



Capteurs inertiels atomiques de très haute précision

Franck Pereira dos Santos

SYRTE

Workshop «Atomes Froids et Applications Embarquées»

Toulouse, 09/12/2015

<https://syрте.obsmp.fr/spip/science/iaci/>

- 1. Motivations, Applications**
2. Principe de l'interférométrie atomique et des capteurs inertiels à atomes froids
3. Quelques expériences d'interférométrie atomique au SYRTE et ailleurs
4. Nouvelles géométries et Perspectives

Senseur inertielle = capteur mesurant les accélérations ou les rotations d'un objet

Navigation inertielle

- accéléromètres et gyromètres embarqués

→ avions, satellites, sous-marins, ...



biais $\sim 10^{-5} \text{ m.s}^{-2}$



dérive en position
 $\sim 100 \text{ m}$ après une
heure de vol

Navigation inertielle

- accéléromètres et gyromètres embarqués
- avions, satellites, sous-marins, ...



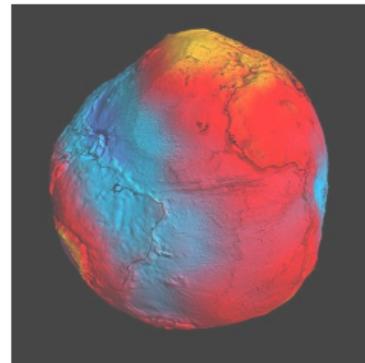
biais $\sim 10^{-5} \text{ m.s}^{-2}$



dérive en position
 $\sim 100 \text{ m}$ après une
heure de vol

Géophysique

- étude du sous-sol (hydrocarbures)
- campagnes de prospection aéroportées
- précision $\sim 1 \mu\text{g}$
- détermination du géoïde (océanographie)



ESA/GOCE, 2011
sensibilité: $10^{-12} \text{ m.s}^{-2}$

Navigation inertielle

- accéléromètres et gyromètres embarqués
- avions, satellites, sous-marins, ...



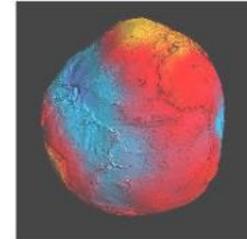
biais $\sim 10^{-5} \text{ m.s}^{-2}$



dérive en position
 $\sim 100 \text{ m}$ après une
heure de vol

Géophysique

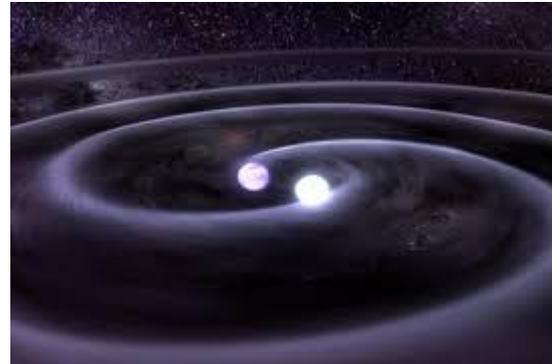
- campagnes de prospection aéroportées
- détermination du géoïde (océanographie)



ESA/GOCE, 2011
sensibilité: $10^{-12} \text{ m.s}^{-2}$

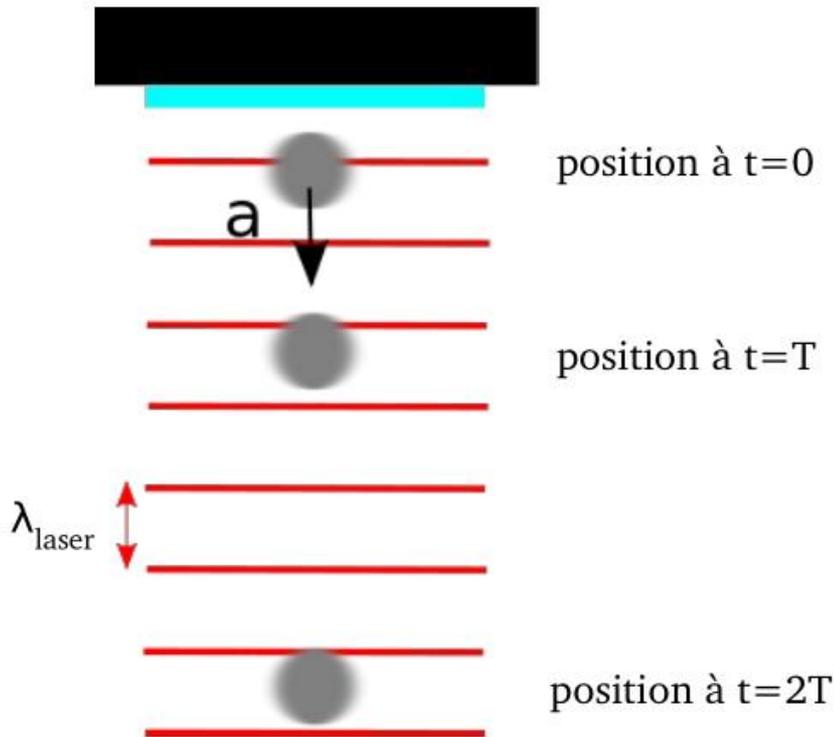
Physique fondamentale

- test du principe d'équivalence
- mesure de G
- détection d'ondes gravitationnelles



Mesure d'élongation
relative $h \sim 10^{-22}$
(à 10 Hz par exemple)

Utiliser un atome en chute libre pour lire la phase d'un laser lié au référentiel accéléré
→ mesure de la distance parcourue en unité de la longueur d'onde



$$\text{nombre de graduations} \sim \frac{aT^2}{\lambda_{\text{laser}}}$$

$$\text{nombre de graduations} \sim \frac{aT^2}{\lambda_{\text{laser}}}$$

- règle laser de pas $\lambda_{\text{laser}} \sim 0.5 \mu\text{m}$

- plus petite distance mesurable: $\lambda_{\text{laser}} / 100$ (rapport signal à bruit = 100)

- temps d'interrogation $2T \sim 20 \text{ ms}$

→ sensibilité aux accélérations $\sim 10^{-5} \text{ m.s}^{-2}$

meilleurs accéléromètres aéroportés

- temps d'interrogation $2T \sim 10 \text{ s (espace)}$

→ sensibilité aux accélérations $\sim 10^{-11} \text{ m.s}^{-2}$

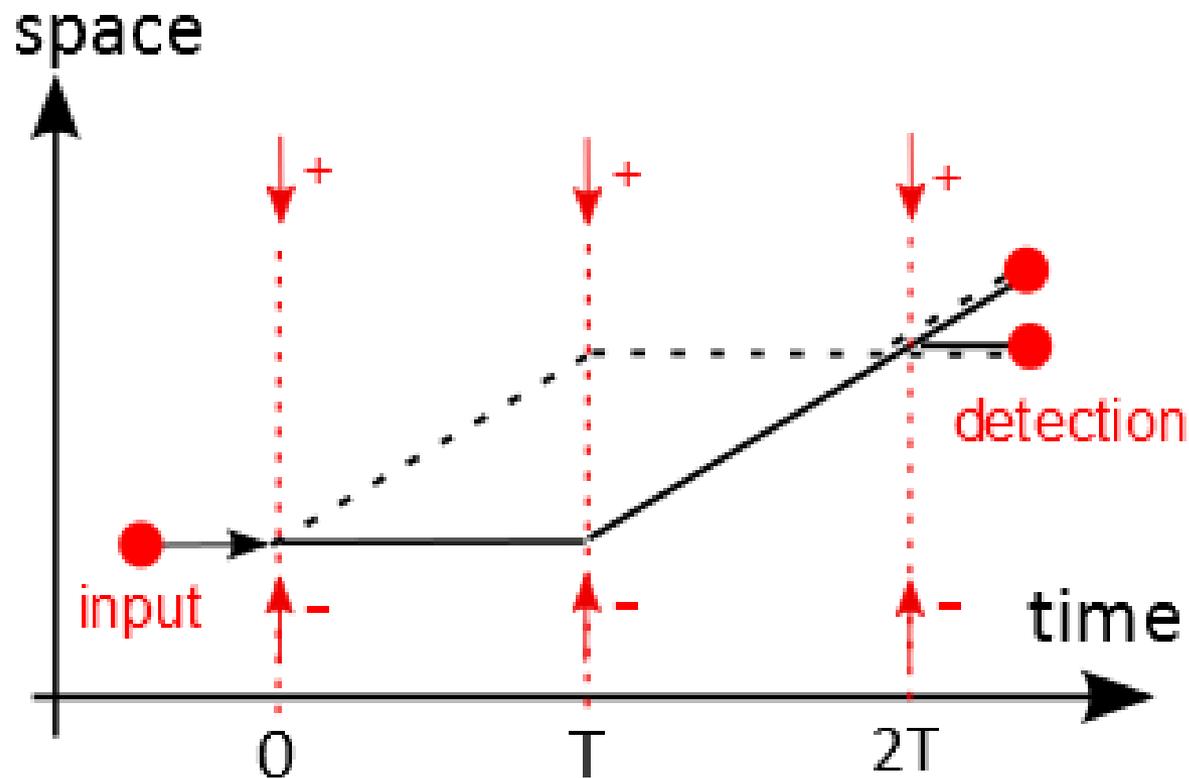
tests des lois de la gravitation

**Deux applications intéressantes des
interféromètres atomiques**

1. Motivations, Applications
- 2. Principe de l'interférométrie atomique et des capteurs
inertiels à atomes froids**
3. Quelques expériences d'interférométrie atomique au
SYRTE et ailleurs
4. Nouvelles géométries et Perspectives

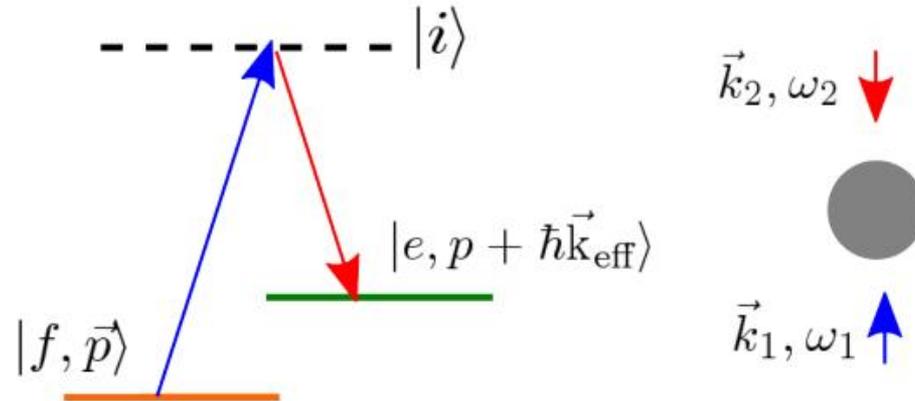
Principe de l'interféromètre atomique

- Analogie avec un interféromètre optique
- Utilisation de l'interaction laser-atome pour défléchir les ondes de matière



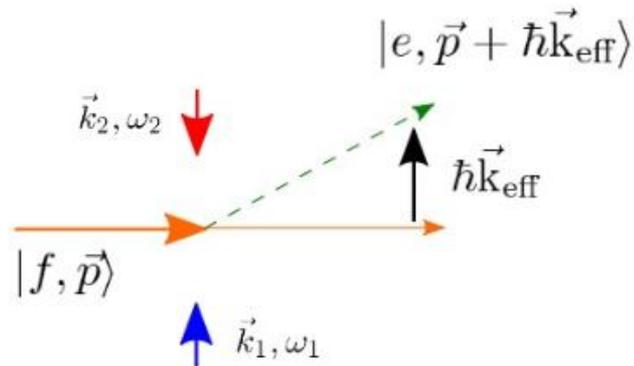
Transitions Raman stimulées

Atome à trois niveaux en interaction avec deux lasers contra-propageants



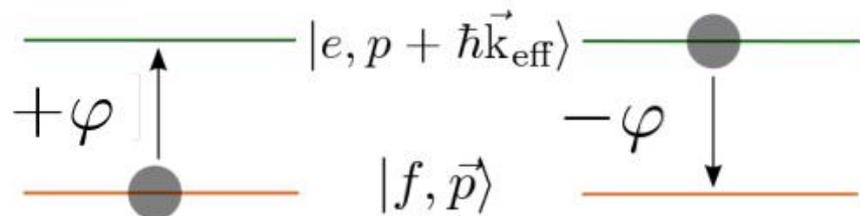
Transfert d'impulsion (~ 1 cm/s)

$$k_{\text{eff}} = k_1 + k_2$$



Impression de la différence de phase des lasers:

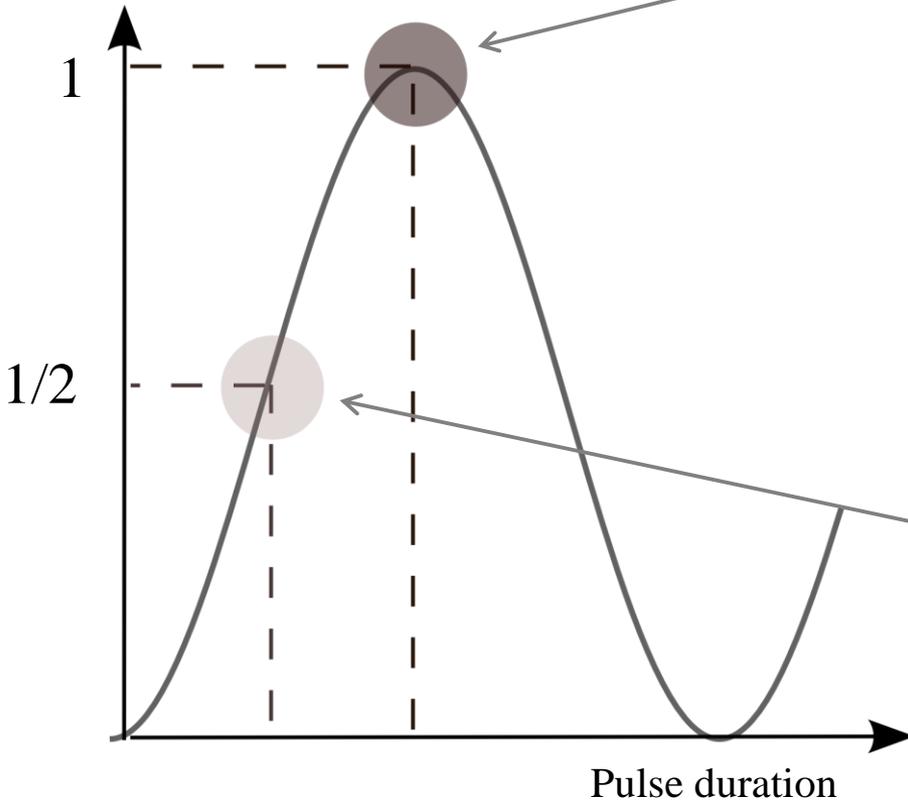
$$\varphi = \phi_1 - \phi_2 = \vec{k}_{\text{eff}} \cdot \vec{r}(t)$$



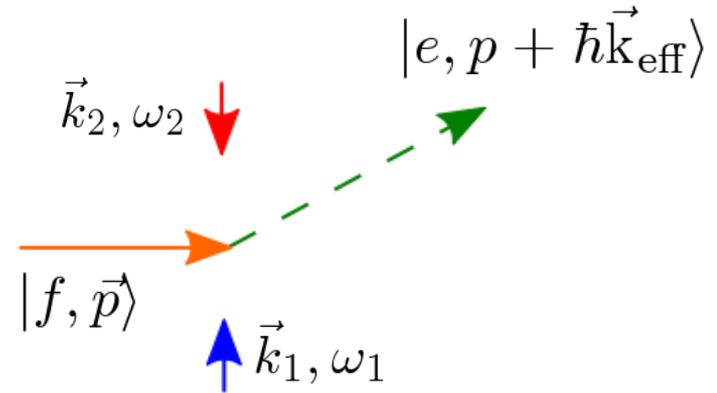
Oscillations de Rabi

Rabi oscillation between $|f\rangle$ and $|e\rangle$

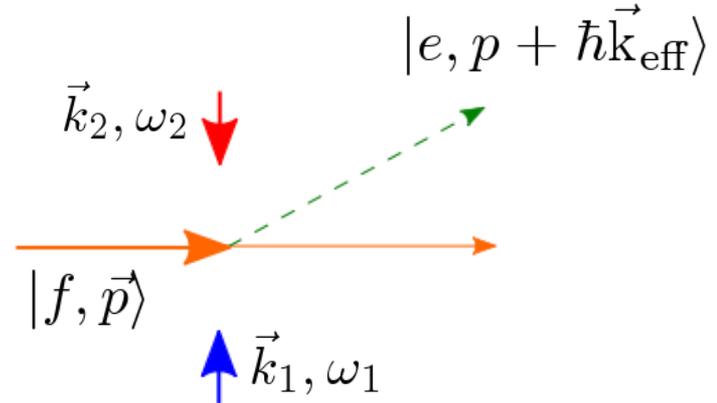
Transition Probability $f \rightarrow e$



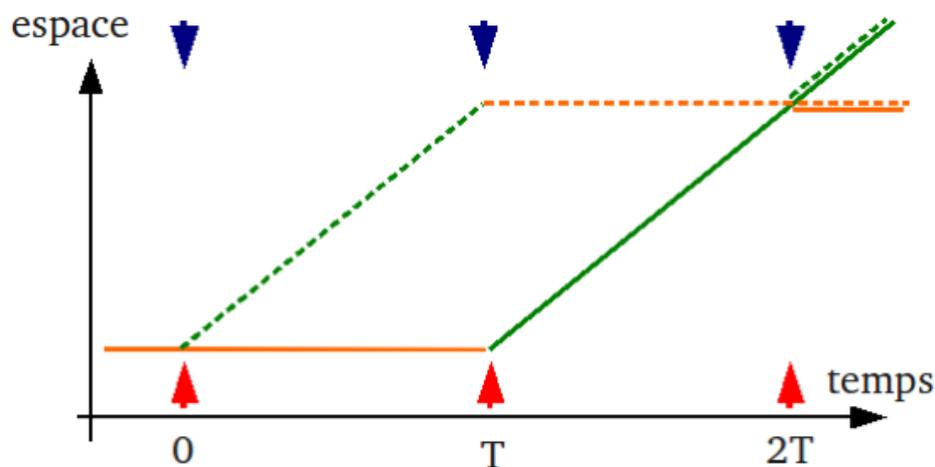
“ π ” pulse = mirror



“ $\pi/2$ ” pulse = beam splitter



Différence de phase entre les 2 ondes



$$\Phi^{\text{haut}} = \varphi(0) - \varphi(T) + \varphi(2T)$$

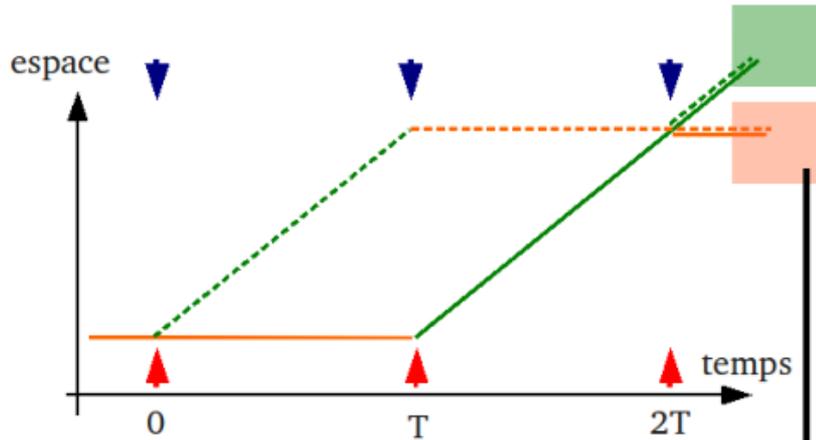
$$\Phi^{\text{bas}} = 0 + \varphi(T) + 0$$

→
accélération
constante

$$\Delta\Phi = \vec{k}_{\text{eff}} \cdot \vec{a}T^2$$

Échantillonnage de la position classique de l'atome à trois instants successifs

Mesure de la différence de phase

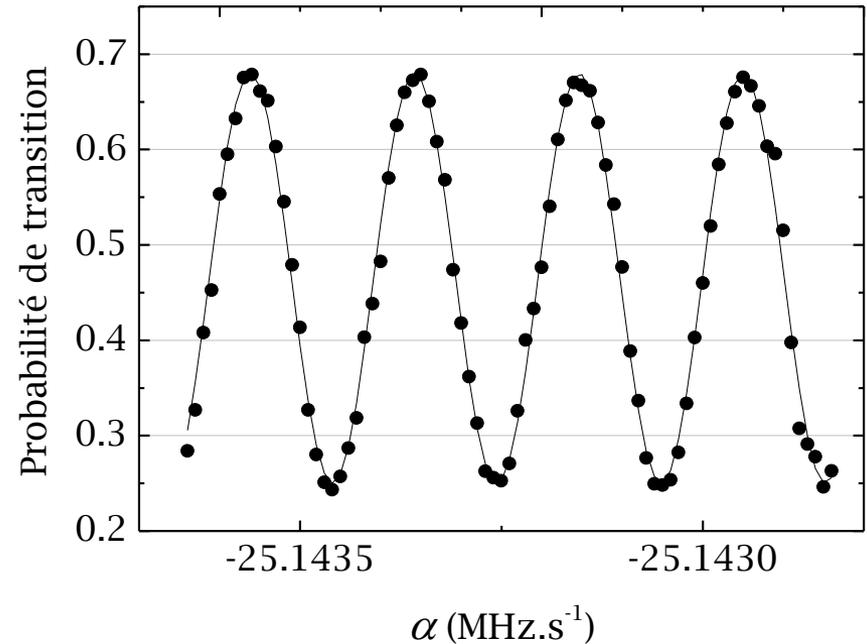


Détection normalisée des deux populations d'atomes par fluorescence

$$\Delta\Phi = \vec{k}_{\text{eff}} \cdot \vec{a}T^2$$

Signal en sortie de l'interféromètre:

$$P = P_0 - A \cos \Delta\Phi$$



Pourquoi des atomes froids ?

Contraste de l'interféromètre limité par:

- étalement transverse du nuage dans le faisceau Raman durant l'interrogation
- sélectivité en vitesse des transitions Raman (effet Doppler)

$$2T \sim 20 \text{ ms} - 0.5 \text{ s}$$

atomes froids

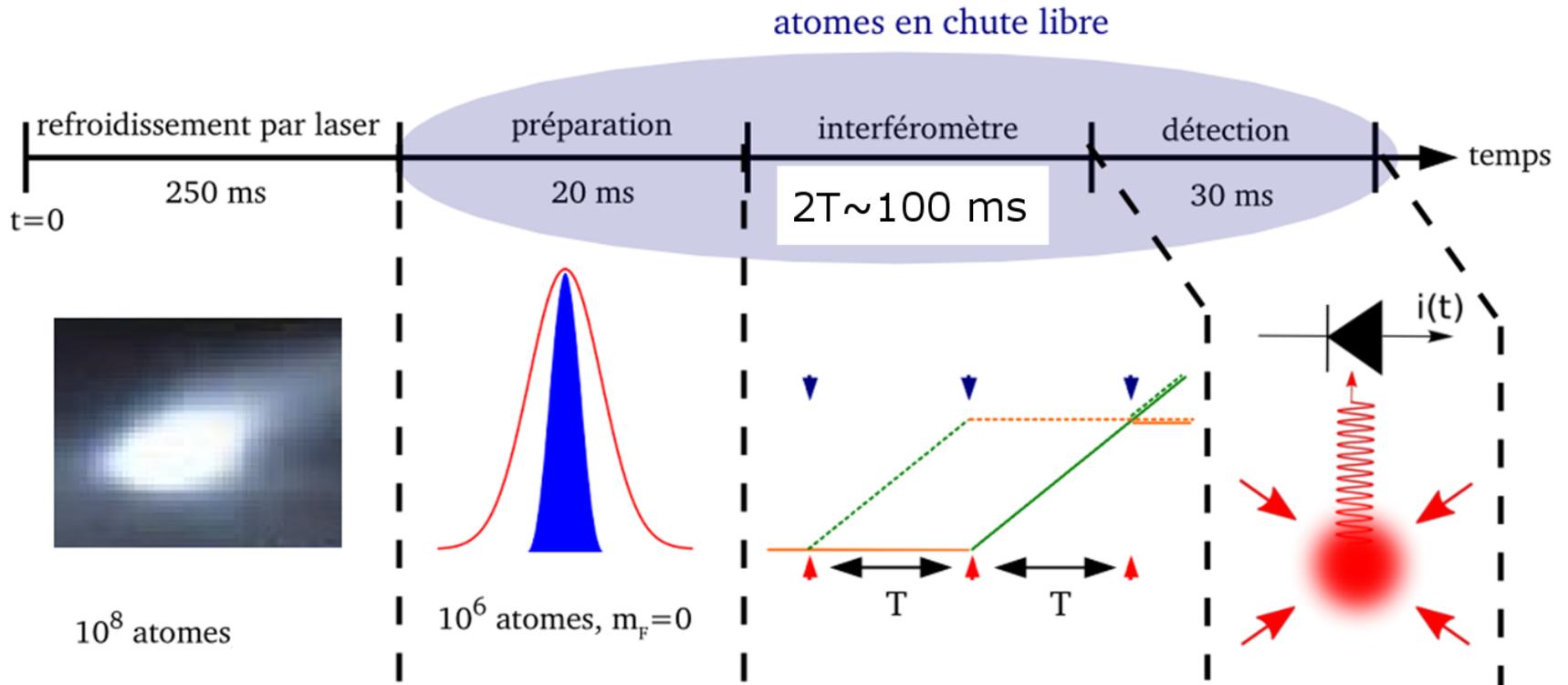
$$v_{\text{at}} \sim 1 \text{ cm/s (température } \sim \mu\text{K)}$$

$$2T \sim 10 \text{ s}$$

atomes ultra-froids

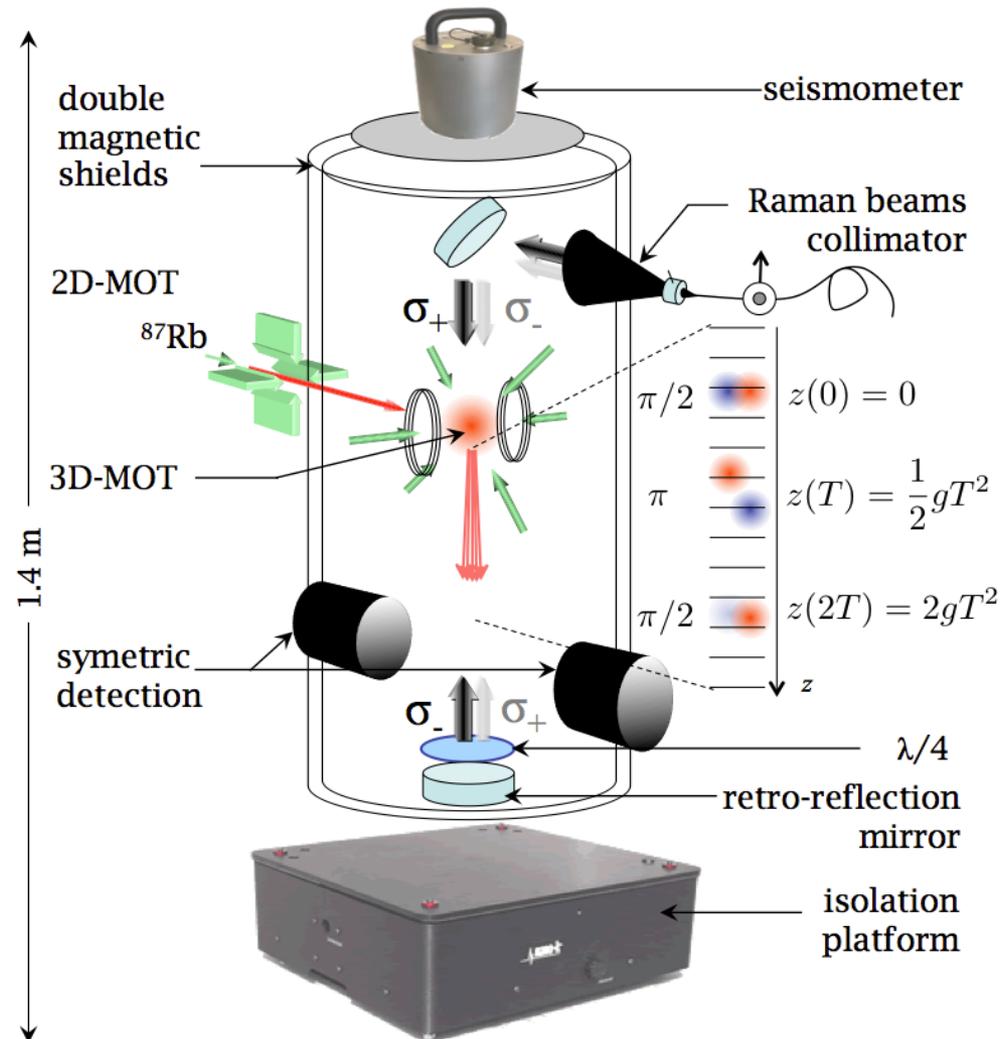
$$v_{\text{at}} \sim 1 \text{ mm/s (température } \sim 10 \text{ nK)}$$

Séquence expérimentale type

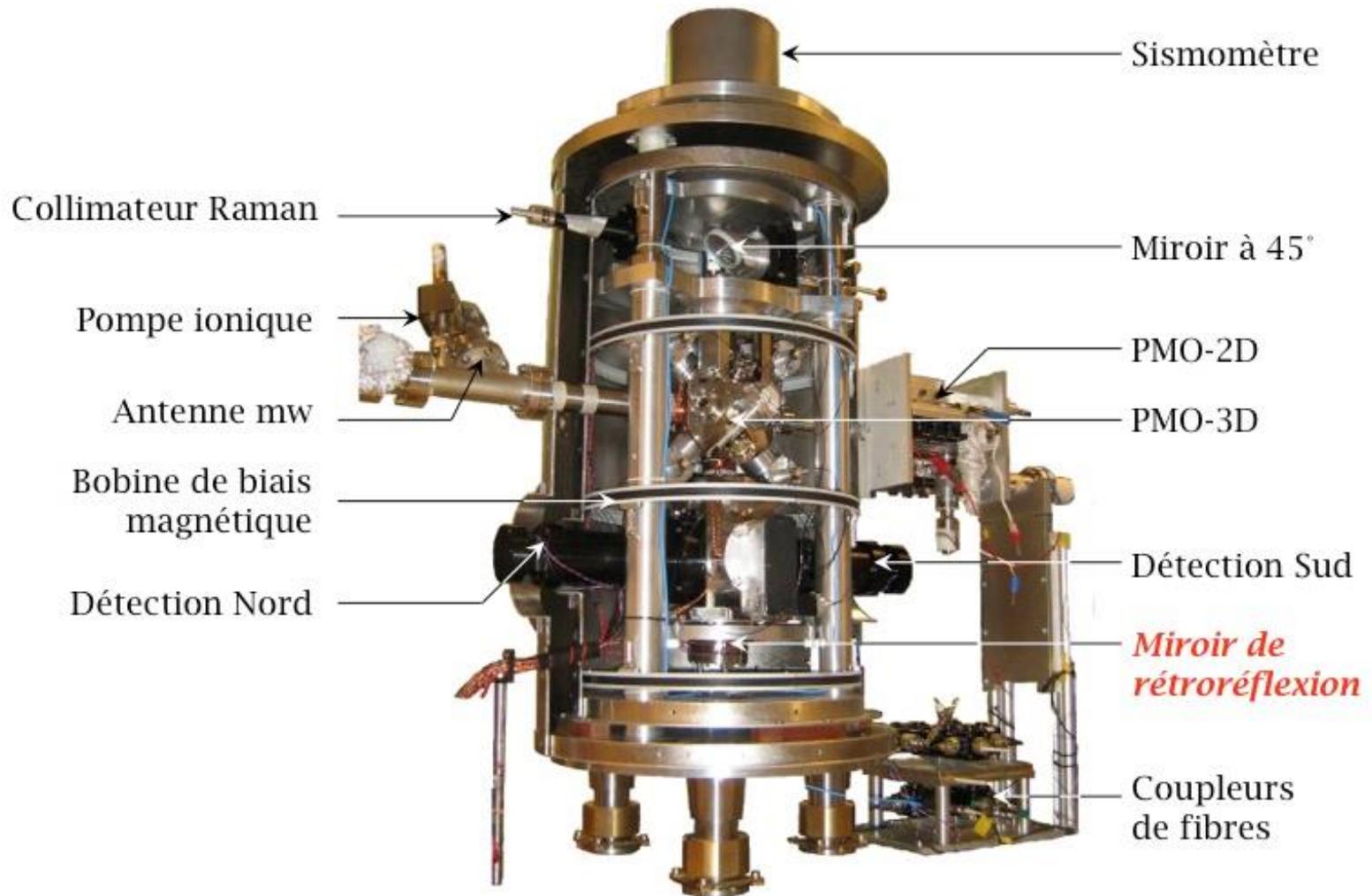


1. Motivations, Applications
2. Principe de l'interférométrie atomique et des capteurs inertiels à atomes froids
- 3. Quelques expériences d'interférométrie atomique au SYRTE et ailleurs**
4. Nouvelles géométries et Perspectives

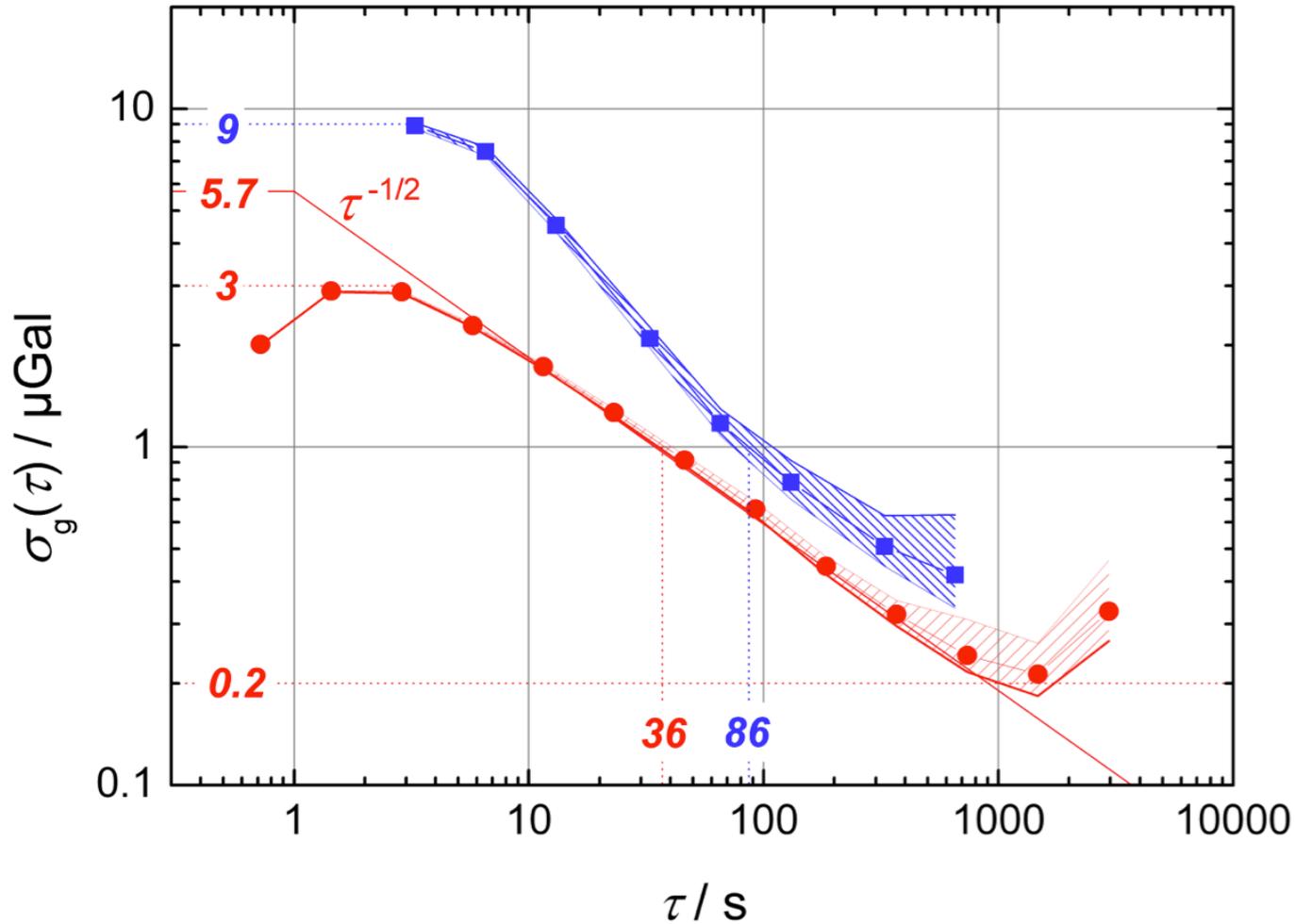
Gravimètre à atomes froids (2003 →)



Gravimètre à atomes froids (2003 →)



Notre record de sensibilité



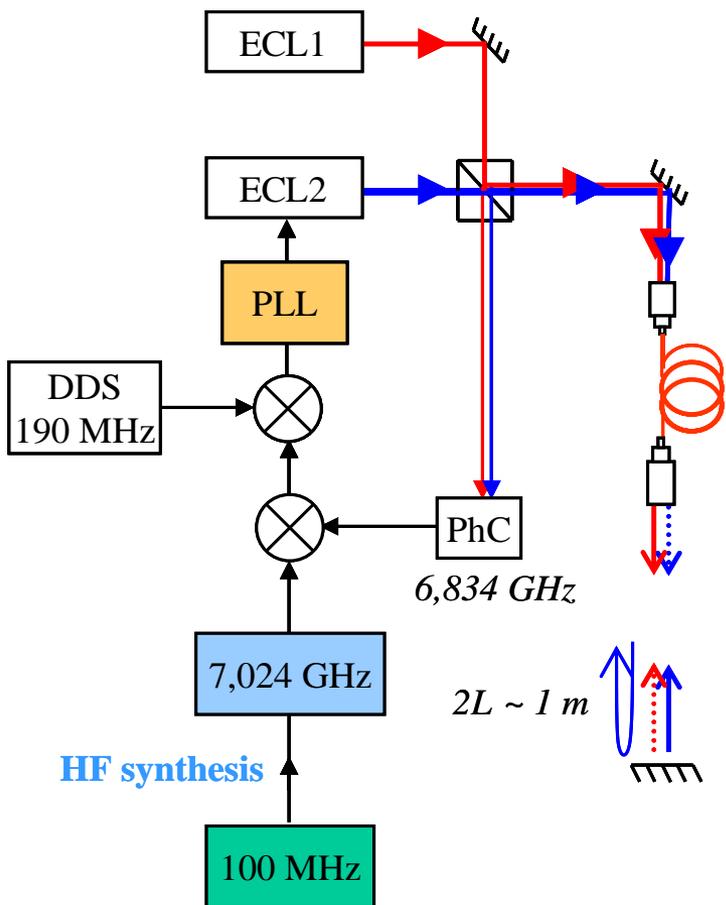
5.7 $\mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$
(1 Gal = 1cm/s²)

Unités SI :
5.7 10⁻⁸m/s²/Hz^{1/2}

En relatif /g
5.8 10⁻⁹g/Hz^{1/2}
5.8 ng/Hz^{1/2}

P. Gillot et al, Metrologia 51, L15-L17 (2014)

Limites de la sensibilité : lasers



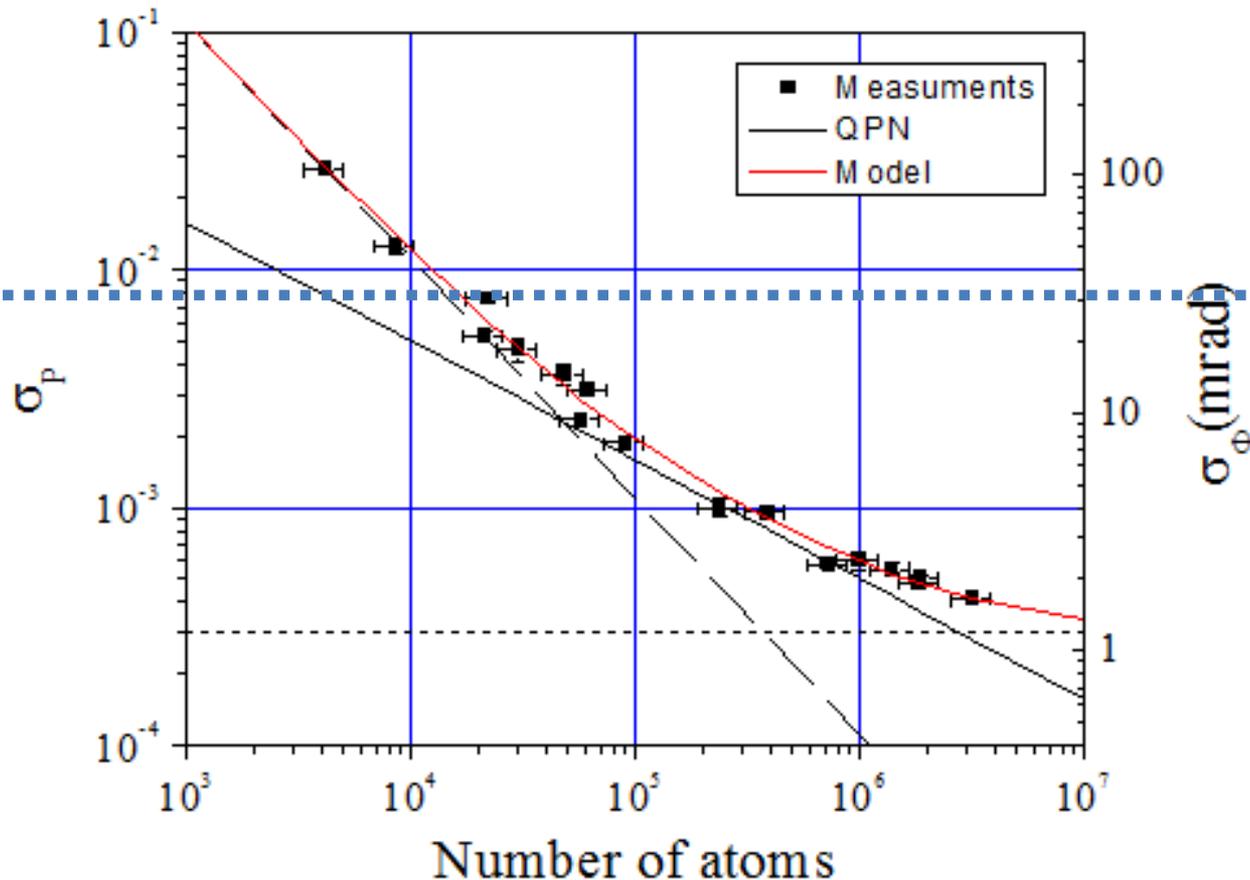
Source		σ_{Φ} (mrad/coup)	σ_g (g/Hz ^{1/2}) T=50 ms
L a s e r s	Référence 100 MHz	1,0	1,3·10 ⁻⁹
	Synthèse HF	0,7	0,9·10 ⁻⁹
	Résidu PLL	1,6	2,0·10 ⁻⁹
	Fibre optique	1,0	1,3·10 ⁻⁹
	Rétro-réflexion	2,0	2,6·10 ⁻⁹
	Total	3,1	3,9·10 ⁻⁹

Pour garantir ce niveau de bruit de phase, il faut:

- des oscillateurs RF/MW à l'état de l'art en terme de bruit de phase (ULN Quartz, DRO)
- des lasers fins spectralement, largeur de raie ~ qq kHz seulement, ECDL

Limites de la sensibilité : détection

- Etude du bruit de détection : préparation superposition $P = 1/2$ avec un pulse $\pi/2$ MW
- Mesure des fluctuations de P en fonction du nombre d'atomes
- En déduire la sensibilité de phase équivalente : $\sigma_\phi = 2\sigma_P/C$



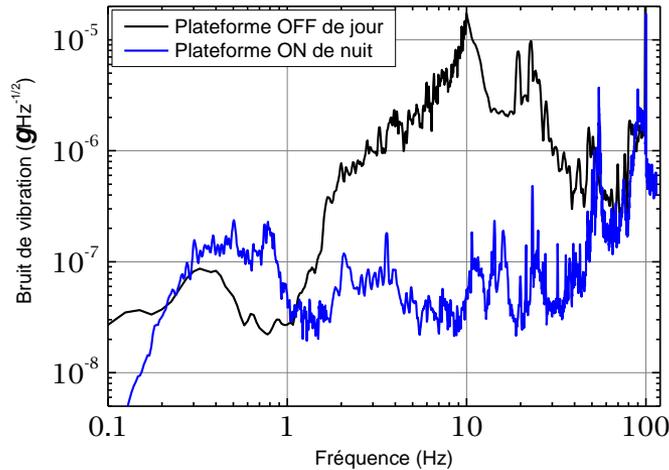
Paramètres typiques:

$$2T=160 \text{ ms}$$

$$C \sim 50\%$$

$$\sigma_\phi = 30 \text{ mrad/coup}$$

Bruit de vibration : utilisation d'une plateforme d'isolation (passive)



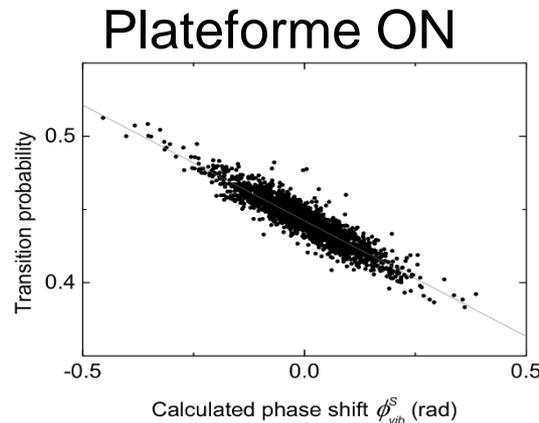
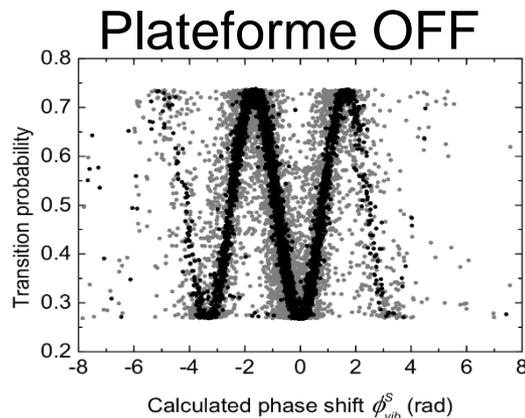
Sensibilité :

Sans Plateforme : $2,9 \cdot 10^{-6} g$ à 1s

Avec plateforme : $7,6 \cdot 10^{-8} g$ à 1s

Corrélation avec les vibrations du miroir (enregistrée par un sismomètre)

Déphasage induit par les vibrations $\phi_{vib}^S = k_{eff} \int_T^{-T} g_s(t)v_s(t)dt = k_{eff}K_s \int_T^{-T} g_s(t)U_s(t)dt$



Limites de la sensibilité : vibrations

Post-correction



Sismomètre

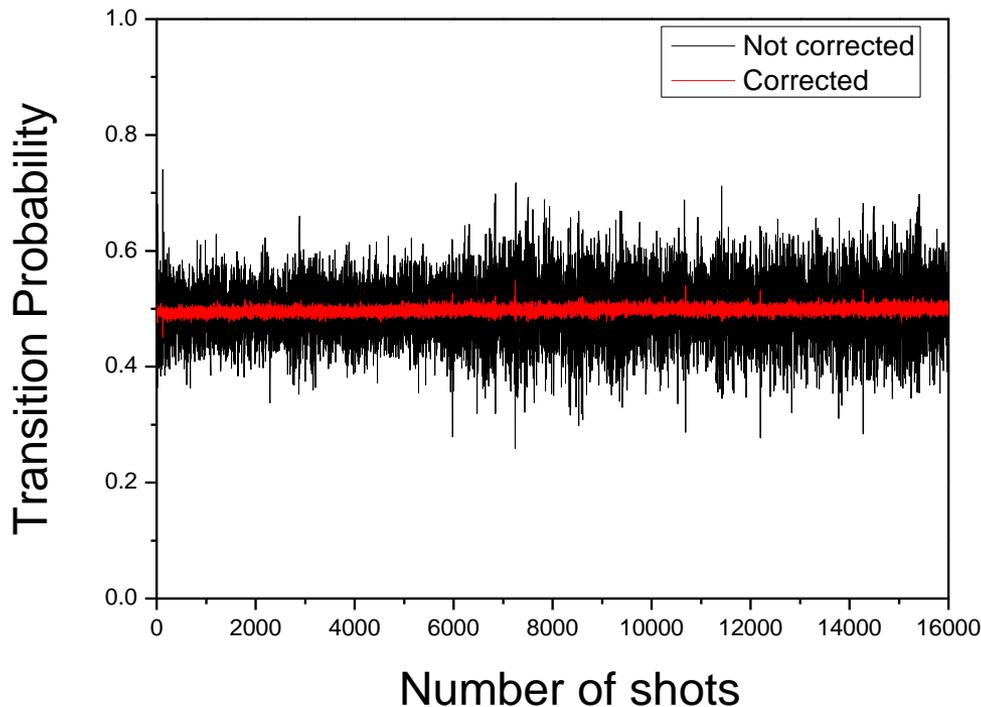
$$\mathbf{v}(t) \rightarrow \phi_{\text{vib}}^S$$

PC

$$\mathbf{k}_{\text{eff}}\mathbf{g}\mathbf{T}^2$$

Interféromètre

$$\mathbf{k}_{\text{eff}}\mathbf{g}\mathbf{T}^2 + \phi_{\text{vib}}^S$$



Efficacité de réjection :

- jusqu'à 100 (sans isolation)
- 2 à 10 (avec isolation)

Sensibilité typique

(dans un environnement urbain)

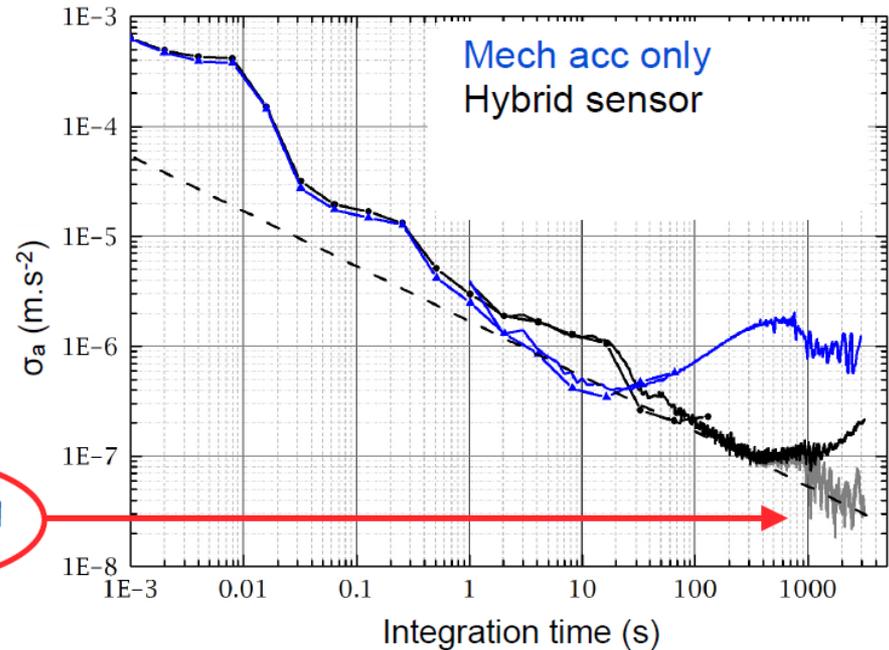
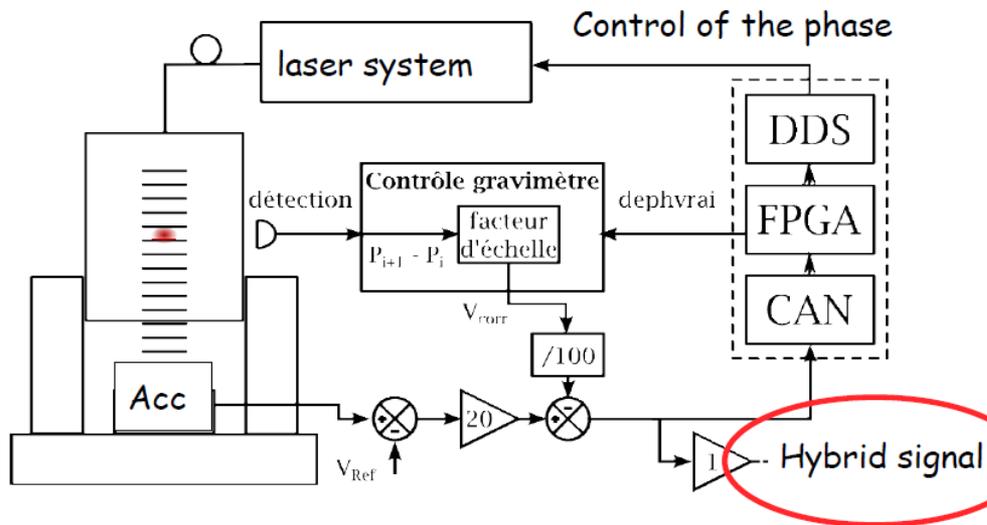
$$\sigma_g(1s) = 10 - 20 \times 10^{-9} g$$

⇒ Meilleure sensibilité ? Site plus calme et/ou meilleure isolation et/ou T plus grand

Aller plus loin : hybridation

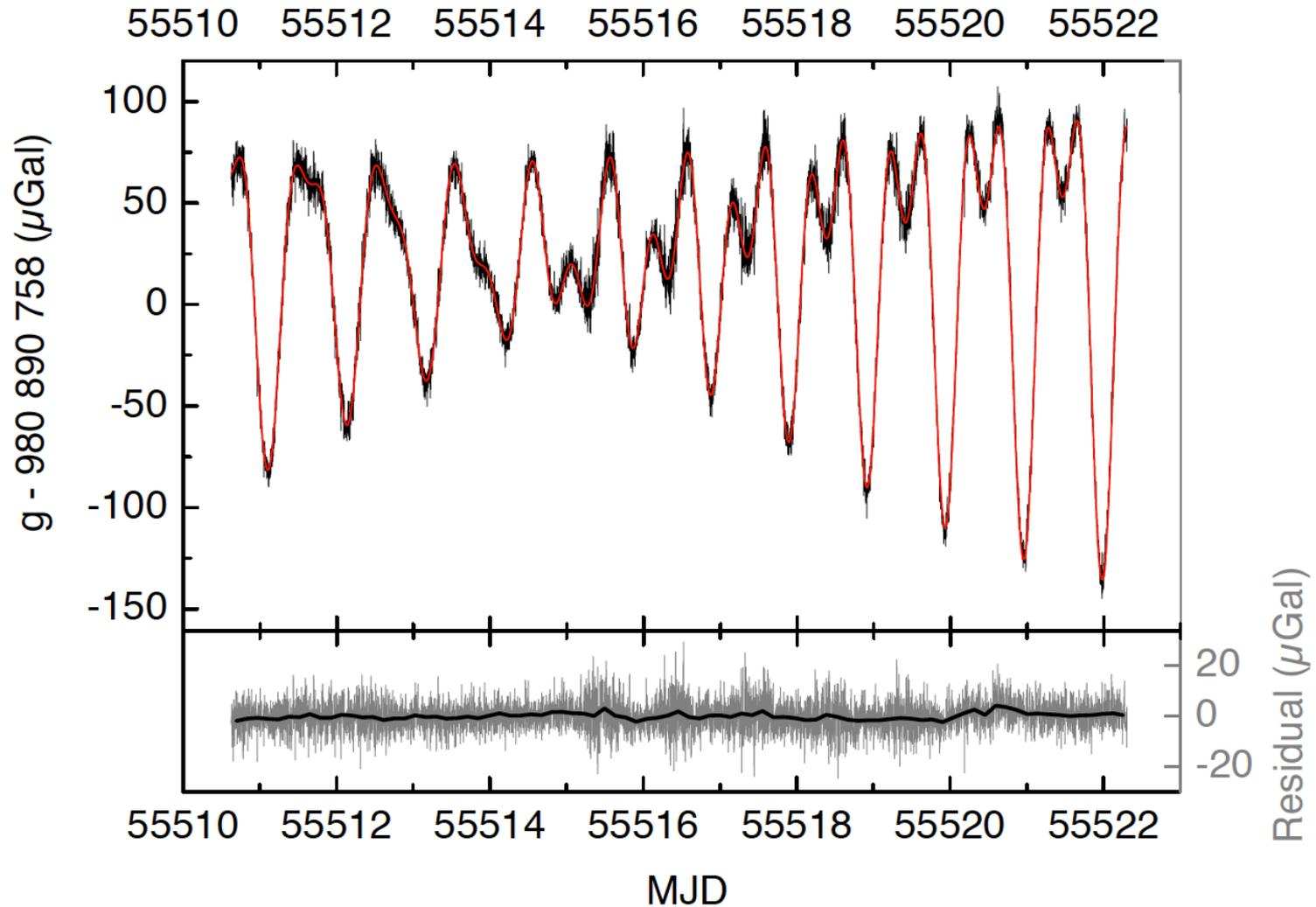
Capteur Hybride : Interféromètre atomique/ capteur mécanique

- ✓ Large Bande : DC - 430 Hz
- ✓ Signal haute fréquence = signal Accéléromètre Mécanique
- ✓ Etalonnage de l'AM par l'IA
- ✓ Asservissement biais de l'AM
- ✓ Mesures sans temps morts, limitées par la qualité de la corrélation

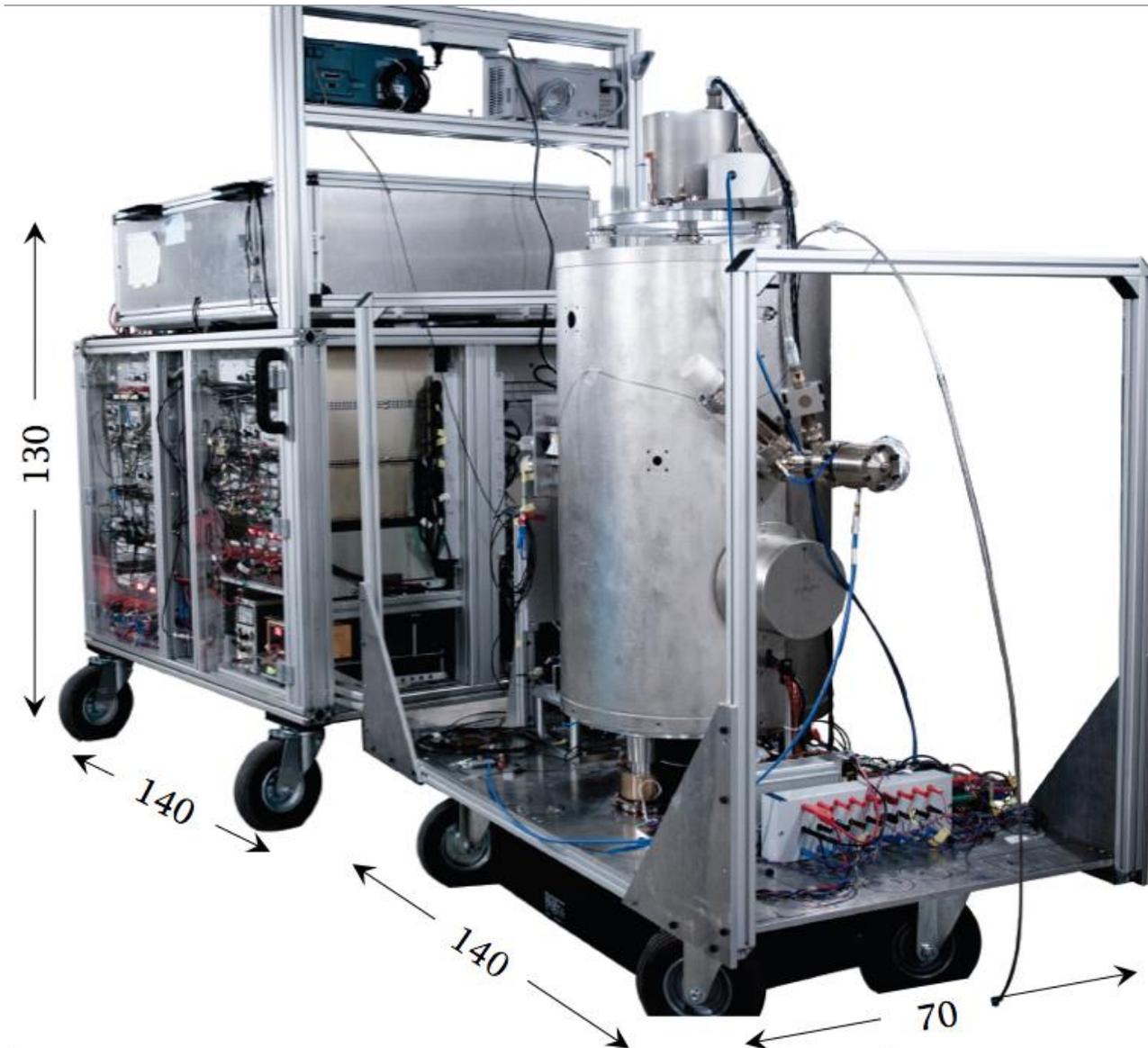


J. Lautier, et al., Applied Physics Letters 105, 144102 (2014)

Mesures longues en continu



Gravimètre transportable





ECAG'11 KC at Walferdange (Luxembourg)

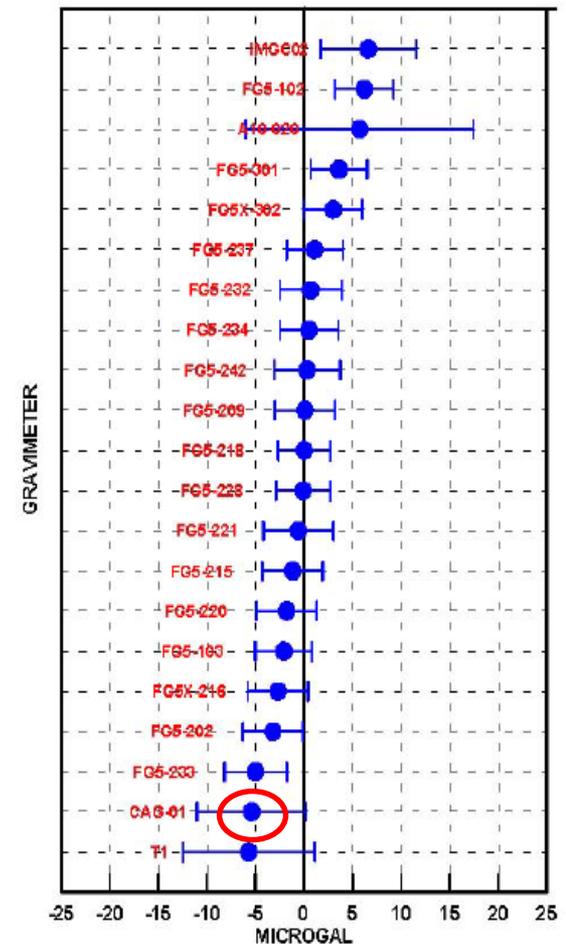


Les comparaisons permettent la validation du bilan d'exactitude

Bilan d'exactitude :

Effect	Biais μGal	u μGal
Alignments	2.4	0.5
Frequency reference	-4.6	<0.1
RF phase shift	0.0	<0.1
<i>vgg</i>	-10.3	<0.1
Self gravity effect	-1.3	0.1
Coriolis	1.3	0.8
Wavefront aberrations	0.0	4.0
LS1	0.0	<0.1
Zeeman	0.0	<0.1
LS2	-7.7	0.5
Detection offset	0.0	0.5
Optical power	0.0	1.0
Cloud indice	0.4	<0.1
Cold collisions	<0.1	<0.1
TOTAL	-19.8	4.3

Résultats de la comparaison :



Gravimètres dans le monde



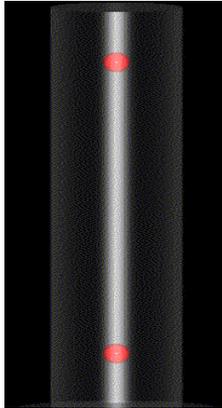
- Arrêté
- Opérationnel - Evalué
- Opérationnel – En cours d'évaluation
- En cours de développement

Mesures différentielles

Intérêt : permet réjection sources de bruit en mode commun

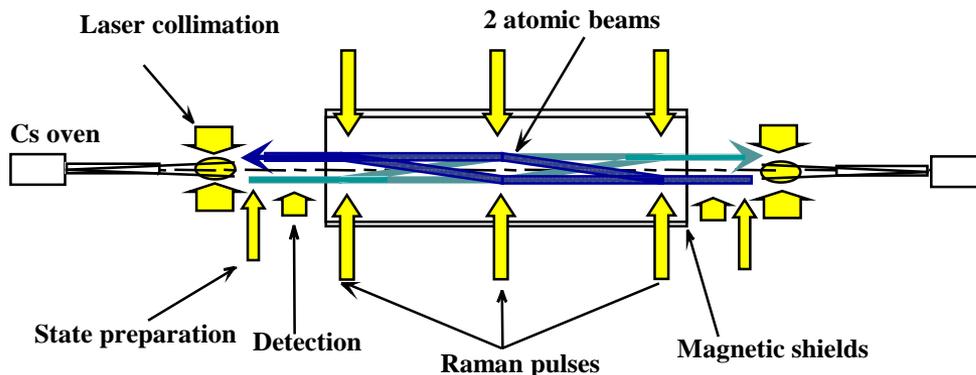
2 configurations d'instruments :

- Gradiomètres



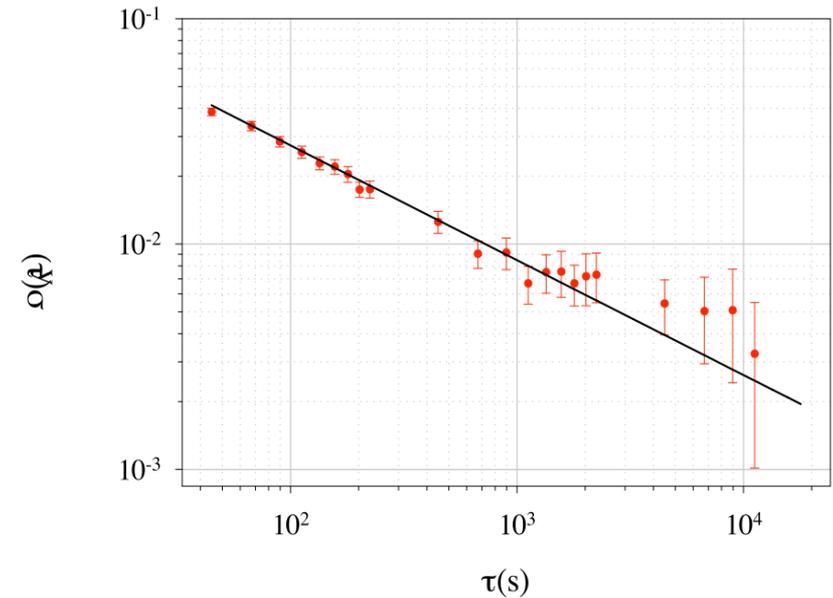
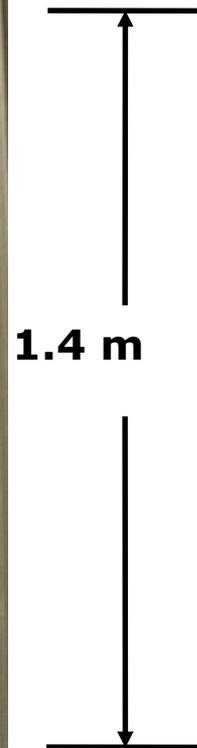
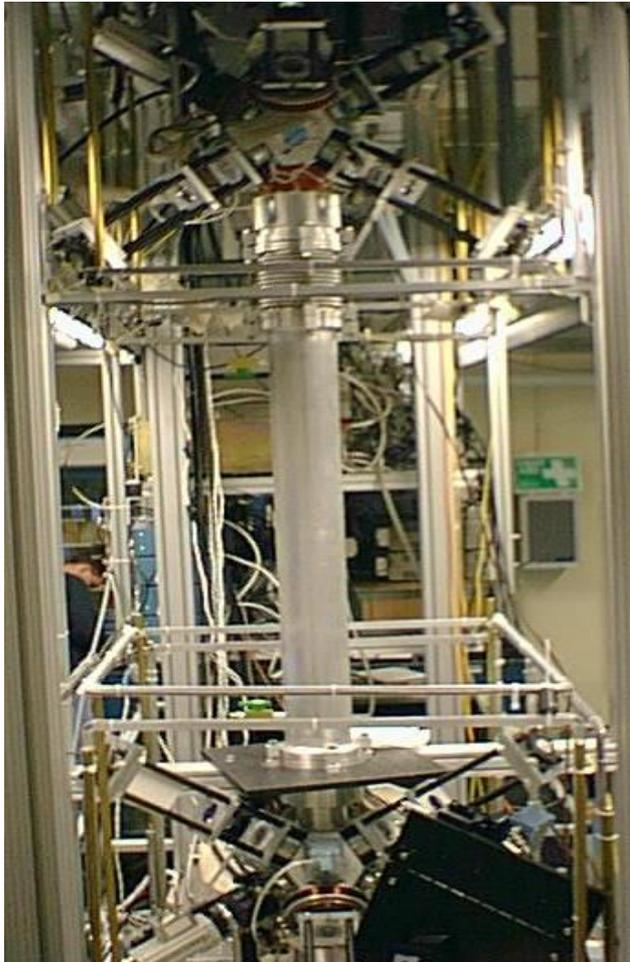
- Interféromètres simultanés avec deux nuages d'atomes et des lasers communs
- Mesure différentielle permet d'accéder à la différence d'accélération et donc au gradient de g
- Permet de s'affranchir des accélérations dues au mouvement de la plateforme
- Instrument adapté aux mesures embarquées

- Gyromètres



- Interféromètres simultanés avec deux jets d'atomes contrapropageants
- Mesure différentielle permet d'accéder à la rotation
- Permet de s'affranchir des accélérations

Mesures différentielles



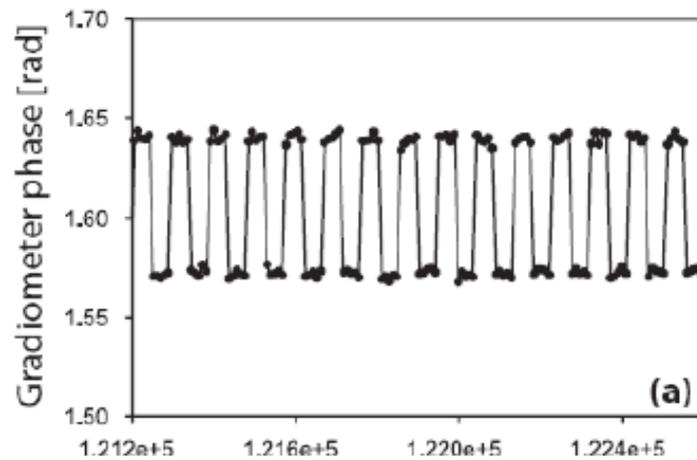
Demonstrated differential acceleration sensitivity:

$$4 \times 10^{-9} \text{ g/Hz}^{1/2}$$

$$(2.8 \times 10^{-9} \text{ g/Hz}^{1/2} \text{ per accelerometer})$$

Stanford, M. Kasevich

Accéléromètre différentiel

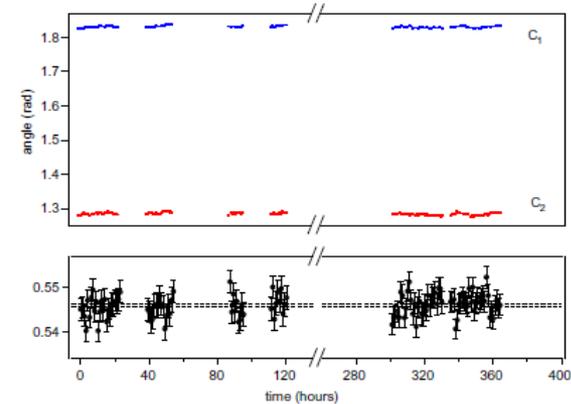
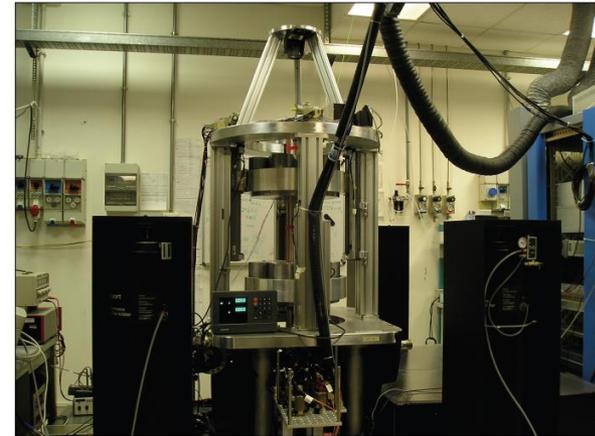


Accélération différentielle démontrée : 10^{-11} g

Incertitude statistique : 2×10^{-4} on G

Exactitude sur G : TBD

Florence, G. Tino



Incertitude statistique : 3×10^{-4} on G

Exactitude sur G : TBD, Target $\sim 10^{-4}$

Sensibilité à la rotation

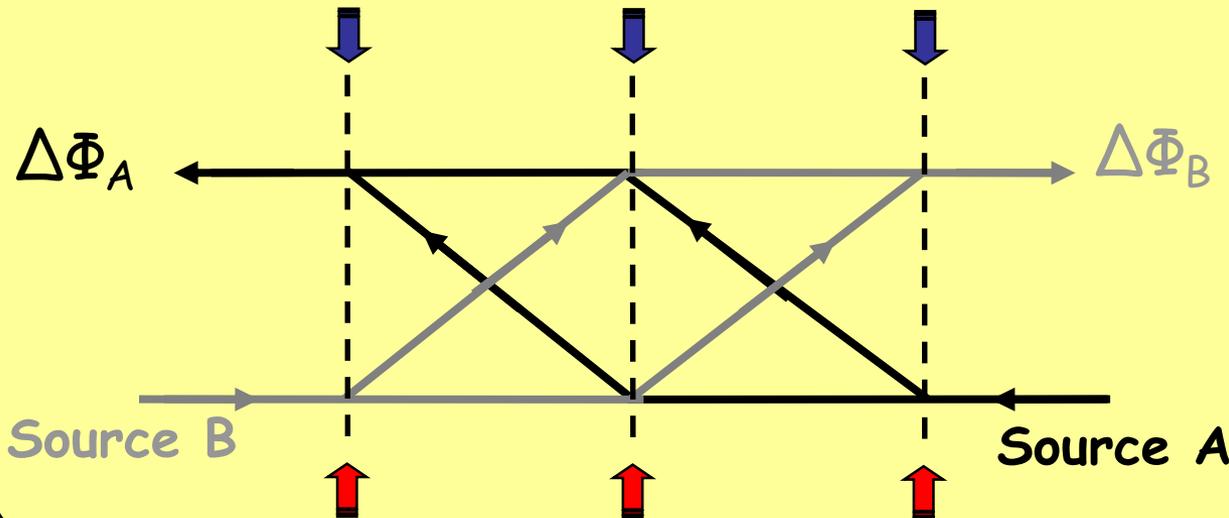
$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_{\text{acceleration}} + \Delta\Phi_{\text{rotation}}$$

T L Gustavson et al., *Class. Quantum Grav.* **17** (2000).

$$\vec{k}_{\text{eff}} \cdot \vec{a} T^2 - 2\vec{k}_{\text{eff}} \cdot \vec{\Omega} \left(\vec{V} \right)^{-2}$$

Déphasage de rotation :
Direction des atomes

Deux sources atomiques en sens opposés



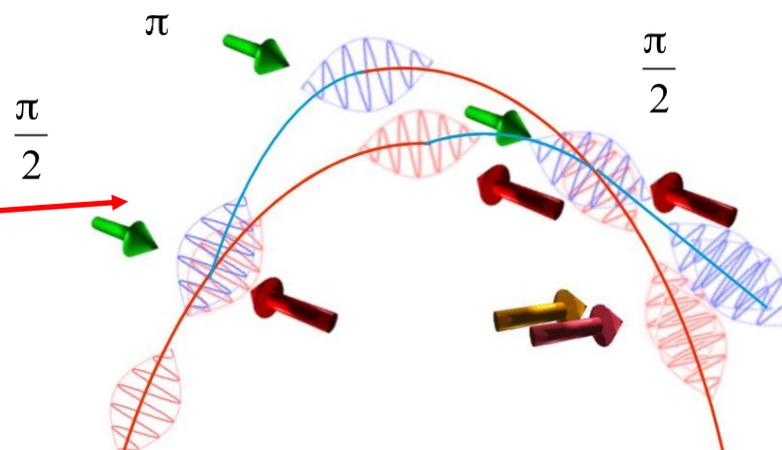
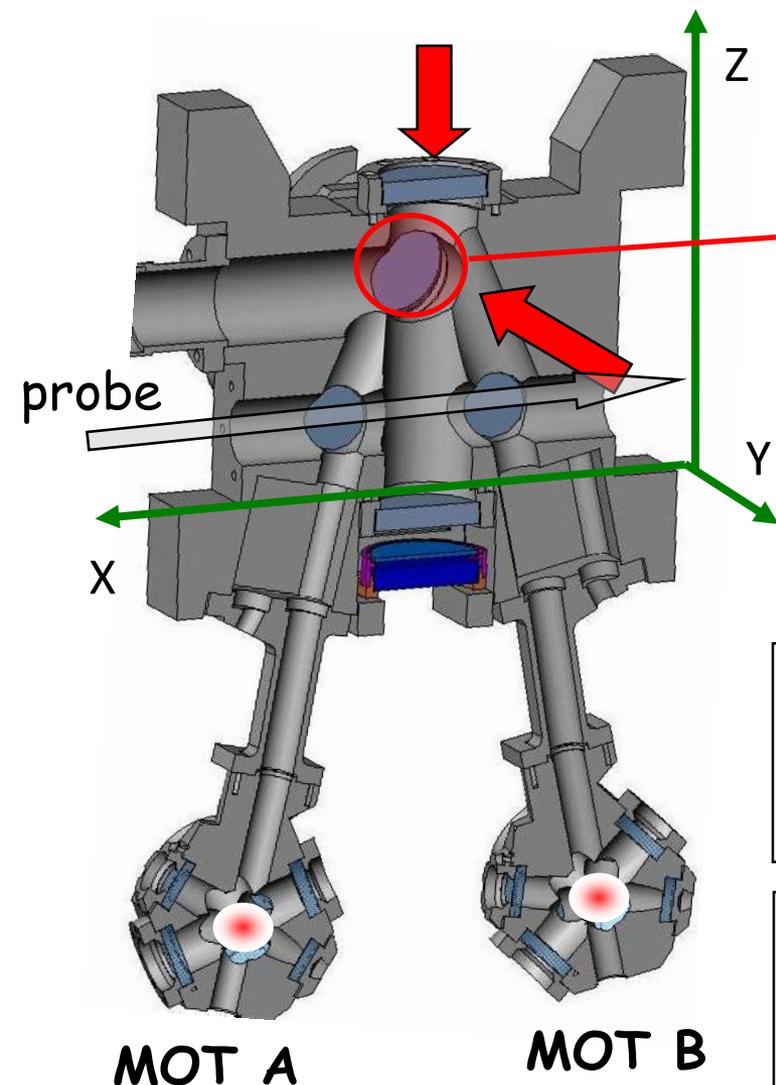
Somme : accélération

$$\Delta\Phi_{\text{acc}} = \frac{\Delta\Phi_A + \Delta\Phi_B}{2}$$

Différence: rotation

$$\Delta\Phi_{\text{rot}} = \frac{\Delta\Phi_A - \Delta\Phi_B}{2}$$

Premier gyromètre à atomes froids



$$\Delta\Phi = \vec{k}_{eff} \vec{a} T^2 - 2\vec{k}_{eff} \cdot \vec{\Omega} \wedge \vec{V} T^2$$

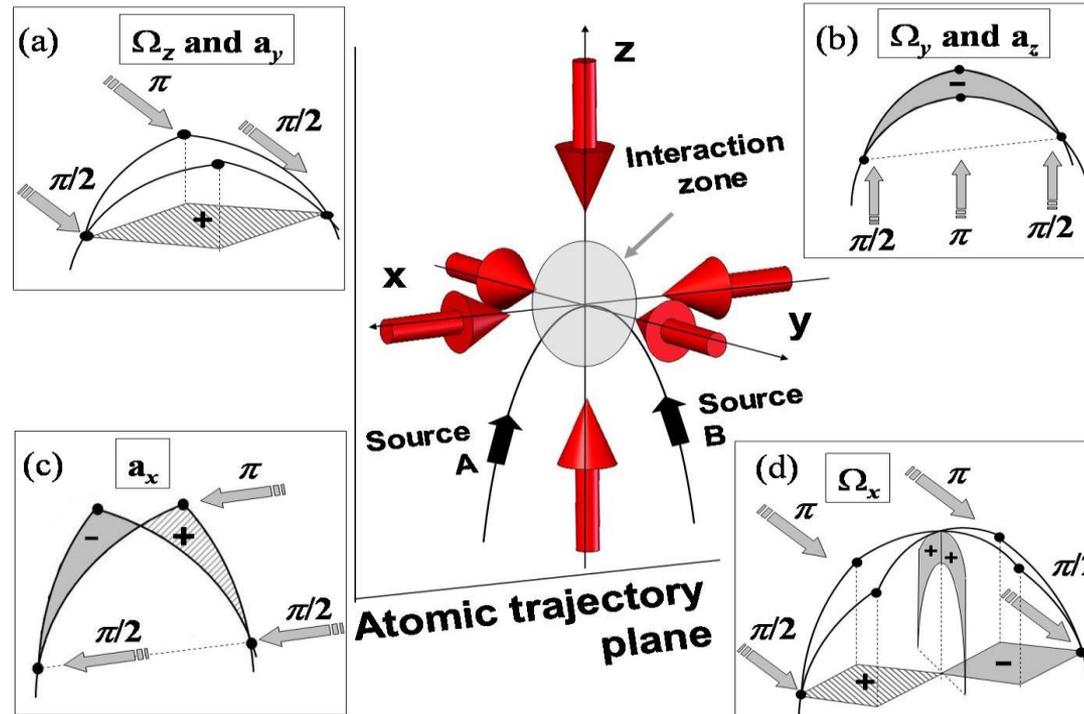
Atomes froids

Bon contrôle de la vitesse moyenne
Faible dispersion de vitesse

Un seul laser, modulé dans le temps

Stabilité long-terme
Connaissance du facteur d'échelle

6 axes de mesure



✓ Capacité de mesurer 6 axes d'inertie dans le même appareil (rotations and accélérations)

B. Canuel et al., PRL **97**, 010402 (2006)

✓ Sensibilité de mesure de rotation **limitée par bruit de projection quantique**

Au niveau de $2 \cdot 10^{-7}$ rad/s @1s, avec un plancher à long terme de 10^{-8} rad/s

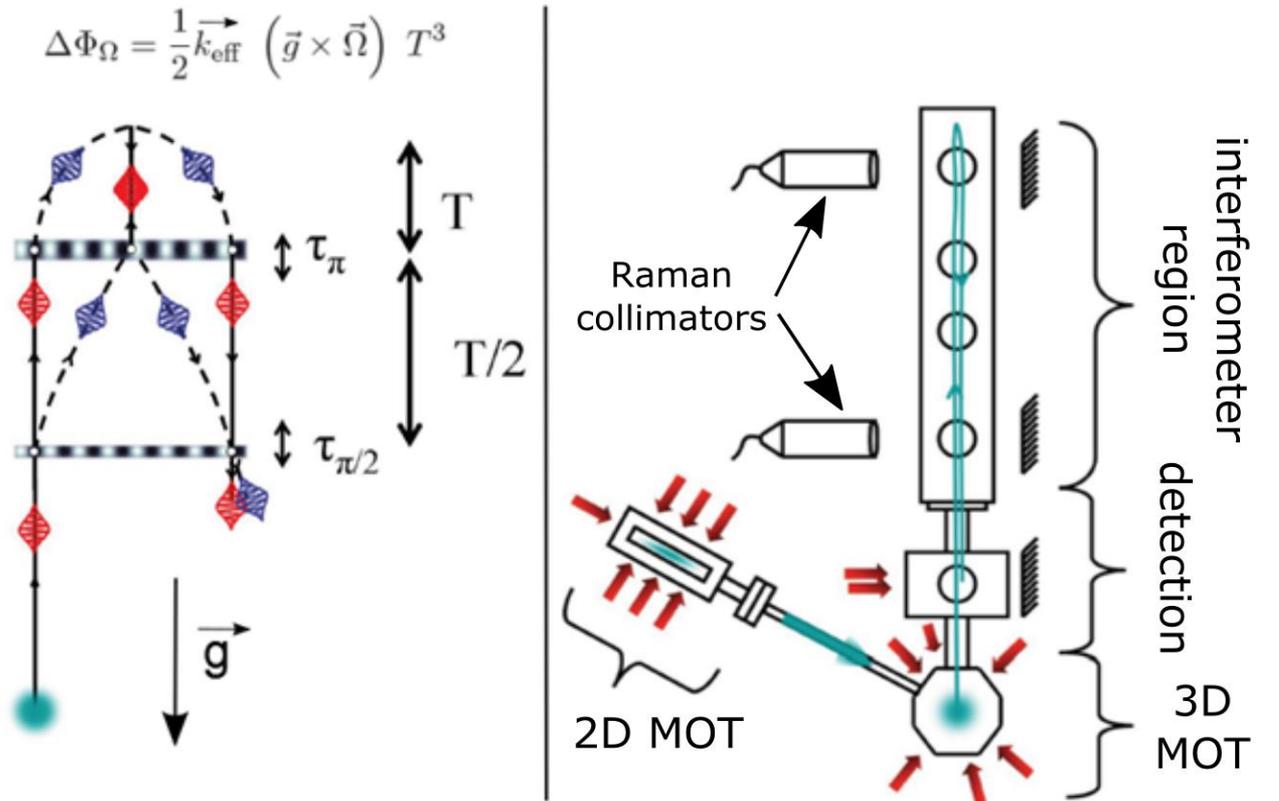
compétitif avec meilleures technos

A. Gauguet, et al., Phys. Rev A **80**, 063604 (2009)

✓ D'autres expériences dans le monde (Hanovre en particulier)

2^e Gyromètre à atomes froids

- Première expérience 2001 → 2007
- Seconde expérience 2008 →

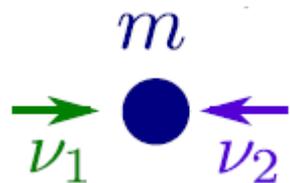


- Aire physique actuelle du gyromètre du SYRTE : 11 cm²
- **Stabilité long terme : 1 nrad/s après 1000 s de mesure (état de l'art)**

Voir Poster « Mesures en continu avec un gyromètre à atomes froids », A. Landragin

1. Motivations, Applications
2. Principe de l'interférométrie atomique et des capteurs
inertiels à atomes froids
3. Quelques expériences d'interférométrie atomique au
SYRTE et ailleurs
4. **Nouvelles géométries et Perspectives**

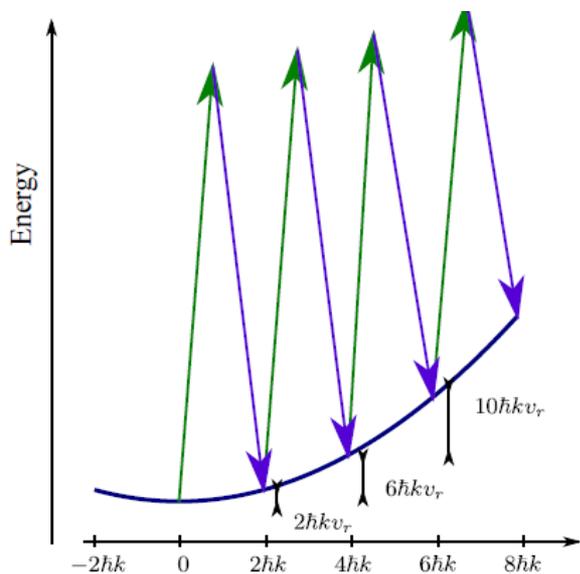
De meilleures séparatrices



Interaction des atomes avec un **réseau optique**
 = une onde stationnaire créée par l'interférence de deux faisceaux laser contrapropageants

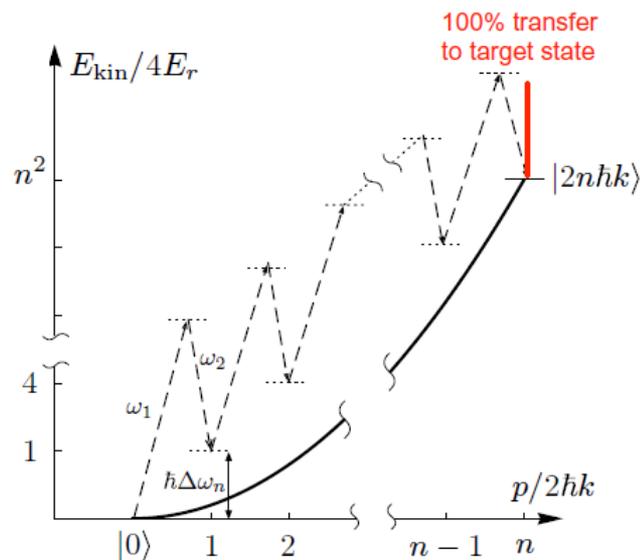
Réseau accéléré :

$$\delta = \nu_1 - \nu_2 \propto t$$



Oscillations de Bloch

Réseau en mouvement :

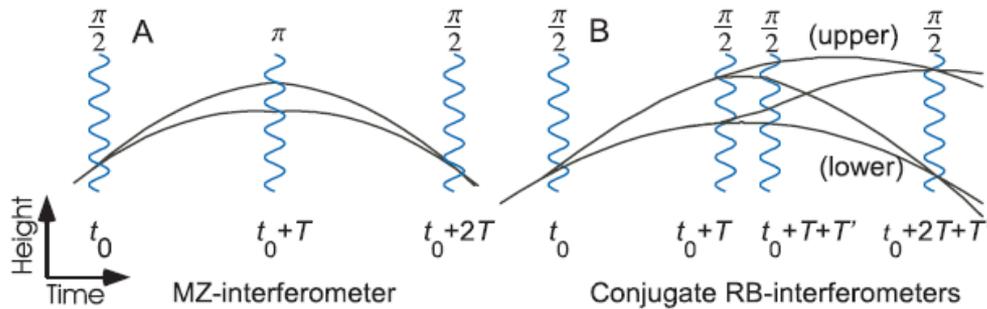


Diffraction de Bragg d'ordre élevé

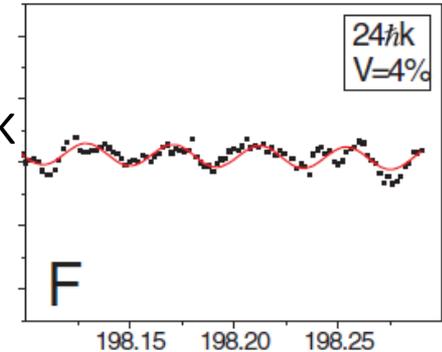
Intérêt : augmenter la séparation entre les bras de l'interféromètre

Diffraction de Bragg d'ordre élevé

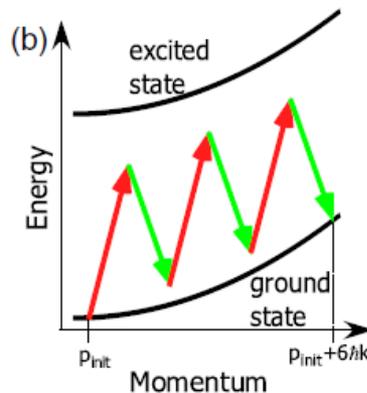
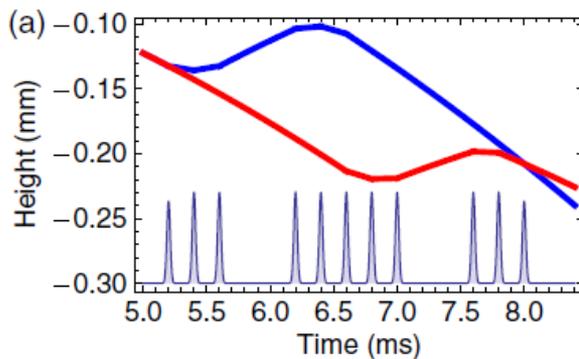
Démonstration de MZI et RBI avec séparatrice Bragg 24 ħk



Atomes de Cs
 Refroidi/laser $T=1\mu\text{K}$
 6W Ti:Sapphire



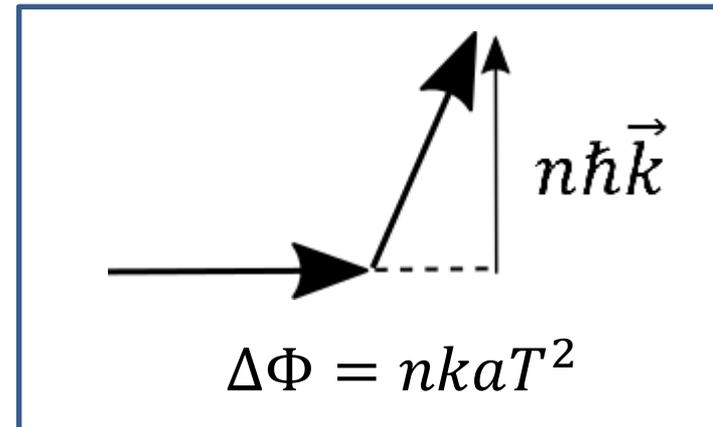
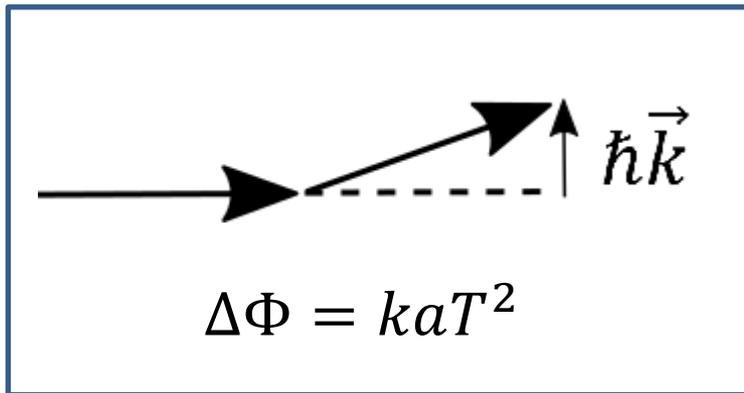
Séquence de pulses de Bragg d'ordre 6



Séquence de 17 pulses
 $\Rightarrow 102 \hbar k$

100 mW/faisceau
 Rb ultrafroids ($T=4 \text{ nK}$)

- Augmentation du **facteur d'échelle**

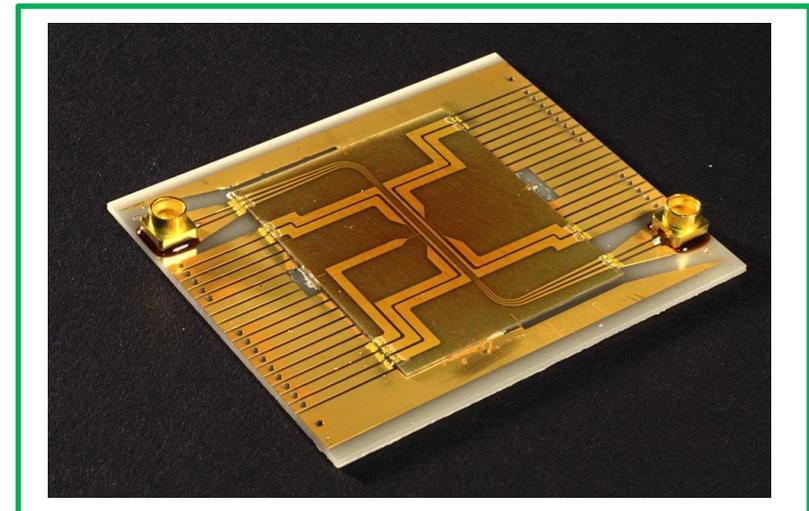
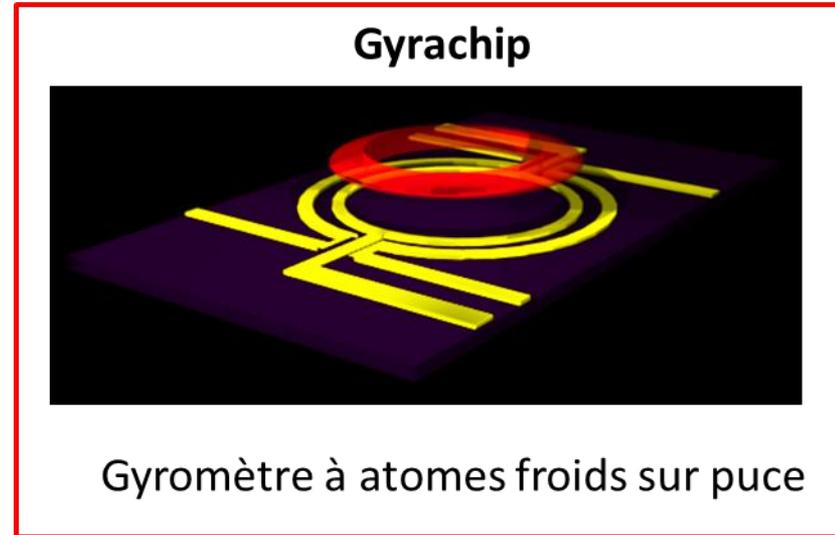
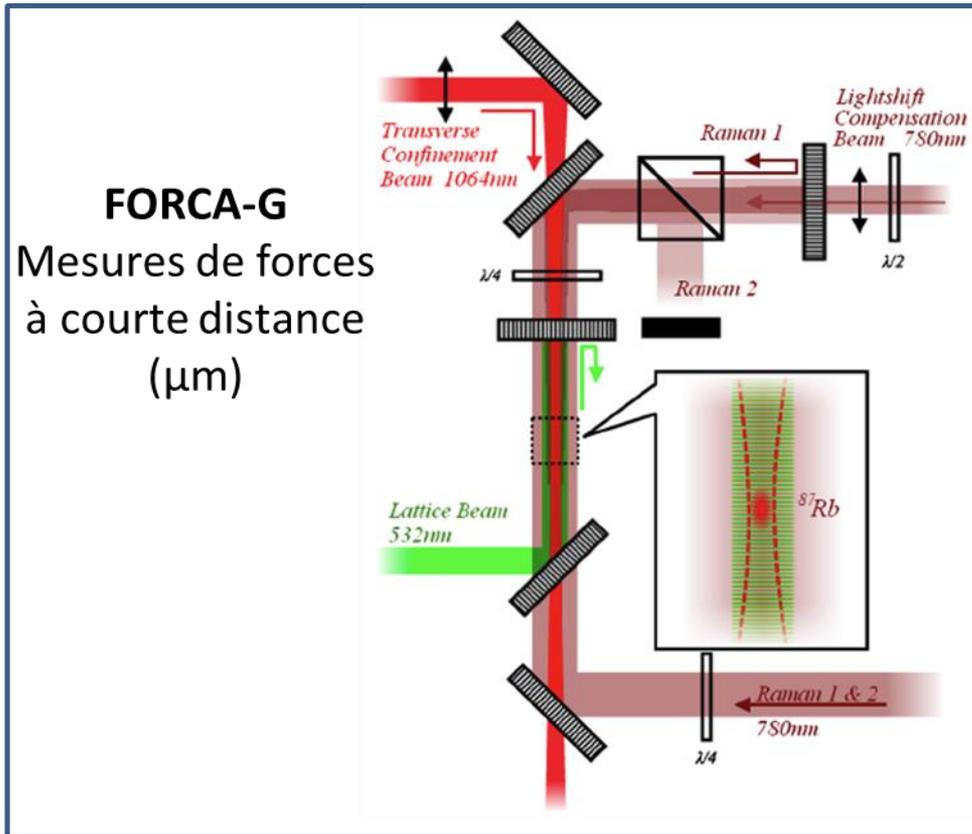


- Augmentation de **l'impact du bruit de vibration !**
- Intéressant surtout pour les mesures différentielles : ex : gradiomètre
- **Contraintes :**
 - Bonne efficacité nécessite utilisation d'atomes ultra-froids (10 nK plutôt 1 μ K)
 - Puissance laser plus élevée

Atomes piégés ou guidés

- Augmenter notablement le temps d'interrogation (plus de 1 s) en restant compact (volume utile ~ 50 L)
 - Développer de nouveaux concepts d'interféromètres
 - Mettre à profit les interactions entre atomes pour améliorer la sensibilité de l'interféromètre
- Piège optique (dipolaire) ou piège magnétique sur une puce atomique

Interféromètres à atomes piégés



TACC : horloge à atomes piégés sur une puce
(Peter Rosenbuch, 2005 →)
Stabilité court terme 5.8×10^{-13}