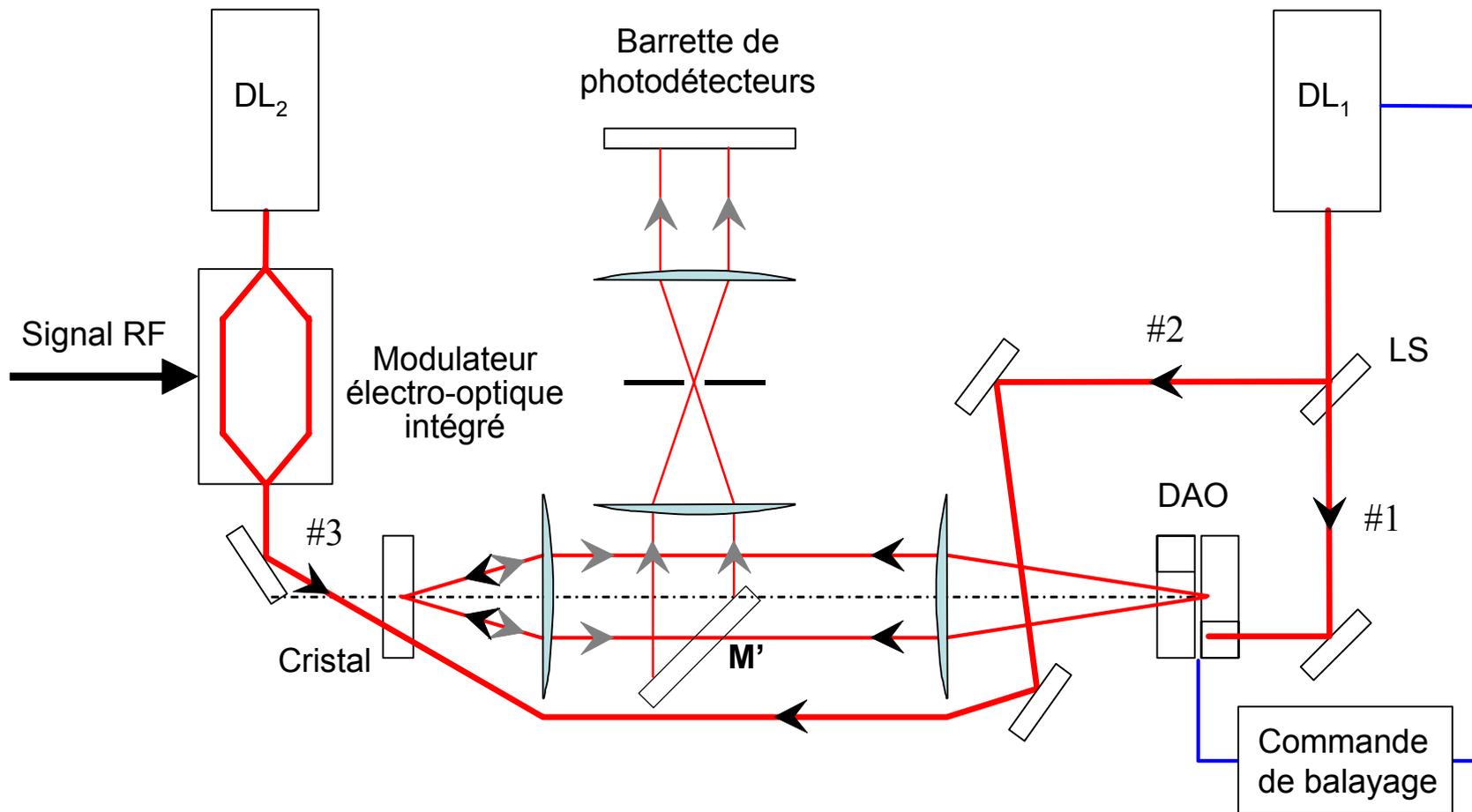


Configuration des faisceaux

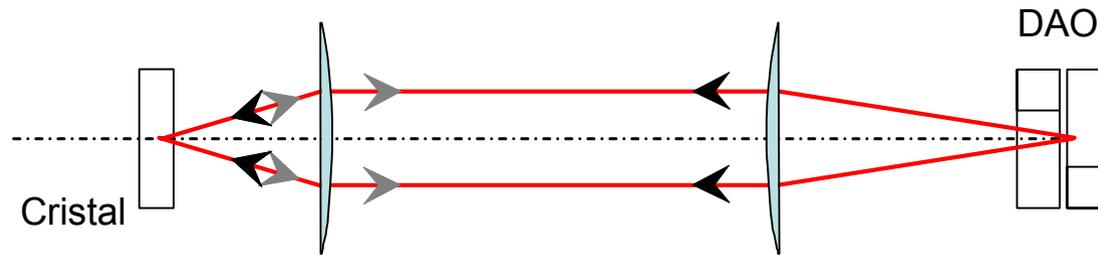
- Géométrie non coplanaire et contre propagative
- Simultanément: rafraîchissement des réseaux et analyse du signal
- Cadence de rafraîchissement $> 1\text{kHz}$
- Taux de chirp $> 10\text{GHz/ms}$



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

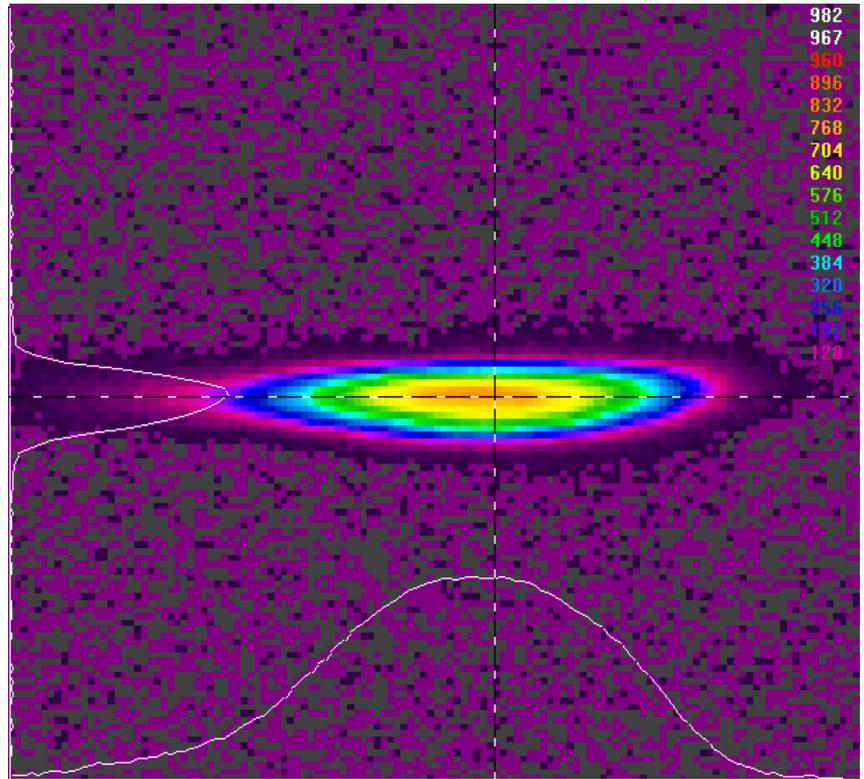
Conserver l'étendue du faisceau pour conserver le nombre de canaux

Ouverture angulaire des optiques limitée



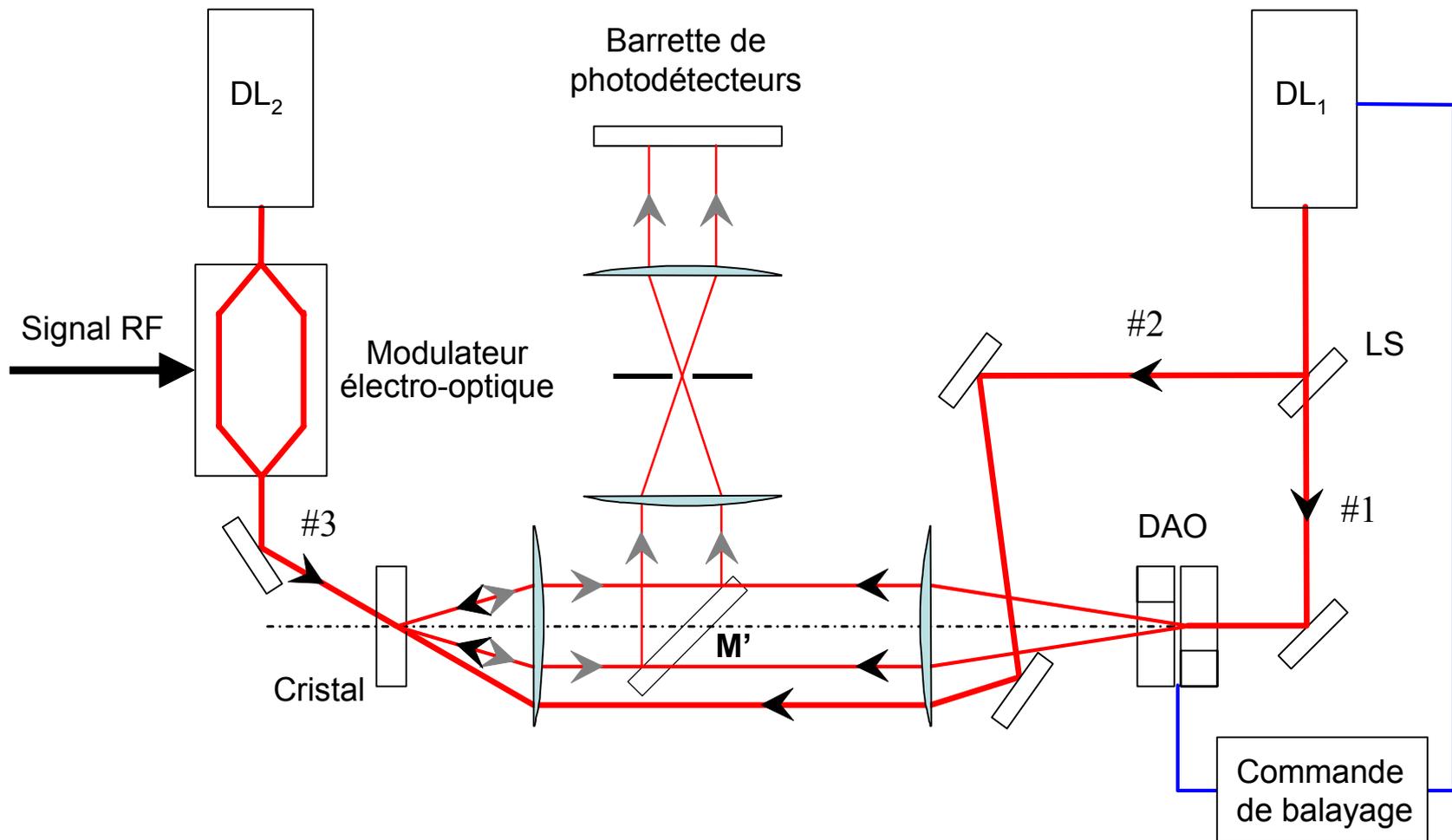
Tache elliptique

140 μm \updownarrow

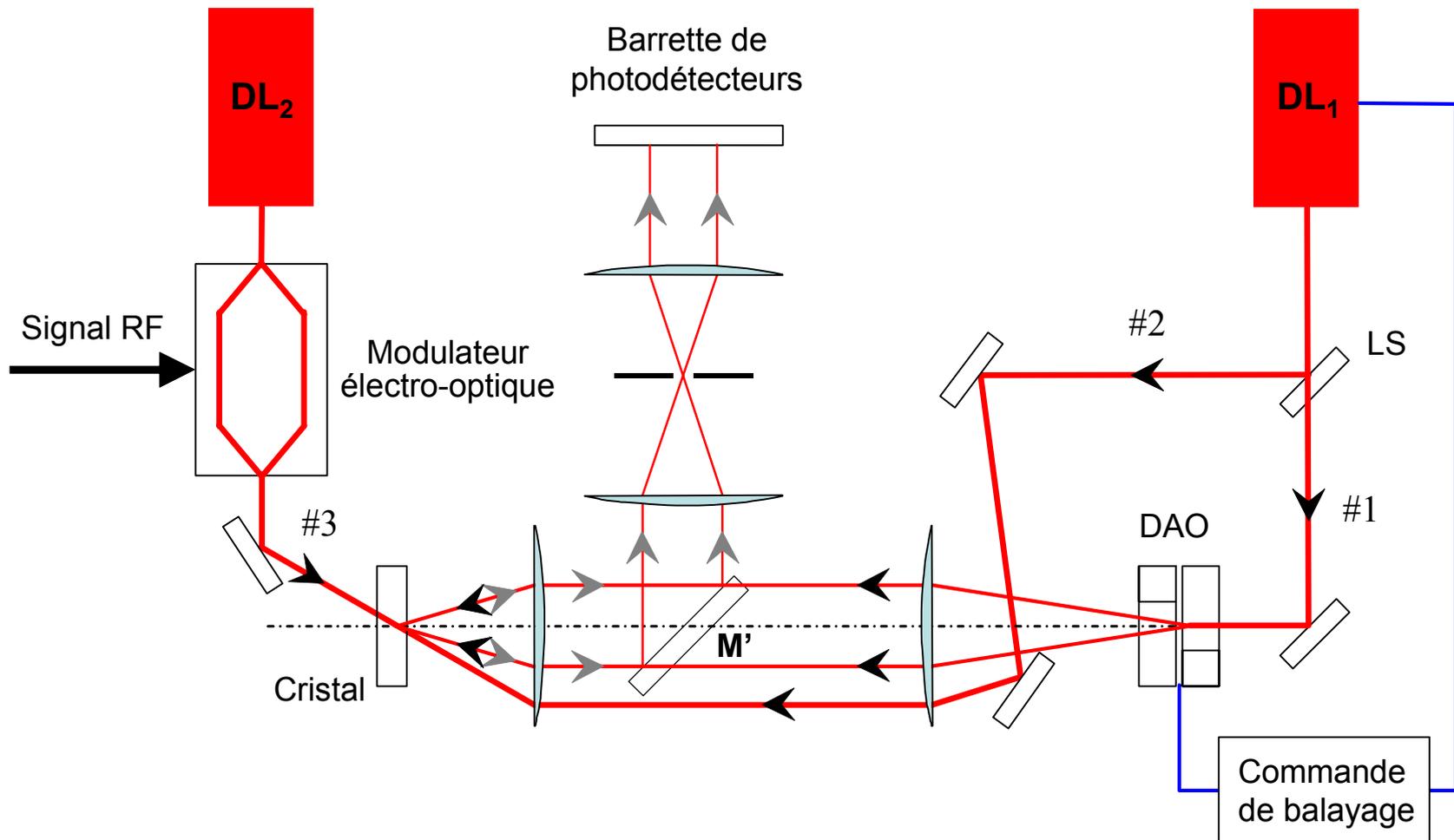


800 μm

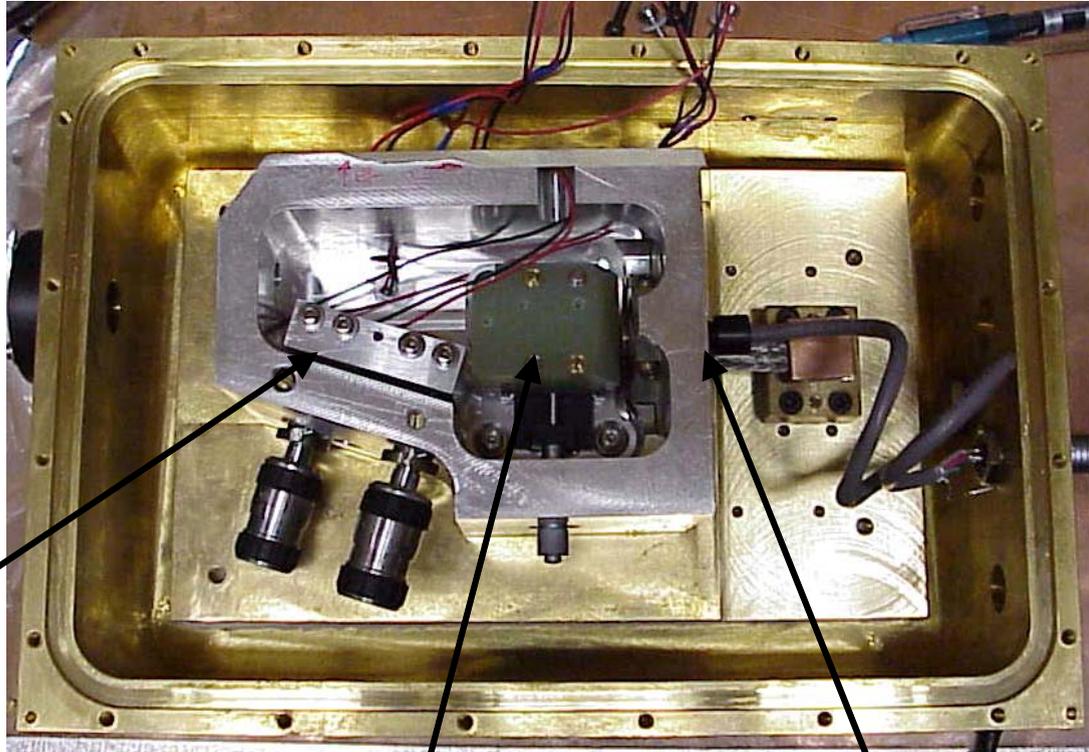
Architecture optique



Architecture optique



Laser agile en fréquence

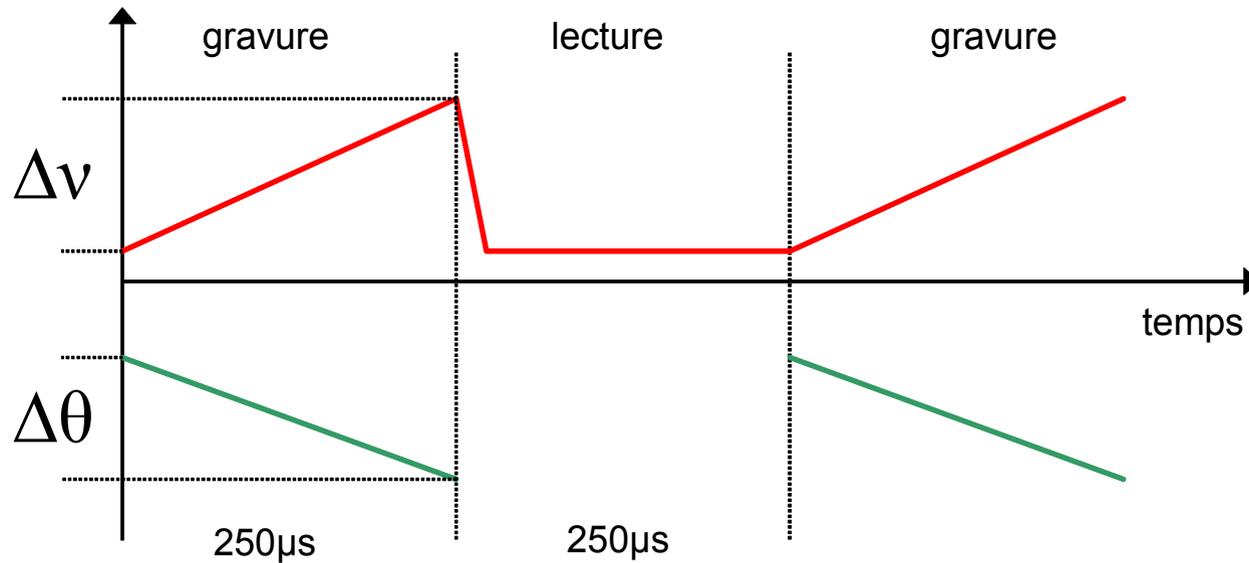


Réseau de diffraction

Prisme
électro-optique

Diode laser

Chronogramme d'une expérience à un seul laser



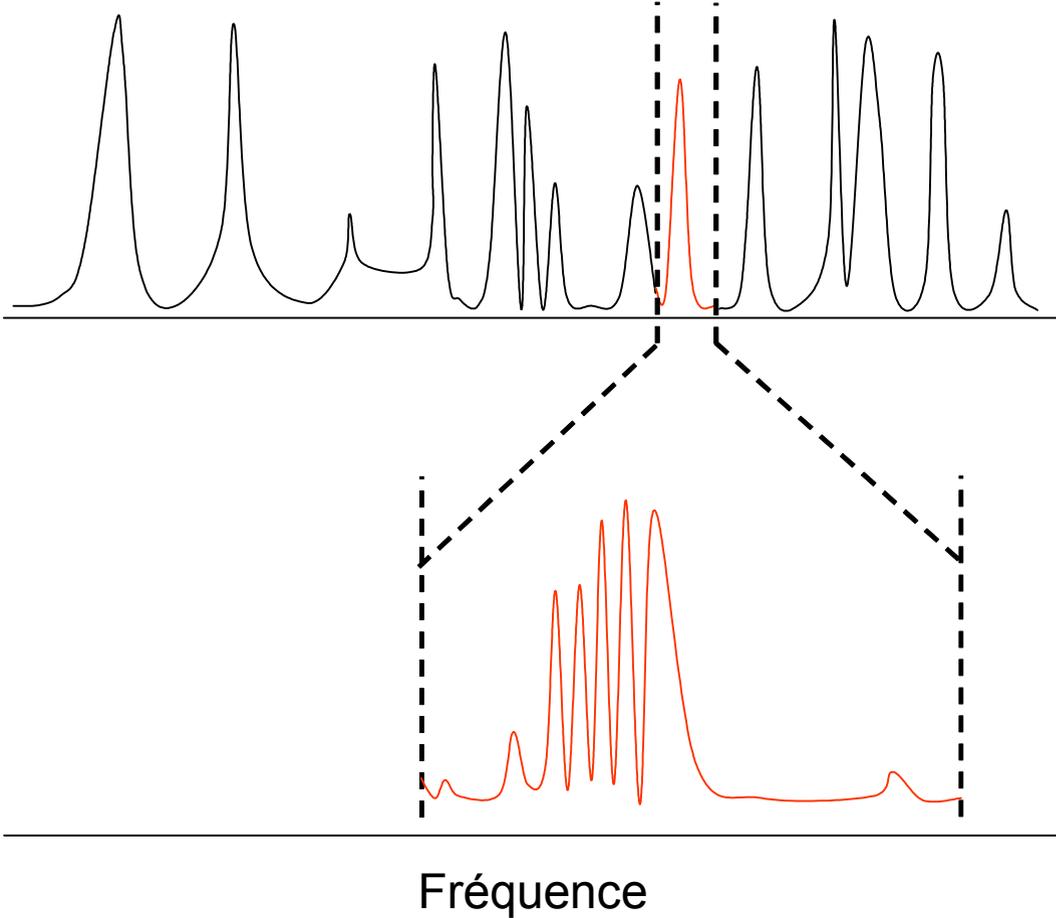
Loi de dispersion $\frac{\Delta\theta}{\Delta\nu}$ arbitraire

Les résultats expérimentaux

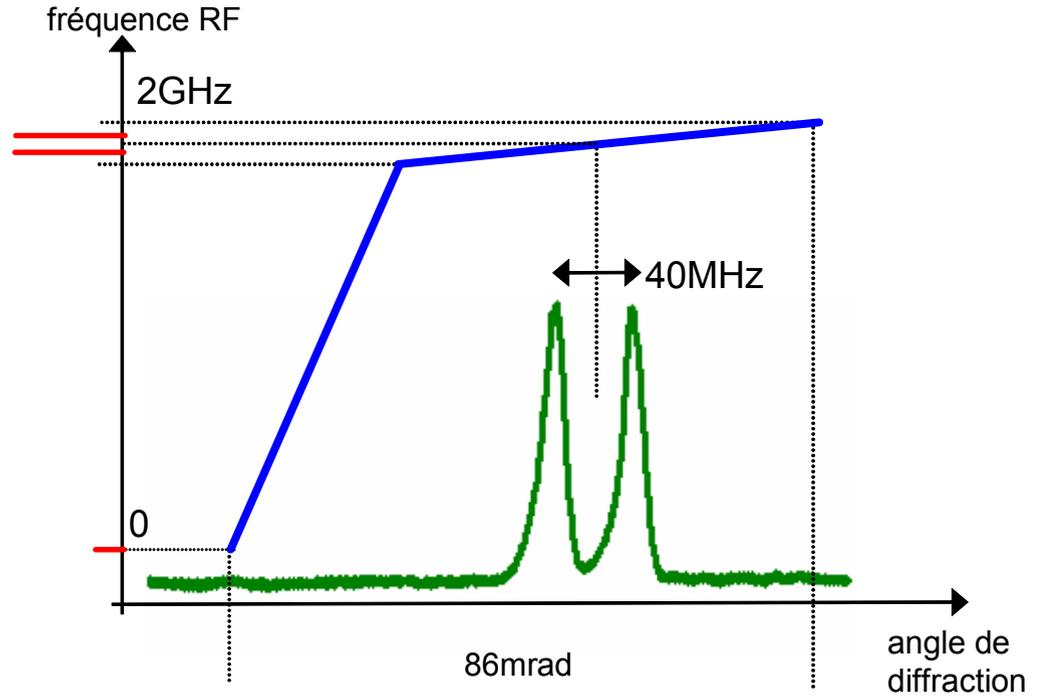
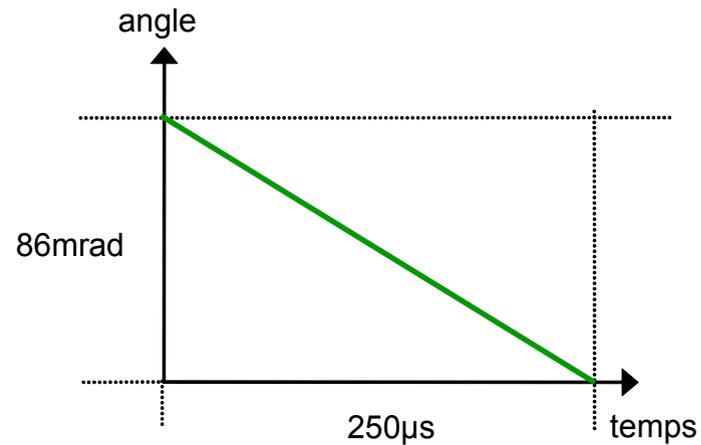
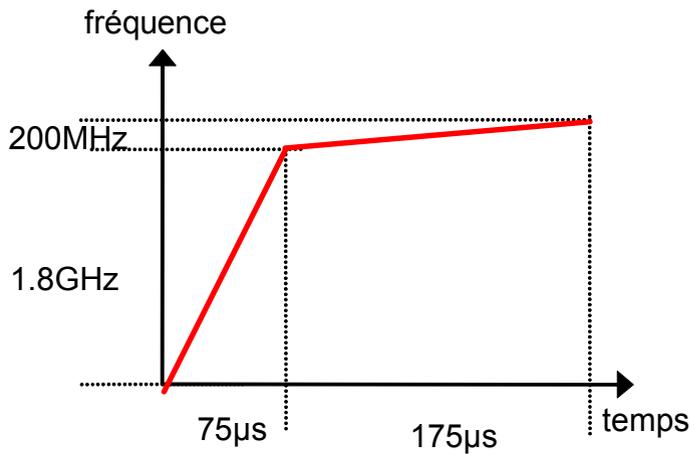
- **Couverture large bande et effet de zoom**
- **Bande passante et nombre de canaux**
- **Dynamique du système**



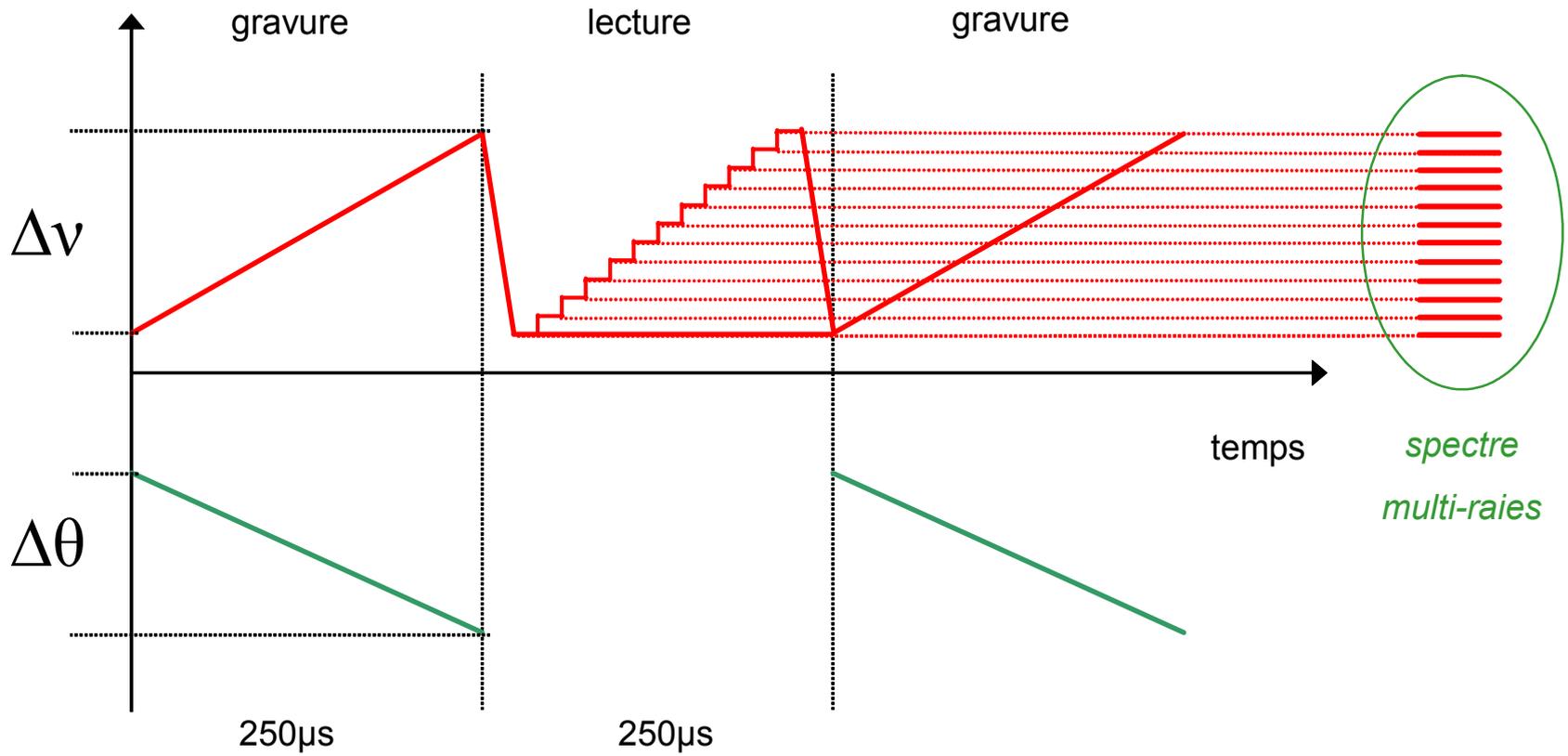
Couverture large bande et effet de zoom



Couverture large bande et effet de zoom



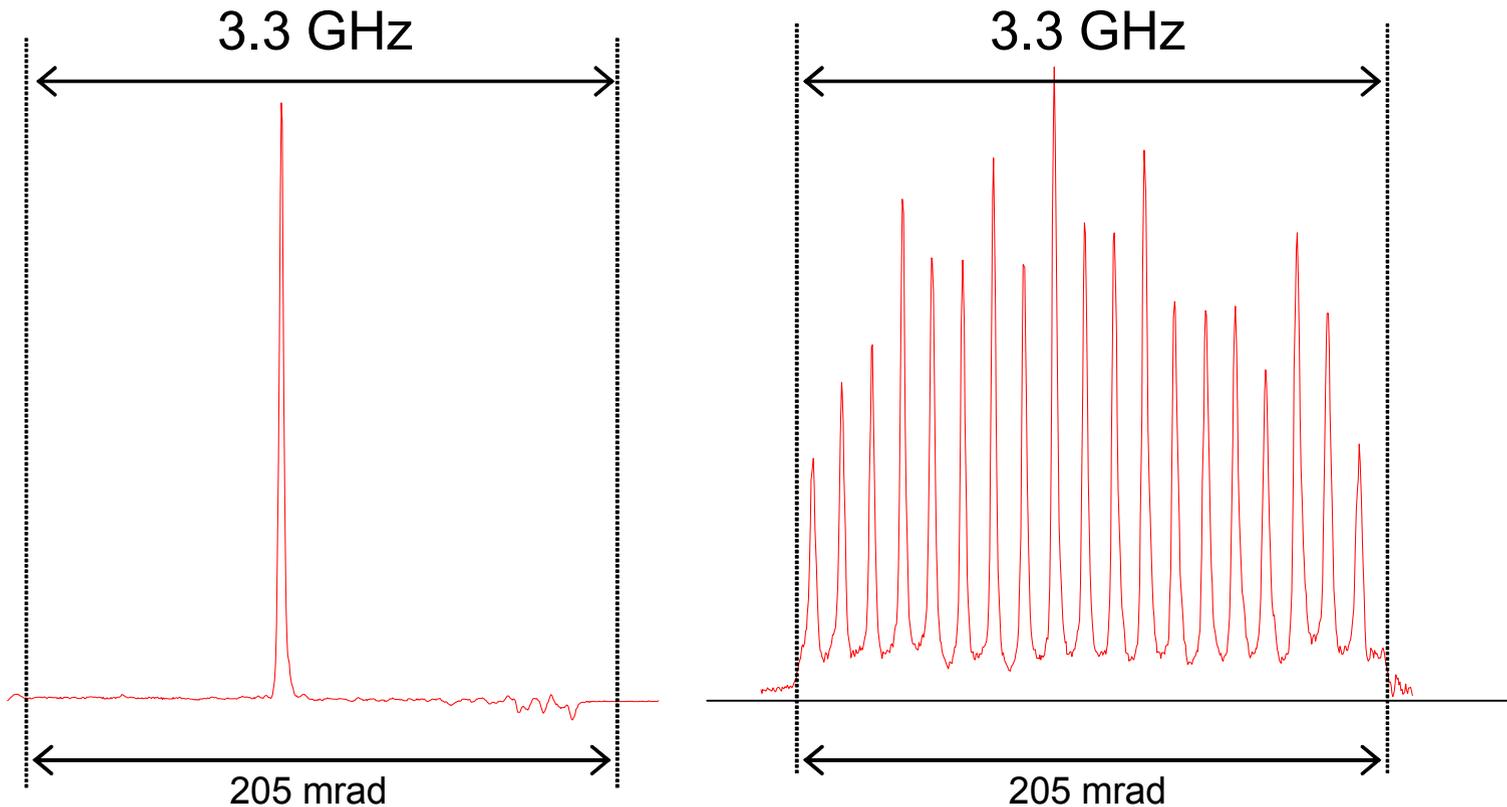
Analyse d'un signal multi-raies



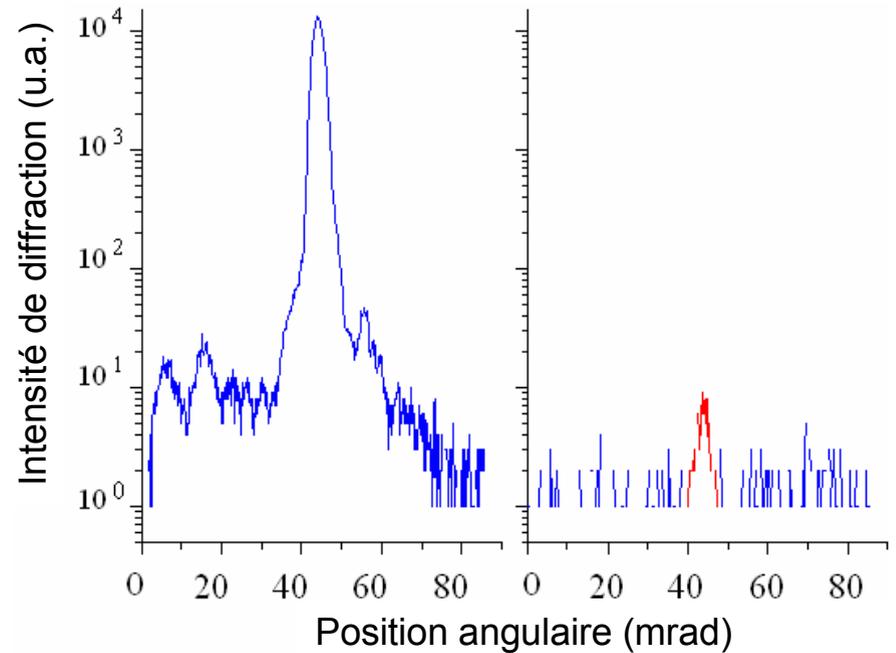
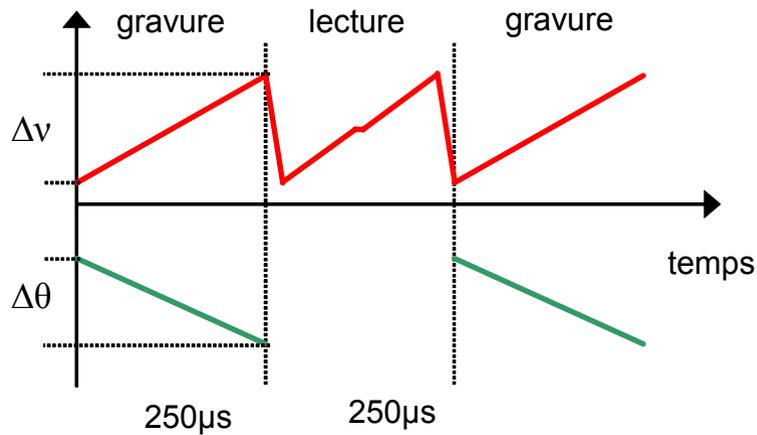
Derniers résultats obtenus

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
Bande passante	1,2 GHz	700 MHz	3,6 GHz	205 MHz	1 GHz	3,3 GHz
Nombre de canaux	25	100	128	4096	2000	102
Dynamique	60 dB	48 dB	38 dB	40 dB	30 dB	33 dB
Flexibilité spectrale	NON	OUI	NON	NON	NON	OUI+
Résolution ultime		140 kHz				500 kHz
Temps d'accès	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 :

