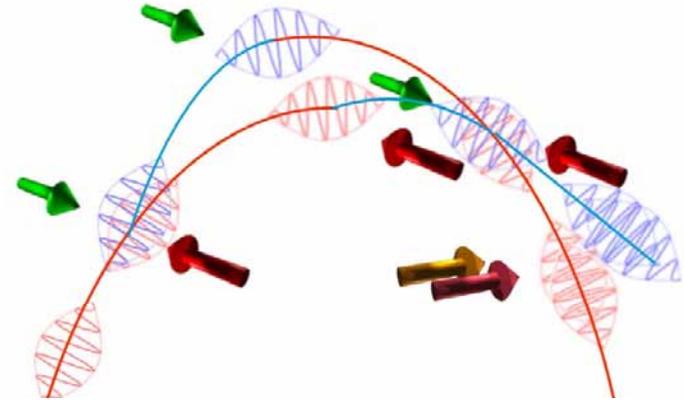


# Gravimètre atomique

Arnaud Landragin



Systèmes de Référence Temps-Espace



# Plan

- ✓ Introduction à l'interférométrie atomique : principe et points clés
- ✓ Gravimètre atomique absolu
- ✓ Applications : comparaisons avec les gravimètres classique
- ✓ Conclusion et perspectives

# Différent type de gravimètres

## Gravimètres relatifs

- **Gravimètre à ressort**  
sensibilité : qlq  $10^{-10} \text{g.Hz}^{-1/2}$   
dérive =  $10^{-8}$  g par jour  
cartographie de terrain
- **Gravimètre supraconducteur**  
sensibilité : qlq  $10^{-12} \text{g.Hz}^{-1/2}$   
dérive =  $10^{-12}$  g par jour  
Non transportable (enceinte cryogénique)

Nécessite un étalonnage

## Gravimètres absolus

(*exacts*)  
Observation d'un Corps en  
chute libre

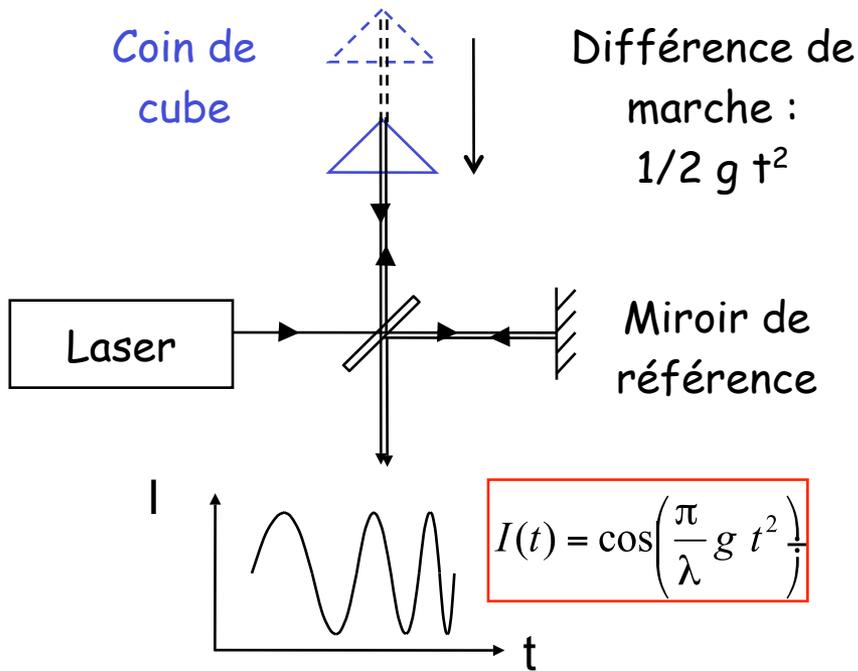
+

Référence de temps  
Référence de longueur

- **Gravimètre à coin de cube**  
sensibilité : qlq  $10^{-8} \text{g.Hz}^{-1/2}$   
Exactitude :  $2.10^{-9} \text{g}$
- **Gravimètre atomique**  
Stanford university  
LNE-SYRTE / Observatoire de Paris  
ONERA, Berlin, NIM (Chine) ...

# Les gravimètres optiques

**Principe** : interféromètre de Michelson avec un coin de cube en chute libre



Exactitude :  $2 \cdot 10^{-9} g$

FG5

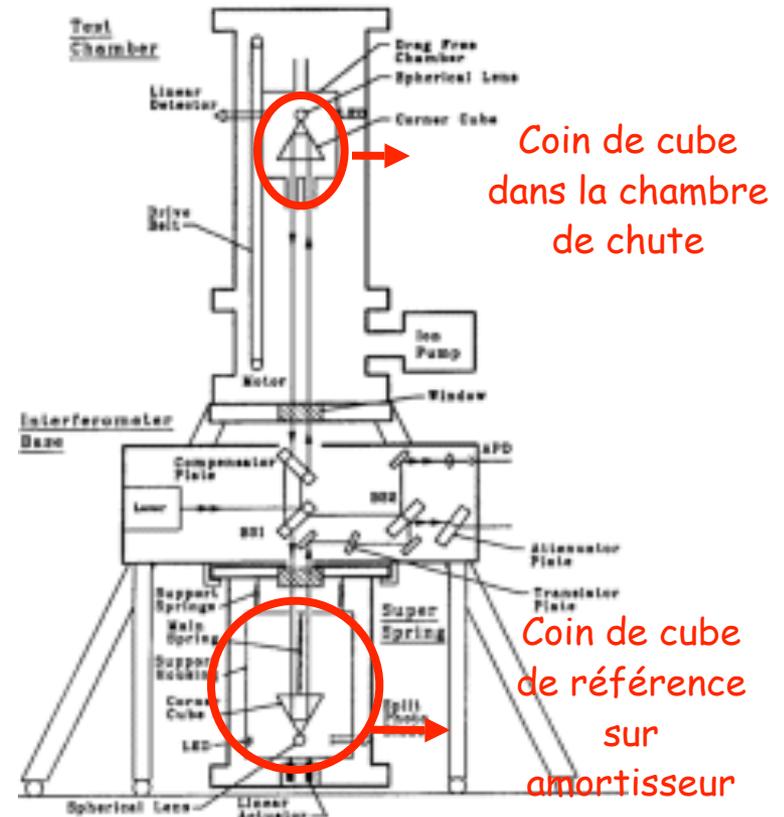
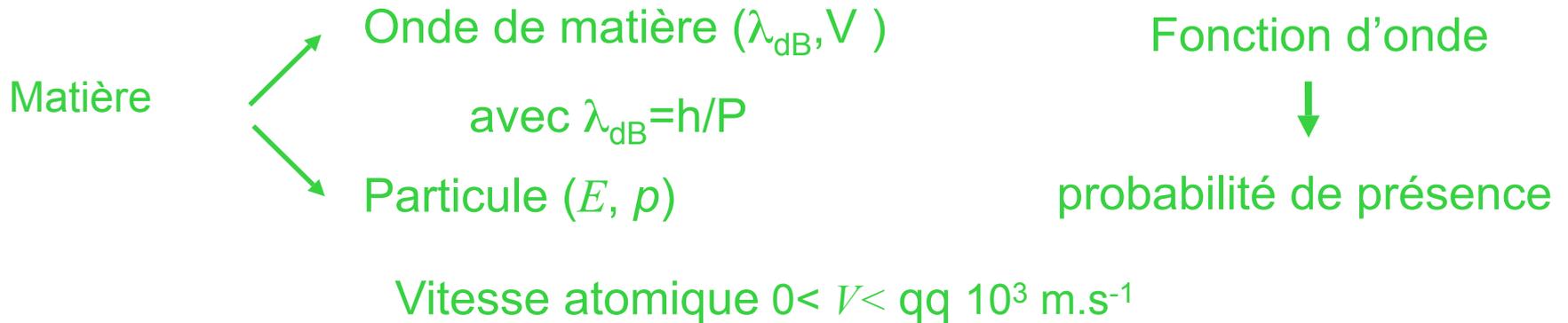
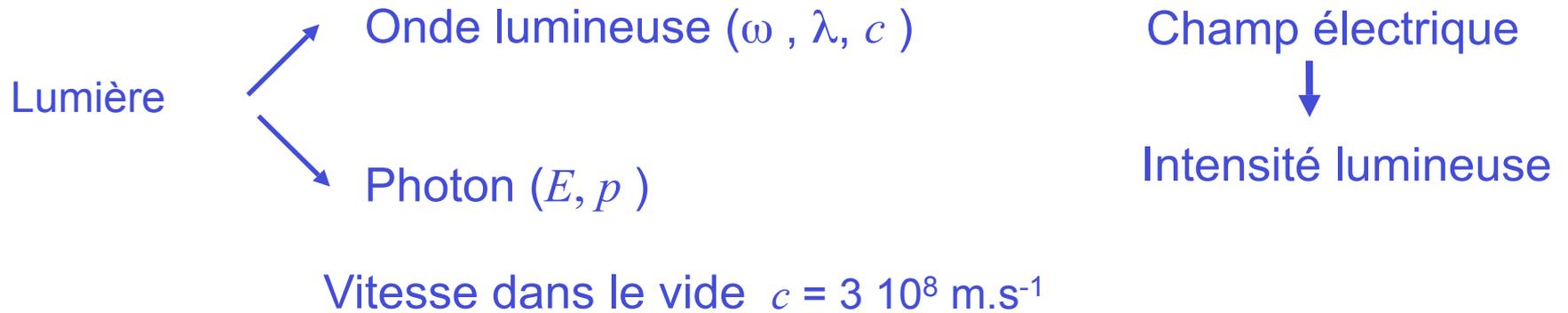


Schéma de principe

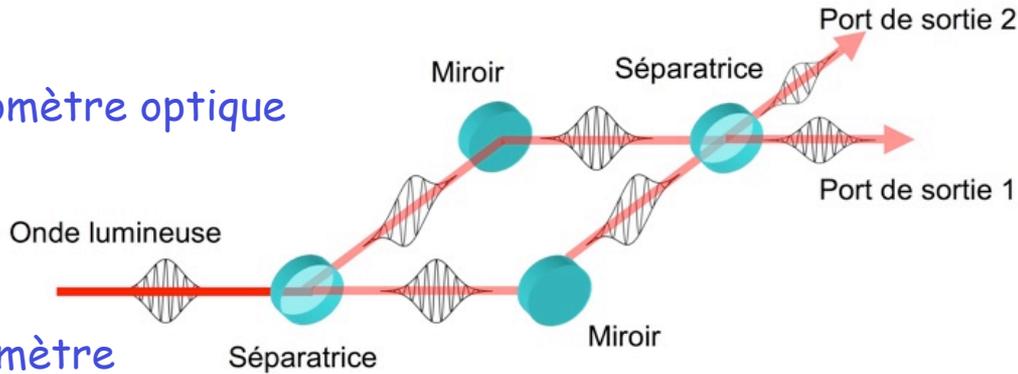
([http:// www.microsolutions.com](http://www.microsolutions.com))

# De Broglie: Onde/particule



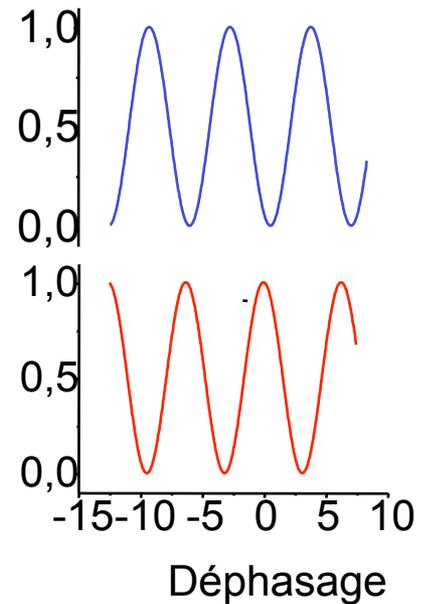
# Interféromètre de type Mach-Zehnder

Interféromètre optique

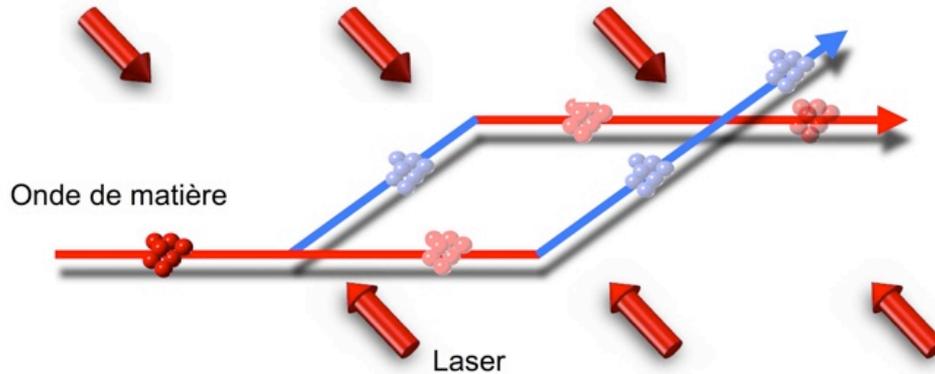


Port de sortie 2

Port de sortie 1



Interféromètre atomique



$\Delta \phi$  : différence de phase accumulée le long des deux bras : **interférences à 2 ondes**

$$P_1 = \frac{1}{2} (1 + \cos \Delta \Phi)$$

# un peu d'histoire

- 1991: premières démonstrations d'interféromètres atomiques
  - Première expérience : fente d'Young
    - F.O. Carnal, J. Mlynek, Phys. Rev. Lett. **66**, p 2689 (1991) .
  - Interféromètre à **séparatrice optique** : **gyromètre** sur jet atomique
    - F. Riehle, Th. Kister, A. Witte, J. Helmcke, Ch. Bordé, Phys. Rev. Lett., **67**, p 177 (1991)
  - Interféromètre à **réseau mécanique** : **gyromètre** sur jet atomique
    - D.W. Keith, C.R. Ekstrom, Q.A. Turchette, D.E. Pritchard, Phys. Rev. Lett., **67**, p 2693 (1991)
  - Interféromètre à atomes froids : **accéléromètre** utilisant des **transitions Raman**
    - M. Kasevich, S. Chu, Phys. Rev. Lett., **67**, p 177 (1991)

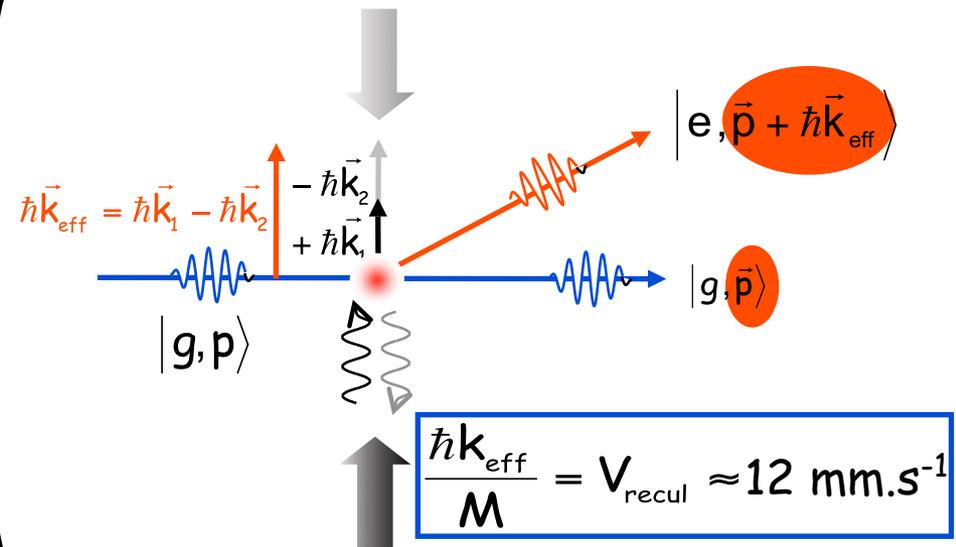
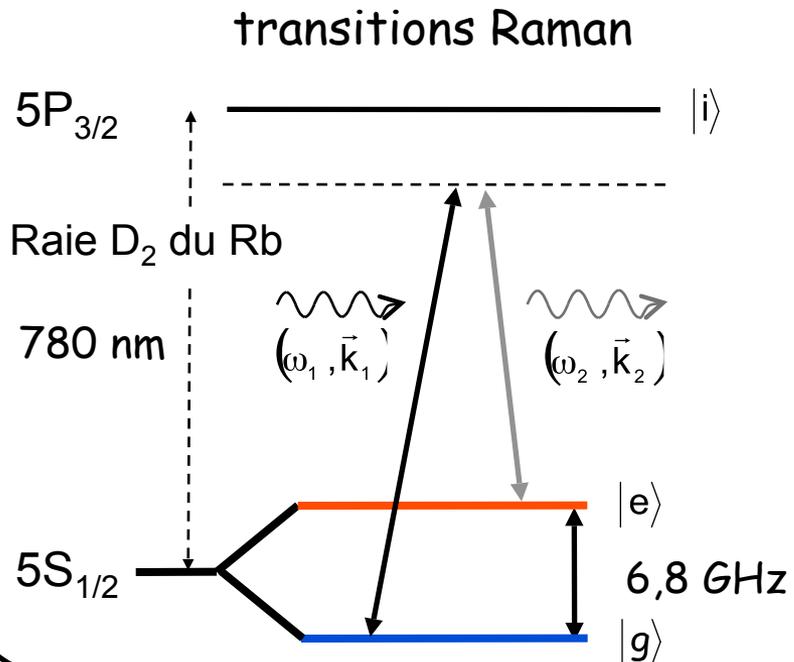
Tests de différentes configurations : réseaux mécaniques, diffraction de Bragg, transitions Raman : Atom interferometry (Berman) 1997

# Contexte

- 1997: Démonstrations de performances proche de l'état de l'art
  - Gyromètre de grande précision : double jets atomiques du groupe de M. Kasevich (Stanford et Yale University)
  - Gravimètre de grande exactitude et mesure de  $h/m$  : groupe de S. Chu group (Stanford University)
- => Développement de capteurs inertiels pour des applications spécifiques nécessitant stabilité long terme et/ou exactitude et utilisant atomes froids et transitions Raman stimulées

# Transitions Raman Stimulées

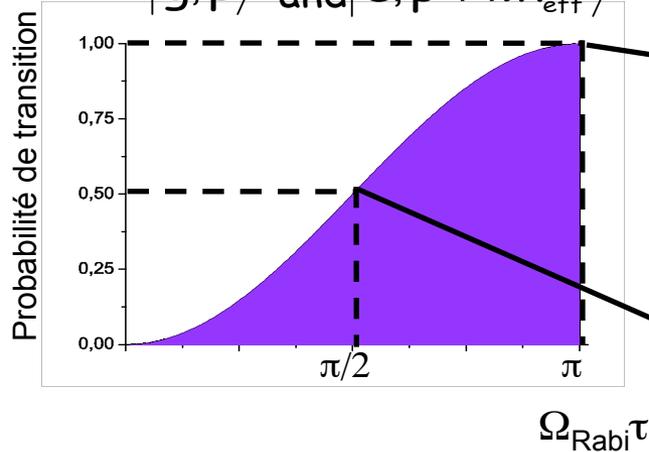
Transition entre 2 états d'impulsion



# Manipulation des paquets d'ondes

Oscillations de Rabi

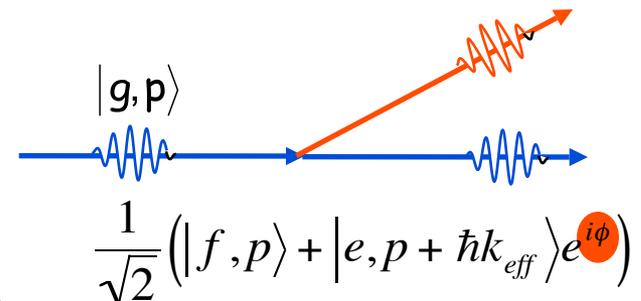
$|g, p\rangle$  and  $|e, p + \hbar k_{eff}\rangle$



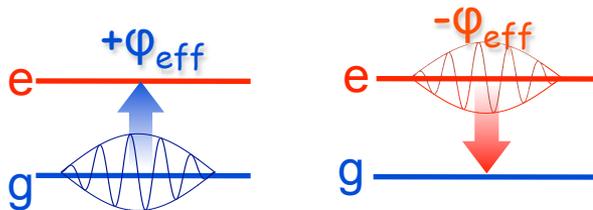
Miroir atomique  
impulsion  $\pi$



Séparatrice atomique  
impulsion  $\pi/2$



La différence de phase Laser est "copiée"  
sur la phase de l'onde diffractée



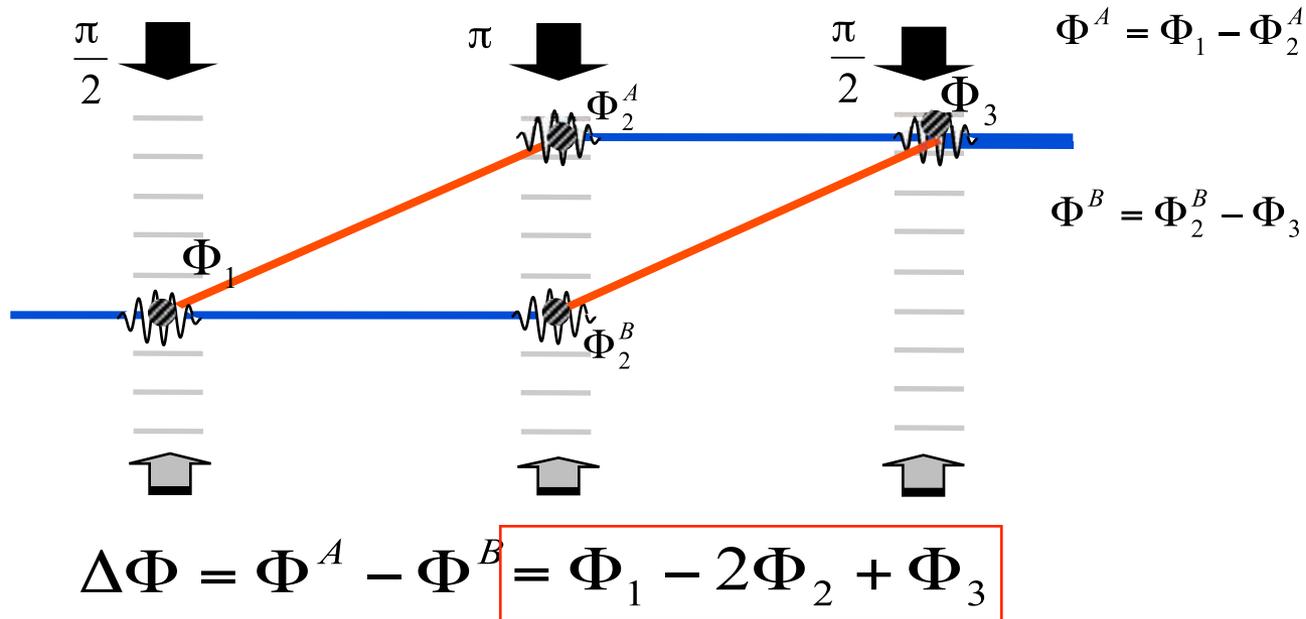
# Déphasage atomique

Contributions au déphasage atomique :

Laser : au centre du paquet d'ondes  $\phi_i(t_i) = \mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r}_i(t_i)$

Action le long des ~~trajectoires~~ atomiques

Superposition des ~~paquets~~ d'ondes en sortie



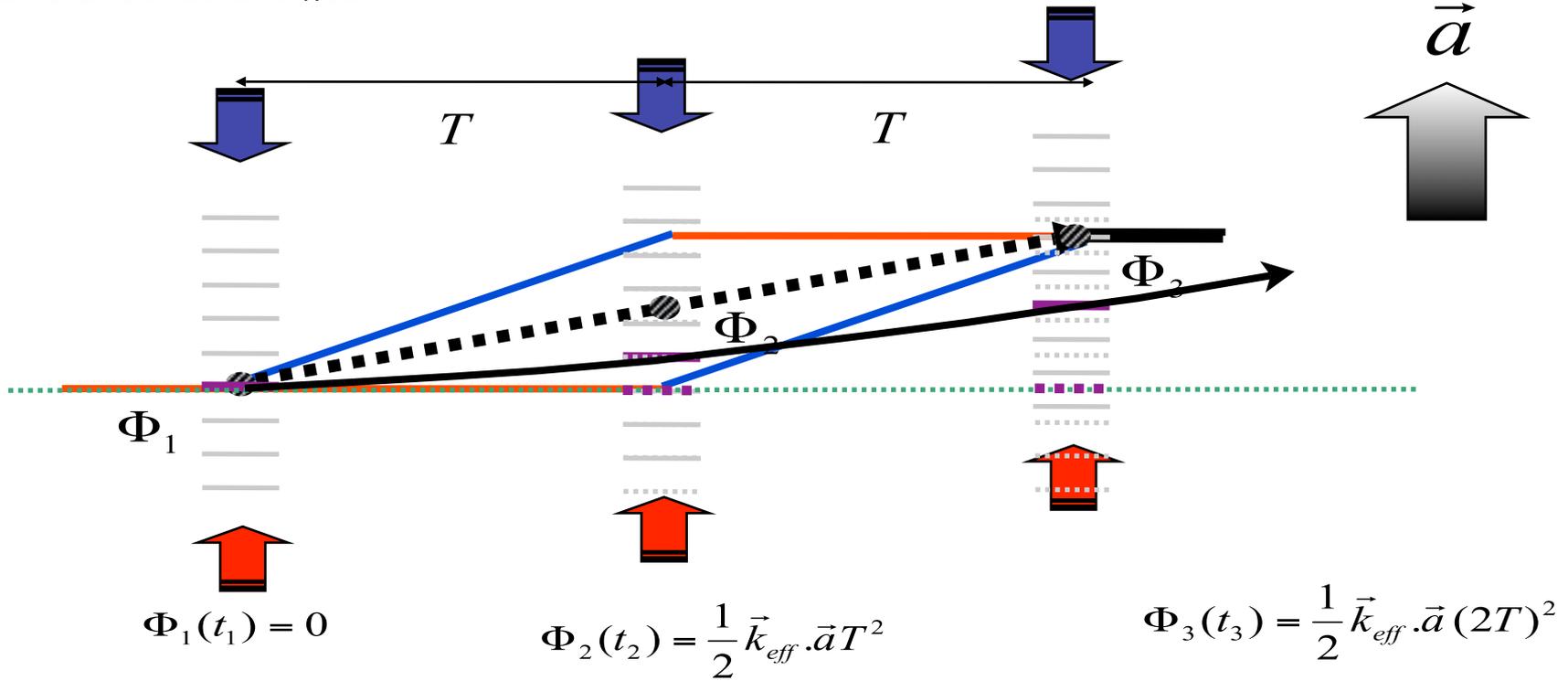
Déplacement relatif des **équiphases laser/référentiel** des atomes en chute libre mesuré au moment des trois impulsions par rapport à une "règle" bien connue :  $\mathbf{k}$

# Déphasage d'accélération

Accélération constante  $\vec{a}$

Dans le référentiel en chute libre avec les atomes :

$$\Phi(t) = \vec{k}_{eff} \cdot \vec{r}(t) \rightarrow \frac{1}{2} \vec{a} t^2$$



$$\Delta\Phi = \Phi_1(t_1) - 2\Phi_2(t_2) + \Phi_3(t_3) = \vec{k}_{eff} \cdot \vec{a} T^2$$

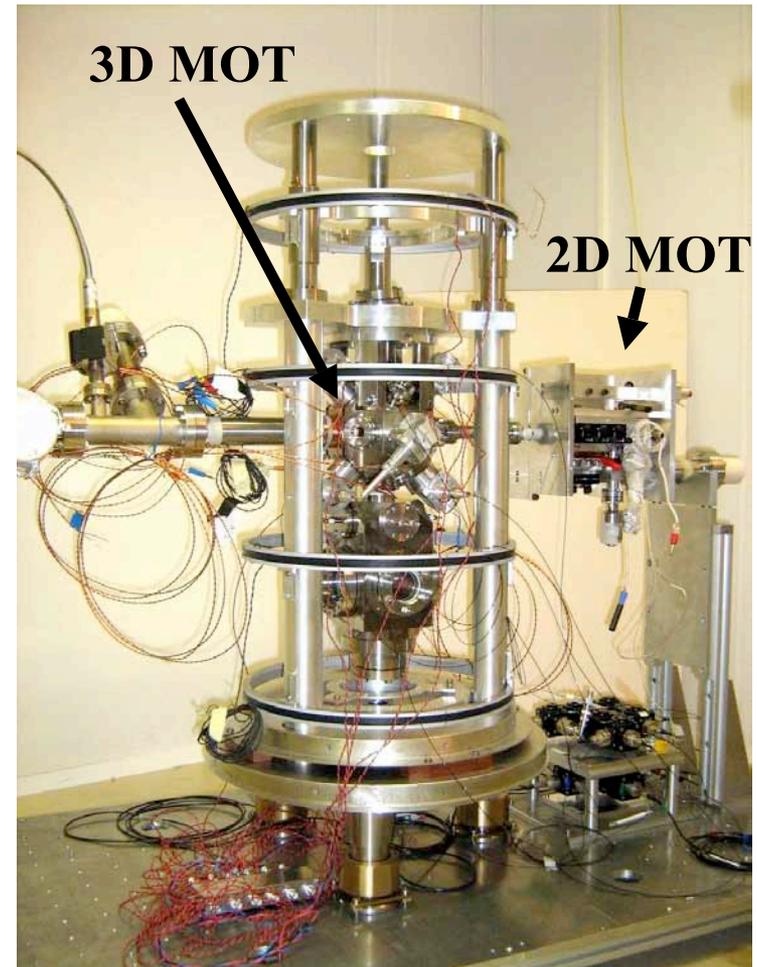
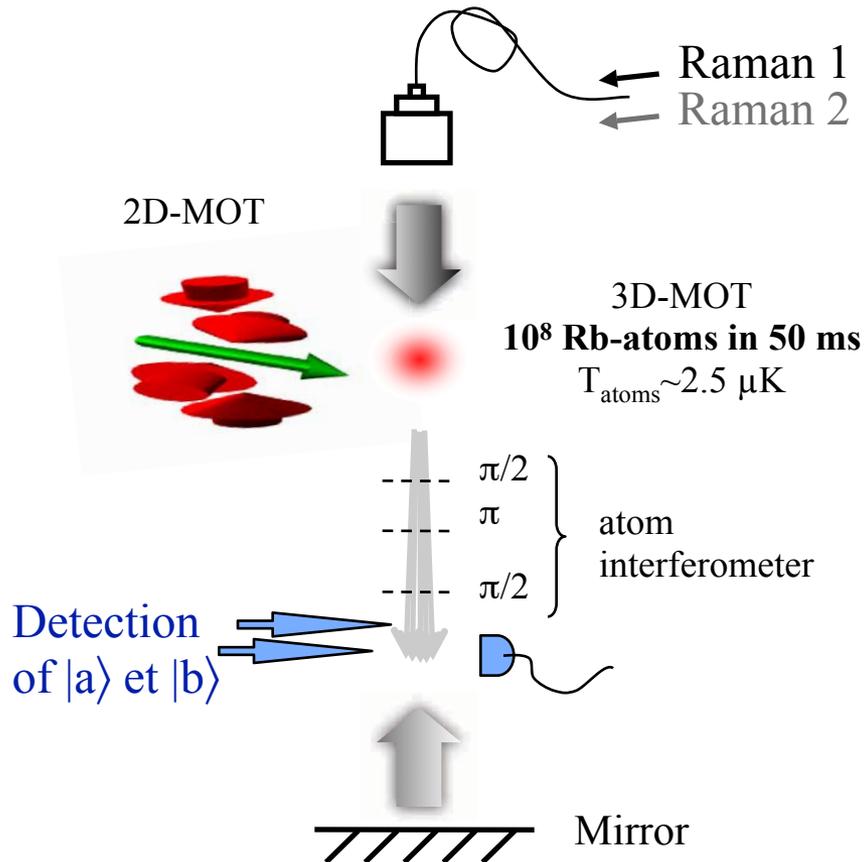
# Points clés

- ✓ **Atomes froids** : grand temps d'interrogations
- ✓ **Transitions Raman** :
  - transition optique : très bon **contrôle de  $k_i$**
  - Transition à 2 photons : pas nécessaire de contrôler la phase optique, **seulement la différence de phase**
  - Transitions Raman : **étiquetage** des état internes ("state labeling")
    - ➔ intérêts techniques
- ✓ **Atomes en chute libre** : définissent un référentiel d'inertie
  - ➔ Nécessite un très bon contrôle de l'interaction atomes/lasers pendant les impulsions Raman

# Plan

- ✓ Introduction à l'interférométrie atomique : principe et points clés
  
- ✓ Gravimètre atomique
  - dispositif expérimental
  - sensibilité
  - exactitude
  
- ✓ Applications : comparaisons avec les gravimètres macroscopiques
  
- ✓ Conclusion et perspectives

# Gravimètre : dispositif expérimental

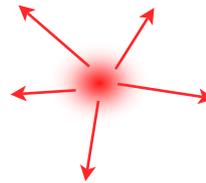


# Atomes froids?

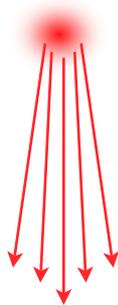
- ✓ La **température** est liée à l'agitation thermique

$$\frac{1}{2}k_B.T = \frac{1}{2}m.v^2$$

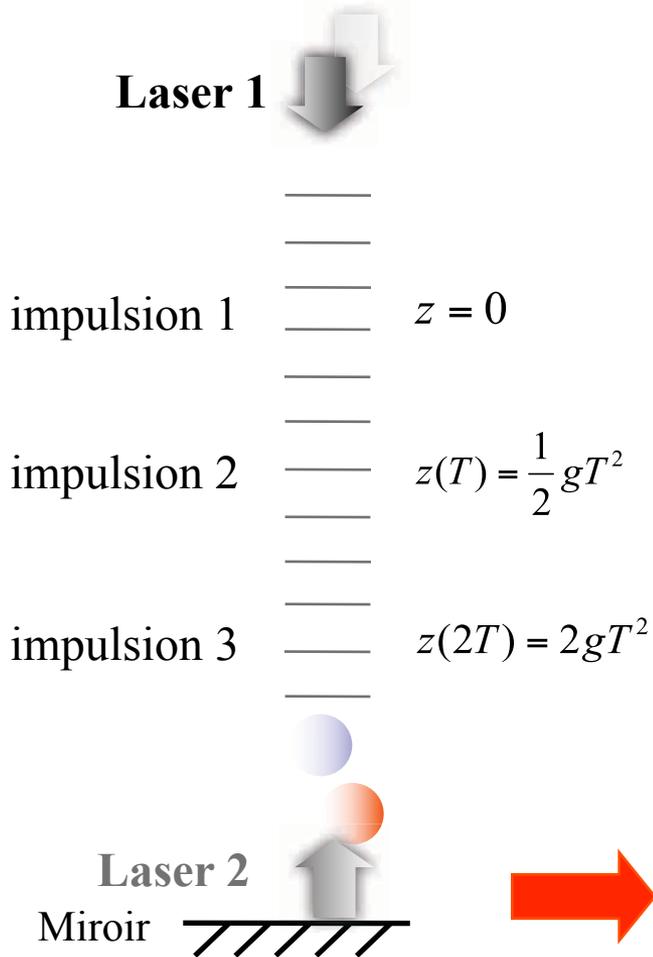
- ✓ A température ambiante  $v \sim 300$  m/s



- ✓ Atomes refroidis par laser  $T \sim 1\mu\text{K}$ ,  $v \sim 10$  mm/s



# Gravimètre atomique



Interféromètre "vertical"

⇒ Chute libre le long des équiphasés lasers

Sensibilité à l'accélération de la gravité :

$$\Delta\Phi_{\text{int}} = -\vec{k}_{\text{eff}} \vec{g} T^2 + \delta\Phi_{\text{noise}} + \delta\Phi_{\text{sys}}$$

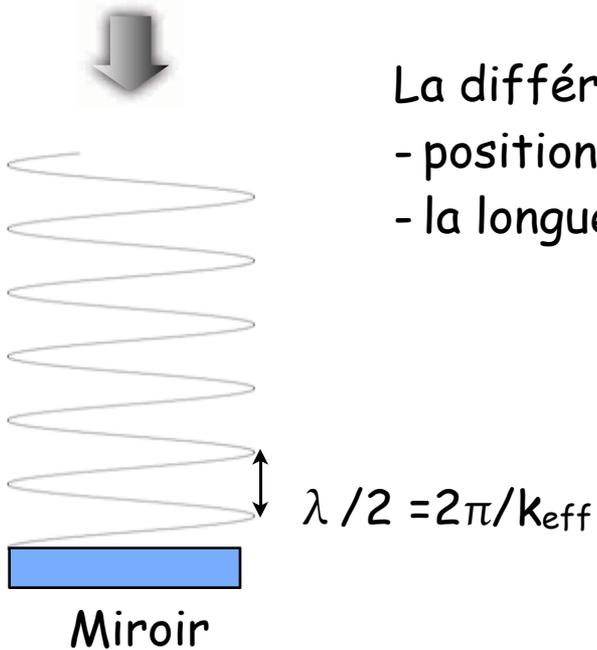
Les deux faisceaux lasers Raman sont rétro-réfléchis

⇒ **Equiphases définies par la position du miroir**

accélération de la gravité + **vibrations du miroir** + bruit sur la différence de **phase des lasers Raman**

# [ Onde stationnaire en mouvement ]

- ✓ onde stationnaire :



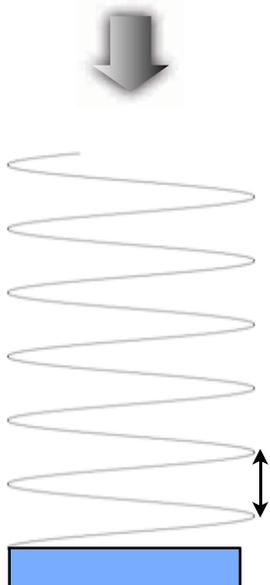
La différence de phase :

- position du miroir
- la longueur d'onde (ou  $k_{\text{eff}}$ )

# [ Onde stationnaire en mouvement ]

✓ onde stationnaire :

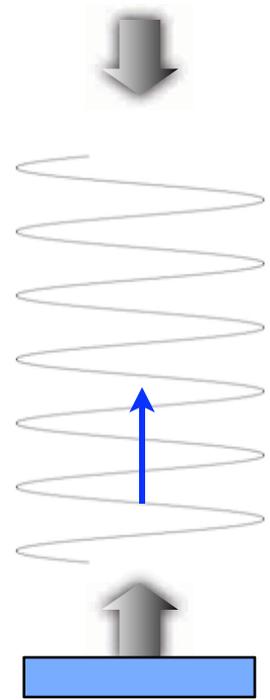
✓ Raman retro-réfléchi :



La différence de phase :  
- position du miroir  
- la longueur d'onde (ou  $k_{\text{eff}}$ )  
- et de la différence de fréquence de Raman

$$\lambda / 2 = 2\pi / k_{\text{eff}}$$

Miroir



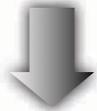
Défilement à la différence de fréquence Raman

Miroir

# Décalage Doppler

- Chute libre → décalage de fréquence par effet Doppler

Décalage vers le rouge



$$\delta\omega_1 = -\vec{k}_1 \cdot \vec{v} = -k_1 \cdot g \cdot t$$

$$v = g \cdot t$$



$$\delta\omega = \delta\omega_2 - \delta\omega_1 = \omega_0 + k_{eff} \cdot g \cdot t$$

Décalage vers le bleu



$$\delta\omega_2 = -\vec{k}_2 \cdot \vec{v} = k_2 \cdot g \cdot t$$

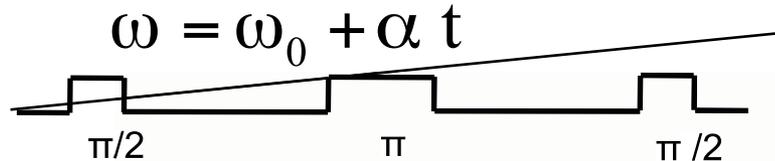
# Interférogramme

- Chute libre → décalage de la condition de résonance par effet Doppler

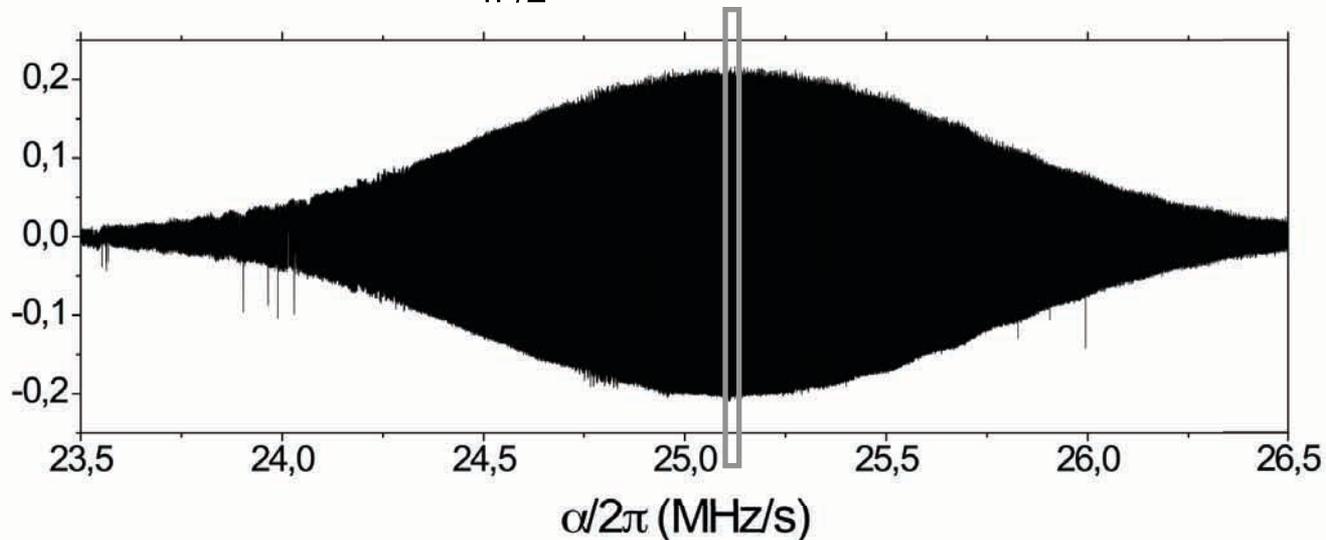
$$\omega_1 - \omega_2 = G + \omega_R + \omega_D = G + \frac{\hbar k_{eff}^2}{2m} + \frac{\vec{k}_{eff} \times \vec{p}}{m}$$

$\delta(\vec{v}) = \vec{k}_{eff} \cdot \vec{v} = \vec{k}_{eff} \cdot (\vec{g}t + \vec{v}_0)$

- Balayage de la différence de fréquence pour rester à résonance :



$$\Delta \Phi = k_{eff} \cdot g \cdot T^2 - \alpha T^2$$



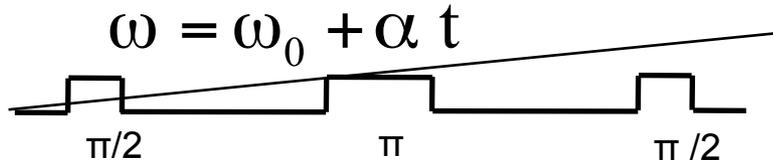
# Interférogramme

- Chute libre → décalage de la condition de résonance par effet Doppler

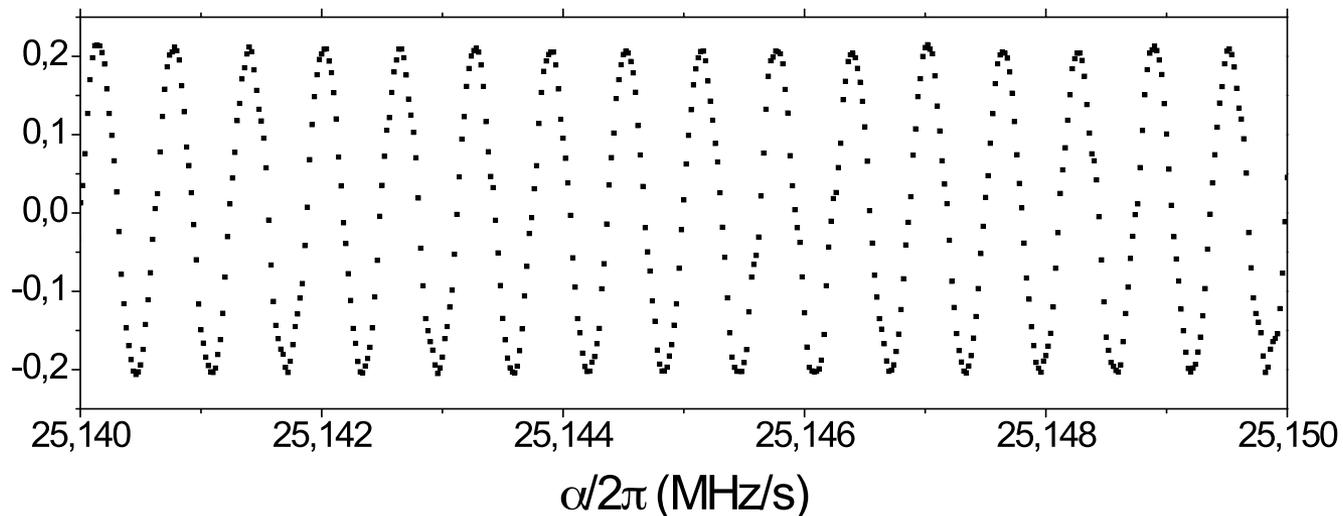
$$\omega_1 - \omega_2 = G + \omega_R + \omega_D = G + \frac{\hbar k_{eff}^2}{2m} + \frac{\vec{k}_{eff} \times \vec{p}}{m}$$

$\delta(\vec{v}) = \vec{k}_{eff} \cdot \vec{v} = \vec{k}_{eff} \cdot (\vec{g}t + \vec{v}_0)$

- Balayage de la différence de fréquence pour rester à résonance :



$$\Delta \Phi = k_{eff} \cdot g \cdot T^2 - \alpha T^2$$



# Détermination de $g$

Déphasage total :

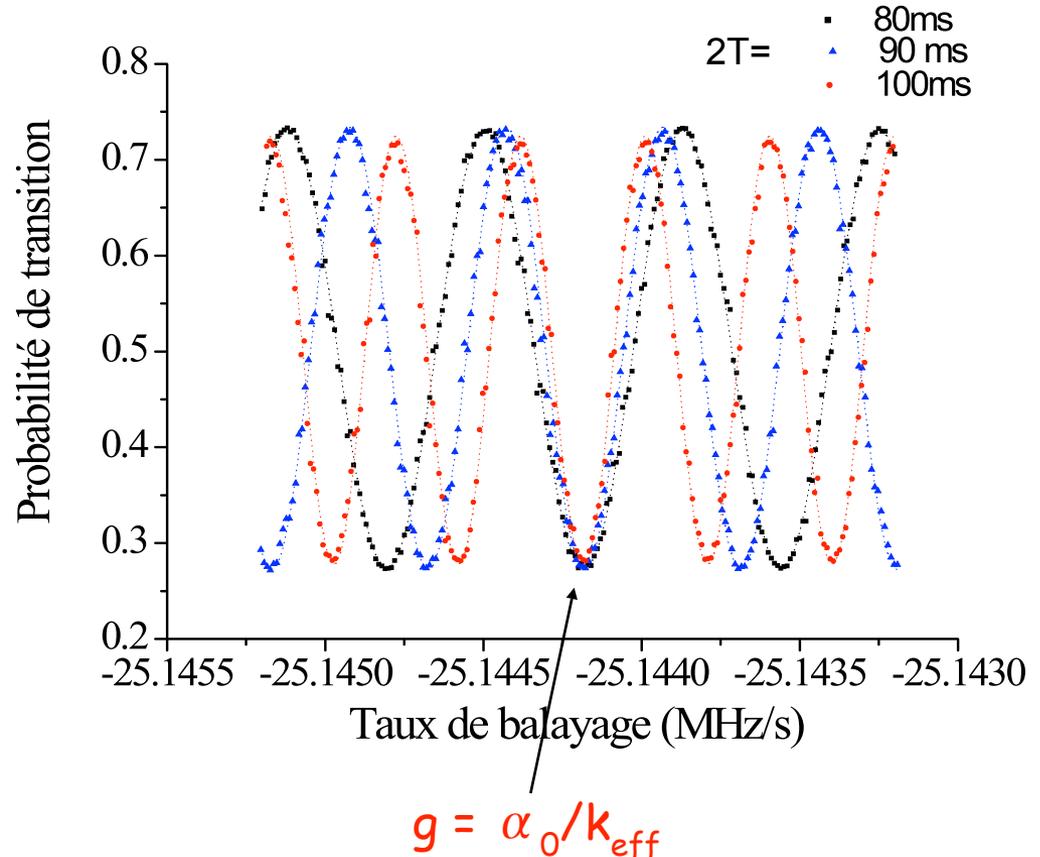
$$\Delta \Phi = (k_{\text{eff}} \cdot g - \alpha) T^2$$

Frangé centrale :

$$k_{\text{eff}} \cdot g = \alpha_0$$

⇒ On a alors  $\Phi = 0$ ,

et donc  $P \text{ min} \forall T$



Mesure de  $g$  :  $\alpha_0 = -25,1442 \text{ MHz/s} \Rightarrow g = 9,80921 \text{ m/s}^2$

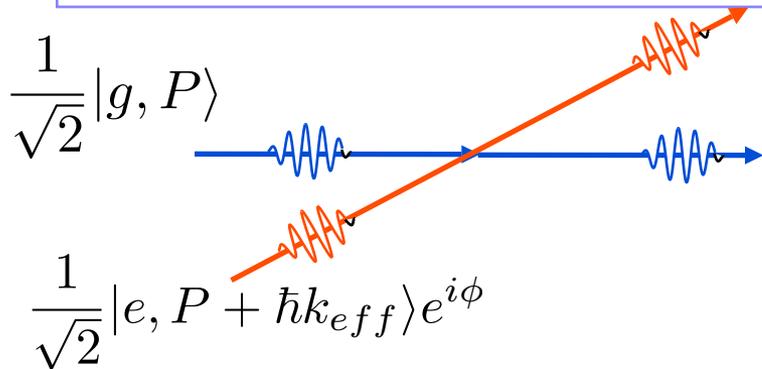
# Plan

- ✓ Introduction à l'interférométrie atomique : principe et points clés
- ✓ **Gravimètre atomique**
  - dispositif expérimental
  - sensibilité
  - exactitude
- ✓ Applications : comparaisons avec les gravimètres macroscopiques
- ✓ Conclusion et perspectives

# Source de bruit

- ✓ Bruit de phase des lasers
- ✓ Bruit de vibration
- ✓ Bruit de détection : limite fondamentale

Recombinaison sur la séparatrice atomique



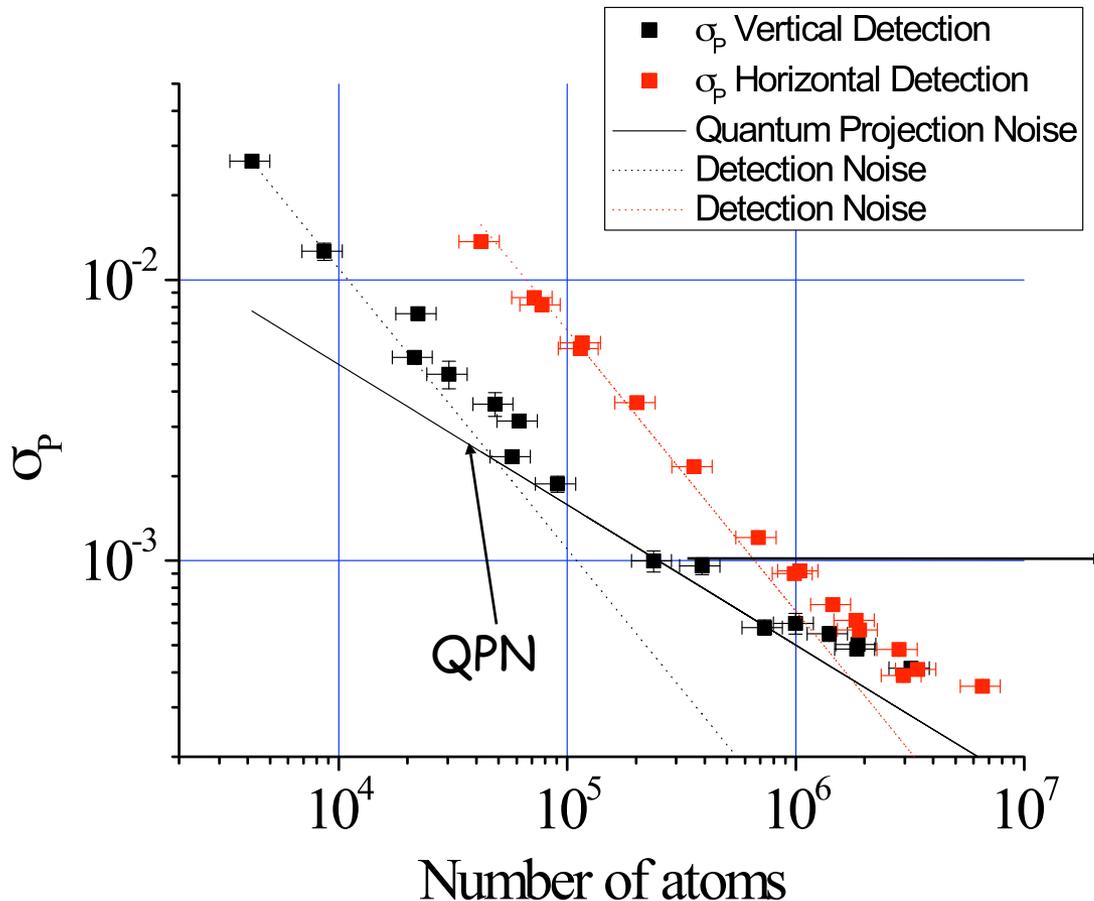
Les atomes sont dans une superposition des deux états de sortie (probabilité  $P$  d'être dans l'état  $g$  et  $1-p$  dans l'état  $e$ ) :

Mesure : projection dans l'un des deux états en fonction de  $P$

# Bruit de projection quantique

Bruit de partition sur un nombre fini de particules

$$\delta\phi = \frac{1}{C\sqrt{N}}$$



On a typiquement

$C \sim 50\%$

$N \sim 10^6$  atomes



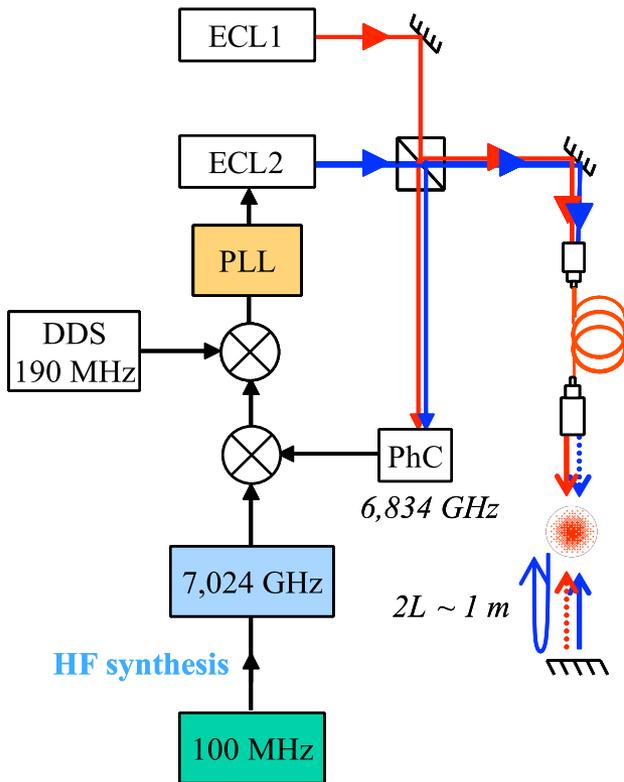
2 mrad

$5 \cdot 10^{-9} \text{g/coup}$

ou  $2.5 \cdot 10^{-9} \text{g à } 1\text{s}$

# Bruit de phase des lasers

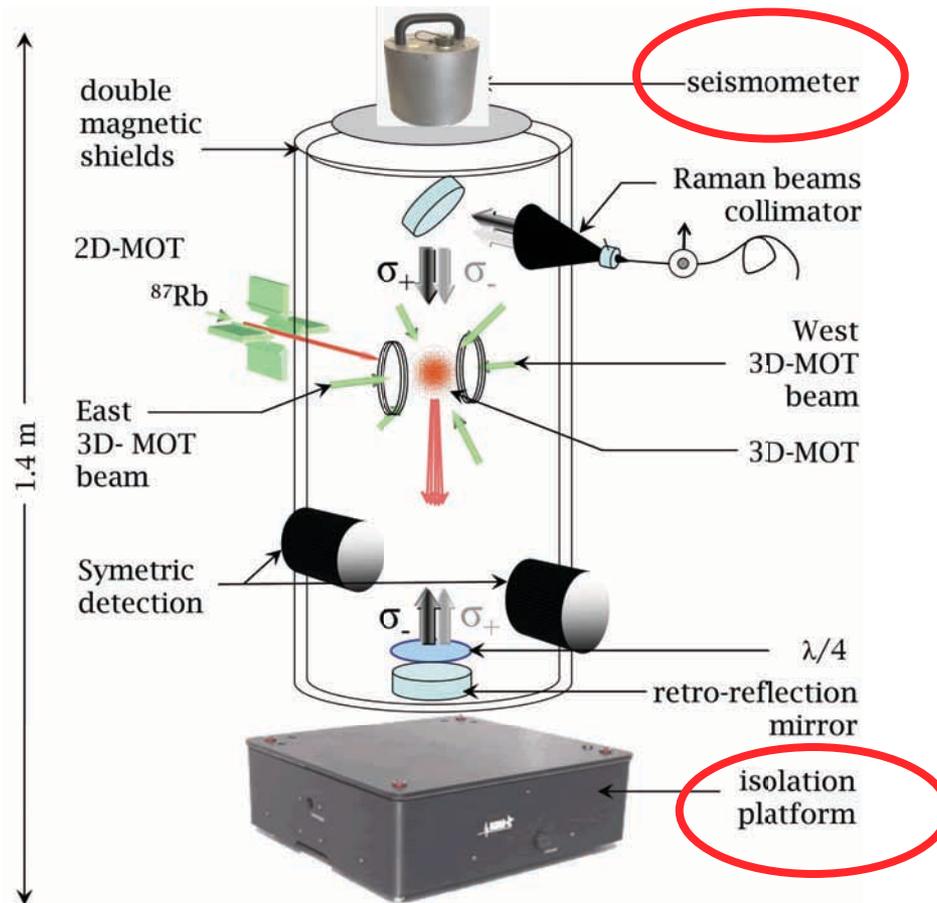
Bruit sur la règle de référence : différence de phase des lasers Raman



Source		$\sigma_{\phi}$ (mrad/ coup)	$\sigma_g$ (g/ Hz <sup>1/2</sup> )
Lasers	Référence 100 MHz	1,0	$1,3 \cdot 10^{-9}$
	Synthèse HF	0,7	$0,9 \cdot 10^{-9}$
	Résidu PLL	1,6	$2,0 \cdot 10^{-9}$
	Fibre optique	1,0	$1,3 \cdot 10^{-9}$
	Rétro-réflexion	2,0	$2,6 \cdot 10^{-9}$
	<b>Total</b>	<b>3,1</b>	<b><math>3,9 \cdot 10^{-9}</math></b>

# Vibrations

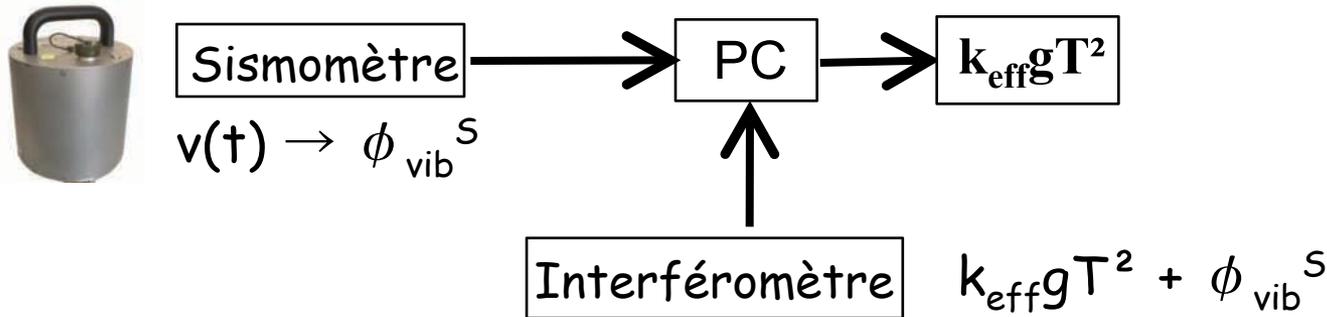
Utilisation d'une plateforme passive et d'un accéléromètre annexe pour filtrer les vibrations



Mesure avec des temps morts:  
Effet d'échantillonnage des vibrations

# Vibrations

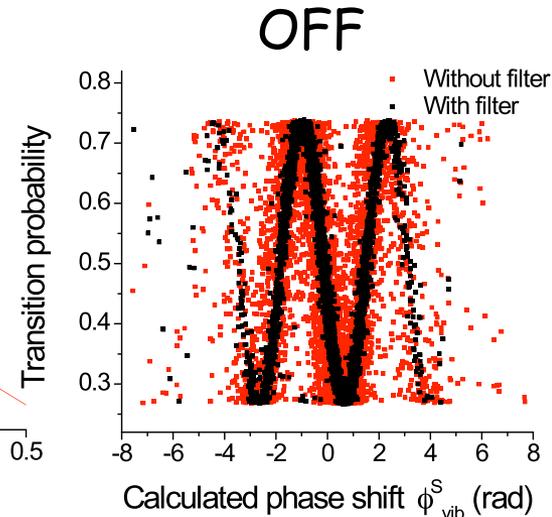
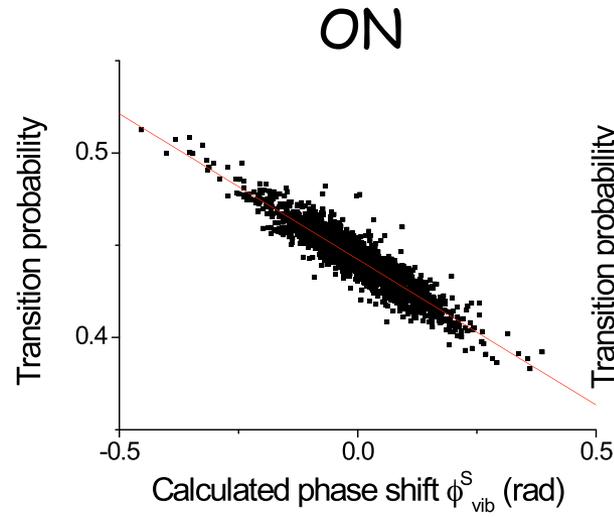
Utilisation d'un accéléromètre annexe pour filtrer les vibrations



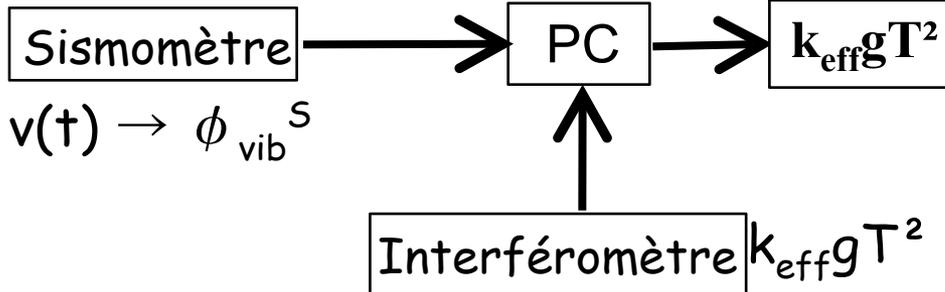
Corrélation sismo-atomes

$$\phi_{\text{vib}}^S = k_{\text{eff}} K_s \int_T^{-T} g_s(t) U_s(t) dt$$

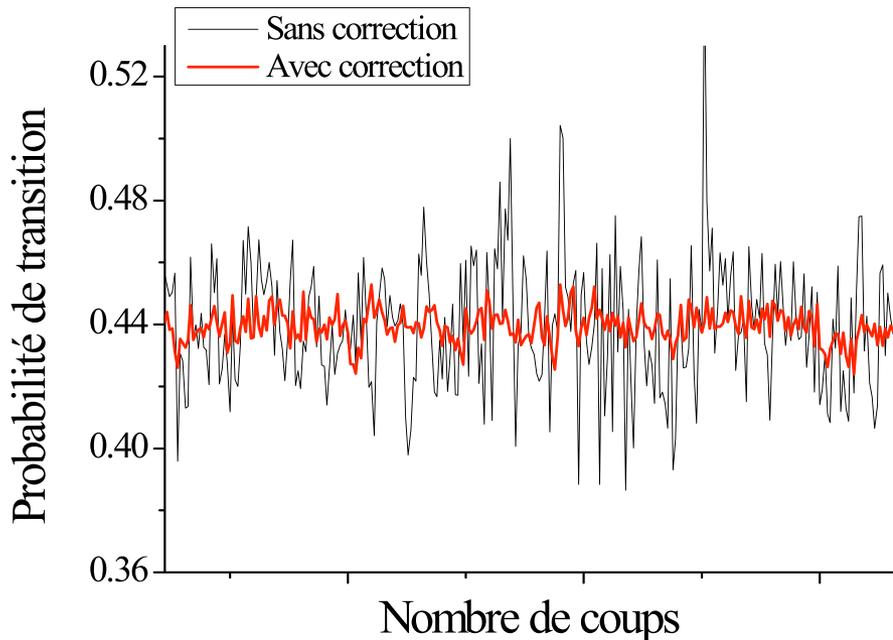
⇒ utilisation du sismomètre pour corriger la mesure des atomes



# Correction des vibrations



Application d'une correction à posteriori



Stabilités typiques

Sans correction (jour) :  $8 \cdot 10^{-8}g @ 1 s$

Sans correction (nuit) :  $5 \cdot 10^{-8}g @ 1 s$

Avec correction :  $2-3 \cdot 10^{-8}g @ 1 s$

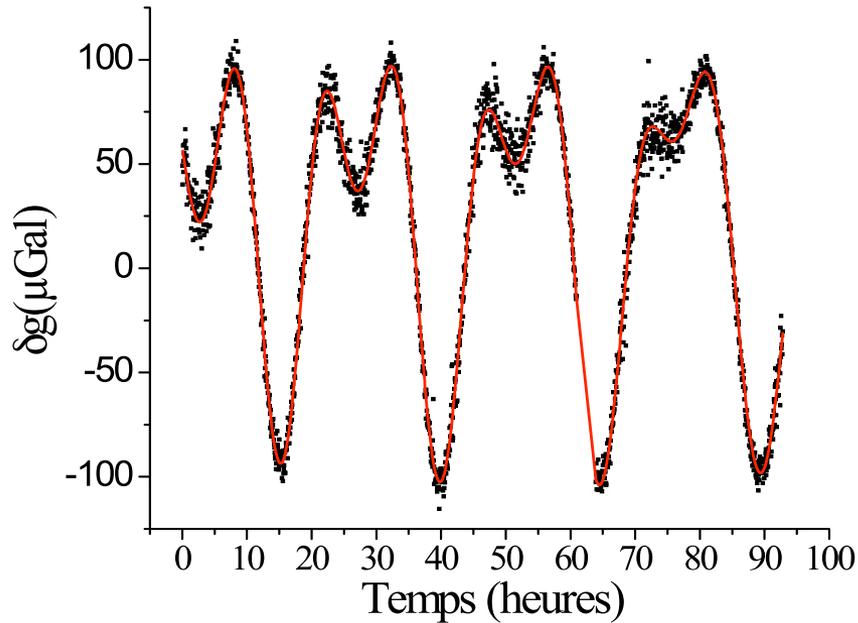
→ Gain en sensibilité  $\sim 3$

Meilleur résultat

Nuit - Clim éteinte

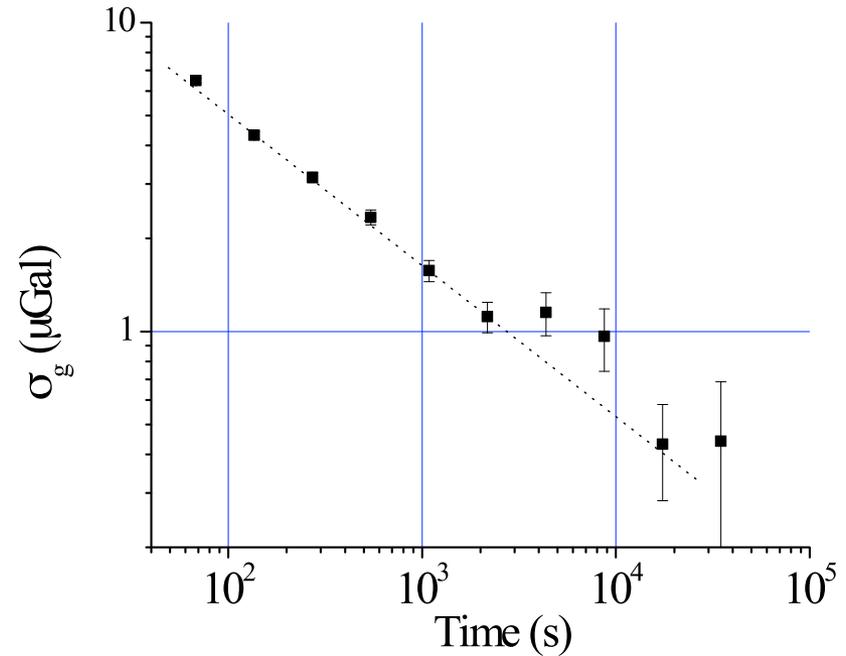
Avec correction :  $1.4 \cdot 10^{-8}g @ 1 s$

# Stabilité long terme



Excellent accord mesures-modèle de marée

Marées luni-solaires :  $\pm 100 \mu\text{Gal}$   
( $1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m.s}^{-2}$ , ou  $\sim 10^{-9} \text{ g}$ )



Stabilité long terme :  
 $< 5 \cdot 10^{-10} \text{ g}$

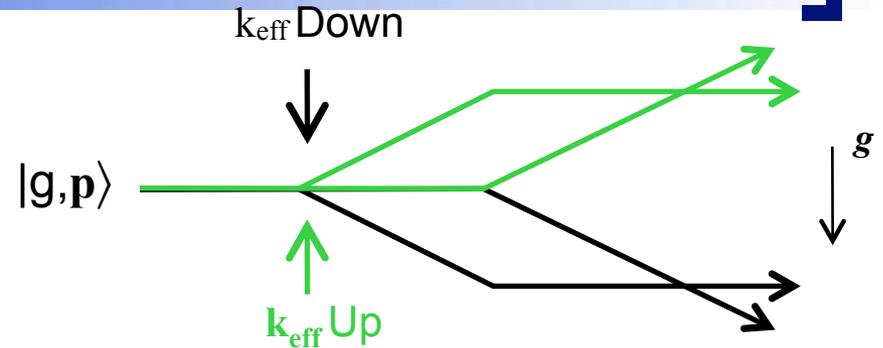
Dérive du gravimètre?  
Connaissance du modèle de marée?

# Plan

- ✓ Introduction à l'interférométrie atomique : principe et points clés
- ✓ Gravimètre atomique
  - dispositif expérimental
  - sensibilité
  - exactitude
- ✓ Applications : comparaisons avec les gravimètres macroscopiques
- ✓ Conclusion et perspectives

# Effets systématiques

$$\Phi_{\text{interf}} = -k_{\text{eff}} \cdot g T^2 + \Delta\Phi_{\text{sys}}$$



Demi-différence  $\rightarrow \Delta\Phi$  dépendent de  $k_{\text{eff}}$

Demi-somme  $\rightarrow \Delta\Phi$  indépendants de  $k_{\text{eff}}$

Alignements

Gradient de champ magnétique

Accélération de Coriolis

Déplacement lumineux (1 photon)

Aberrations des fronts d'onde

Déphasages RF

Déplacement lumineux (2 photons)

...

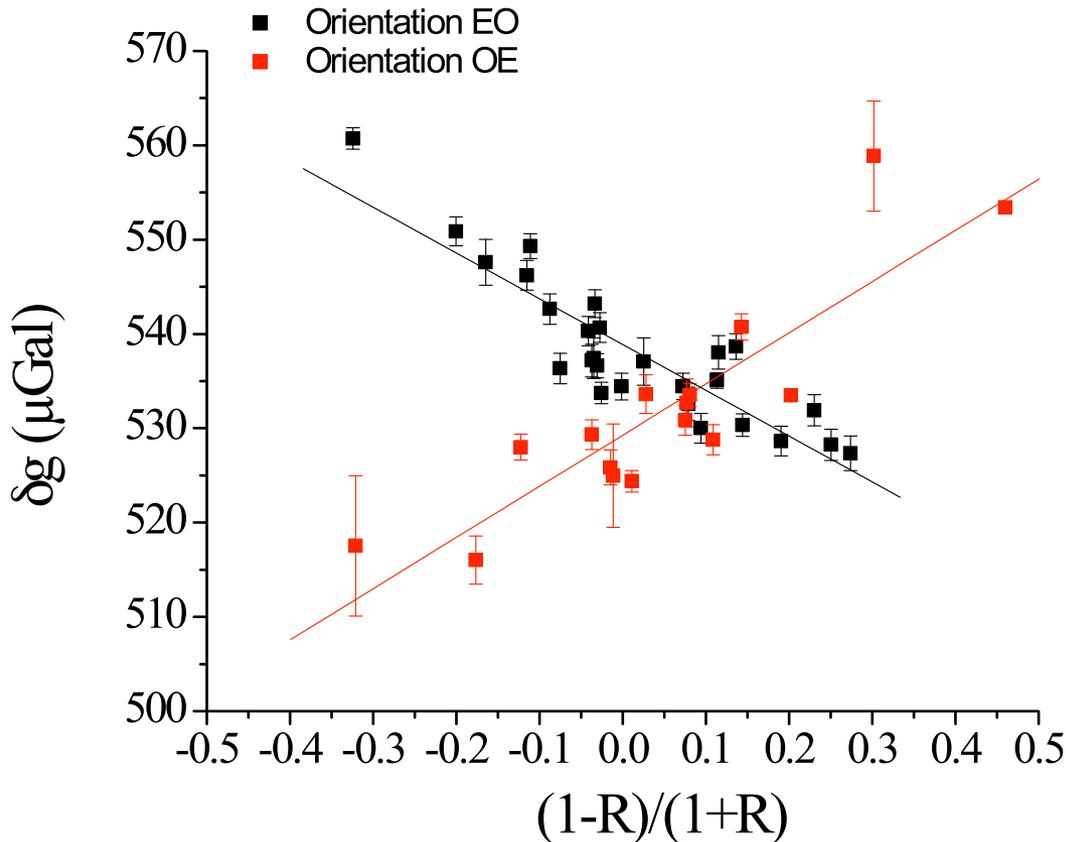
$\rightarrow$  Réjection des effets indépendants de  $k_{\text{eff}}$  en alternant  $k_{\text{eff}}$  Up/Down

# Force de Coriolis : influence de la mélasse sur le bras Est-Ouest

Vitesse résiduelle de la mélasse E/O : sensibilité à la rotation (Coriolis)

Mesure des intensités :  $R=P1/P2$

Mesure de  $g$  en fct de  $R$  pour deux orientations



Pente  $\sim \pm 0.5 \mu\text{Gal}/\%x$

$0.25 \mu\text{Gal}/\%R$

$0.25 \mu\text{m}/\text{s}/\%R$

Incertitude sur Coriolis :

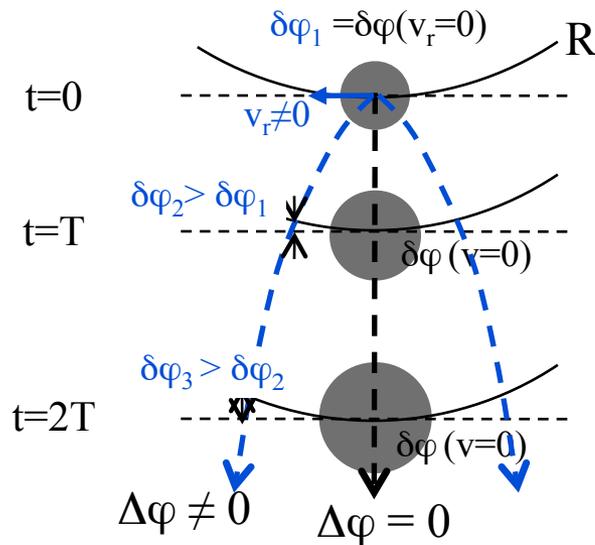
$\sim 0,5 \mu\text{Gal}$

# Défauts de front d'onde

**Cas général** : la différence des fronts d'onde des faisceaux lasers Raman n'est pas plane (gaussian beams, optics distortions ...)

**Cas d'une courbure :**

$$\delta\varphi = K \cdot r^2 \text{ (avec } K = k_1/2R\text{)}$$



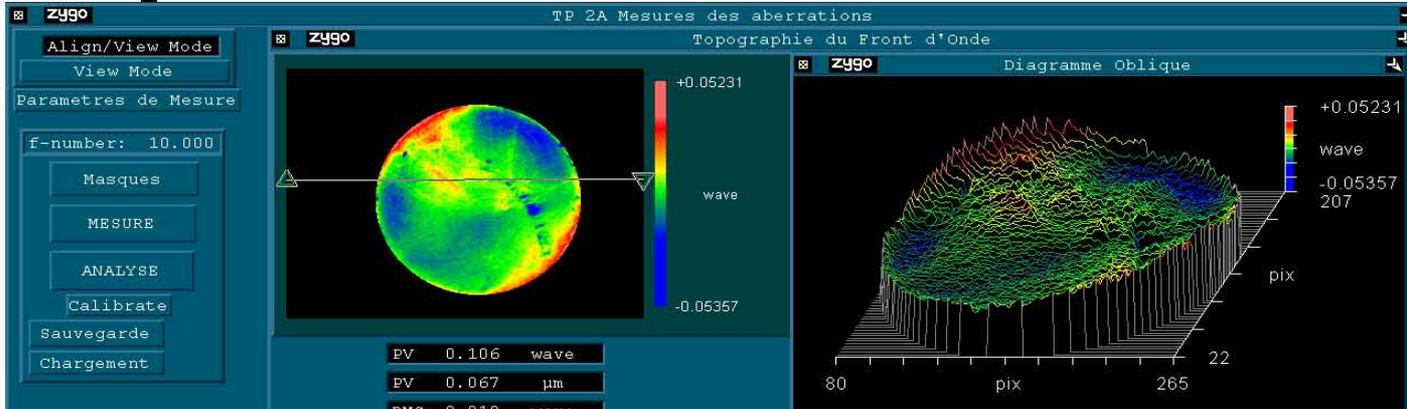
Dépendance avec la température

$$\Delta\Phi_{ab} = 2K \sigma_v^2 T^2 = 2 \frac{k_1}{R} \frac{k_B T_{at}}{m} T^2$$

Pour  $1 \mu\text{Gal}$ , avec  $T_{at} = 2 \mu\text{K}$  :  $R > 10 \text{ km}$

Planéité optique mieux que  $\lambda / 300!$

# Caractérisation des optiques



Miroir

- 40mm diamètre
- $PV = \lambda/10$
- $RMS = \lambda/100$



Simulation :

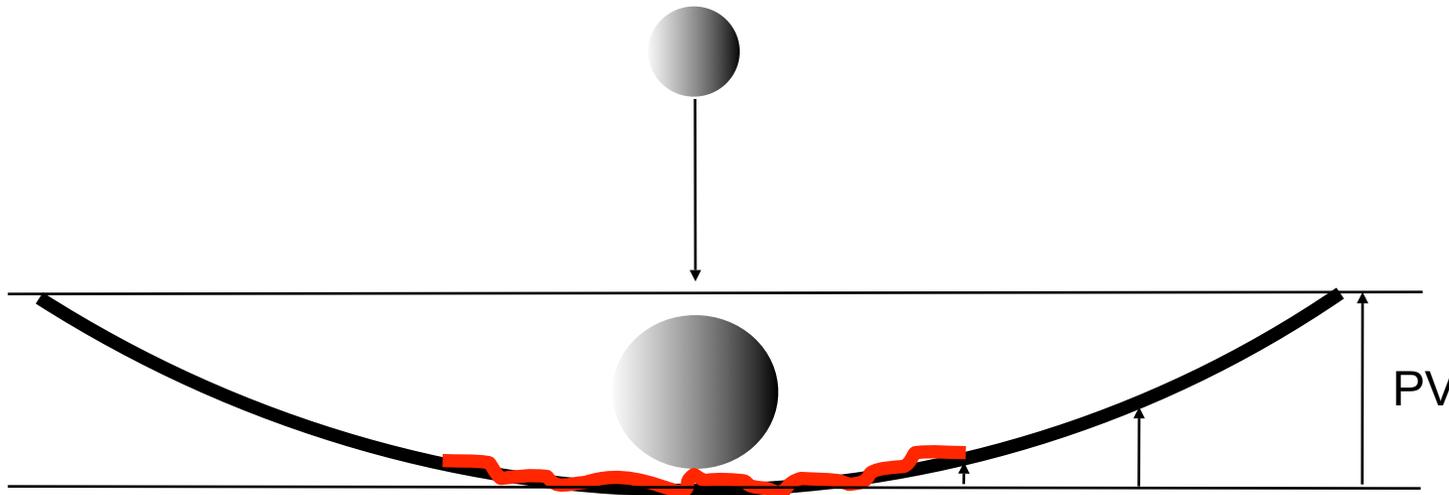
- $T = 2.5\mu K$
- $\sigma = 1.5mm$



$$\delta g/g < 1.4 \cdot 10^{-9}$$

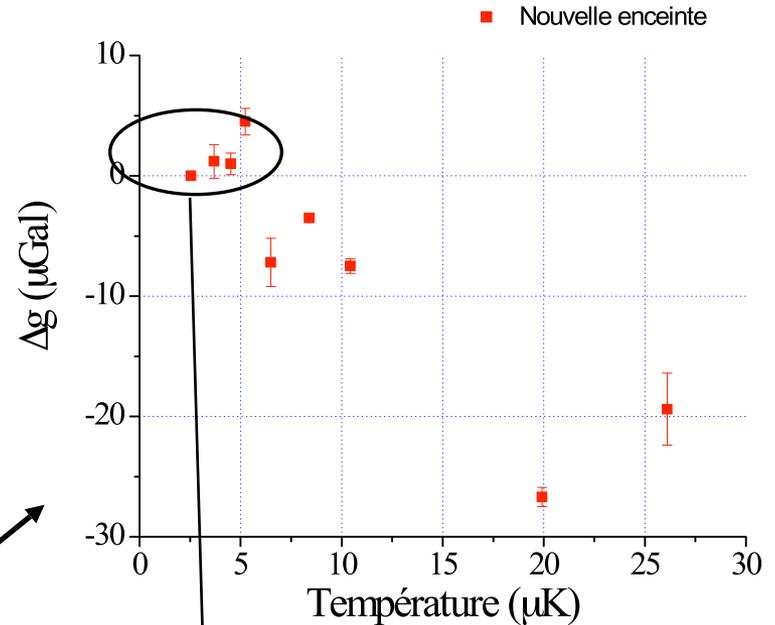
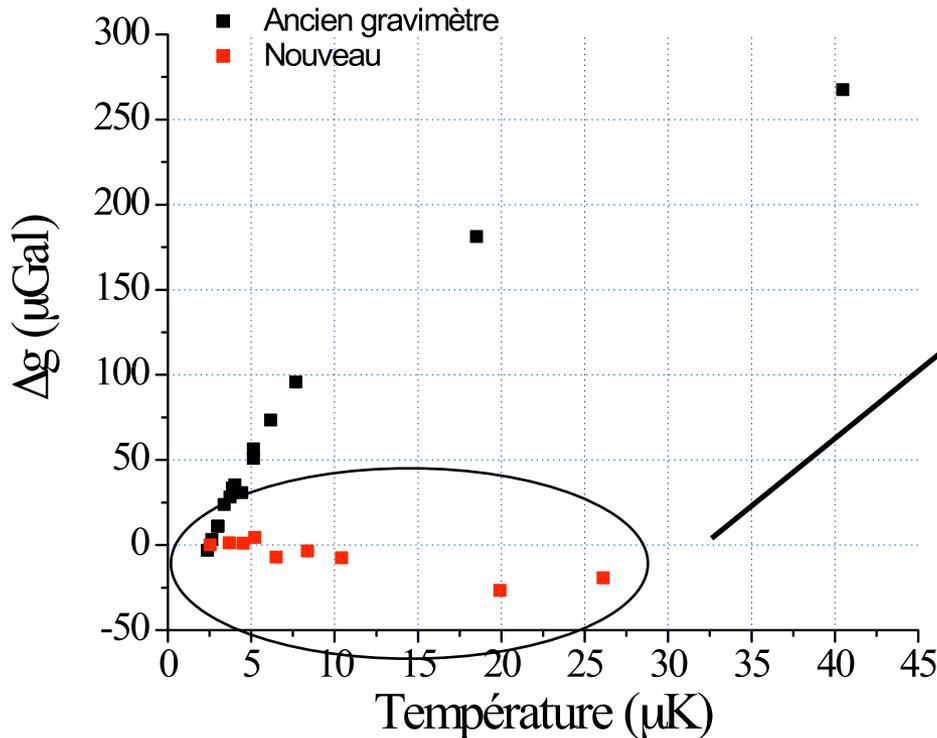
$$\lambda/4$$

$$\delta g/g < 8 \cdot 10^{-9}$$



# Influence de la température

## Mesures préliminaires



Réduction  
par un ordre de grandeur

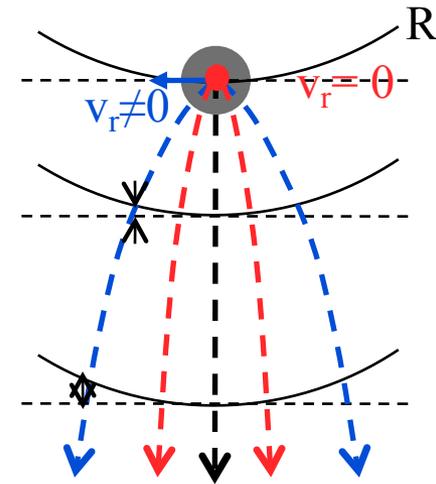
Extrapolation à  $t^{\circ}$  nulle :  $\pm 3 \mu\text{G}$

# Exactitude

- ✓ Défauts de front d'onde (dominant) :  $3 \mu\text{Gal}$ 
  - varie de façon non prédictive avec T  
(indépendant pour une courbure)
- ✓ Bilan des autres termes à refaire :
  - accélération de Coriolis (rotation) :  $< 1 \mu\text{Gal}$
  - déplacement lumineux à deux photons :  $\sim 1 \mu\text{Gal}$
  - défaut de verticalité :  $< 1 \mu\text{Gal}$
  - Gravité auto-induite : qq  $0,1 \mu\text{Gal}$  (à vérifier)
- ✓ But visé  $< 1 \mu\text{Gal}$

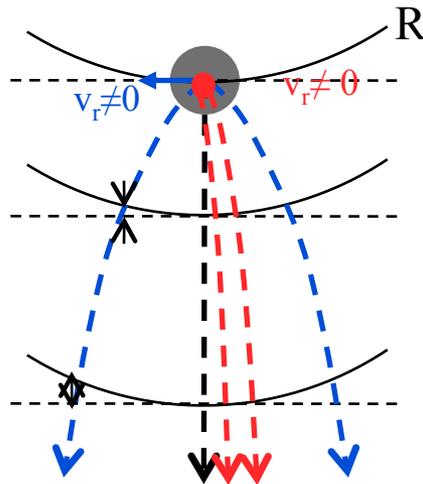
# Exactitude : améliorations

- ✓ Atomes ultra-froids (BEC: condensat de Bose-Einstein)
  - **Meilleure définition de la source** atomique : limite les effets systématiques liés aux défauts de front d'ondes
    - position initiale bien définie et stable
    - **vitesse initiale nulle** (refroidissement dans le piège non dissipatif)
    - **température réduite** (de l'ordre de 100 nK) puis extrapolation à  $t^\circ$  nulle



# Exactitude : améliorations

- ✓ Cartographie des défauts de front d'onde
  - Déplacement de la position initiale du piège
  - sélection d'une classe de vitesse transverse



- ✓ Possibilité de vérifier la consistance de l'exactitude avec le même appareil

# Plan

- ✓ Introduction à l'interférométrie atomique : principe et points clés
  
- ✓ Gravimètre atomique
  
- ✓ Applications :
  - Application à la balance du watt
  - comparaisons avec les gravimètres macroscopiques
  - Application en géophysique
  
- ✓ Conclusion et perspectives

# Application des gravimètre atomiques

## Stabilité long terme et exactitude

- Physique fondamentale, métrologie

- mesure de  $\alpha$ ,  $G$ ...

- test de la gravité

- test EP, de la gravité, Détection d'ondes gravitationnelles

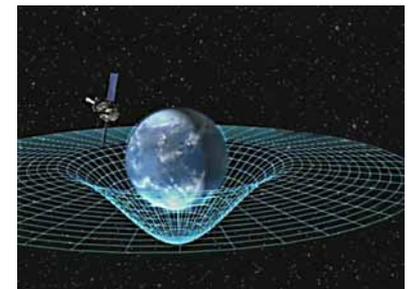
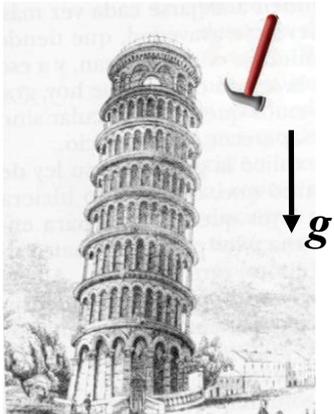
- **balance du watt** (gravimètre)

- Géophysique (au sol ou dans l'espace)

- Effets de marée, cartographie du champ de gravité, suivie des nappes phréatiques, recherche pétrolière ...

- **Navigation inertielle** satellite, sous-marin...

- (navigation sur carte)



# Laboratoires, cartographie et modélisation des variations de $g$

A l'aide d'un gravimètre relatif Scintrex CG-5

- Détermination des paramètres de marées

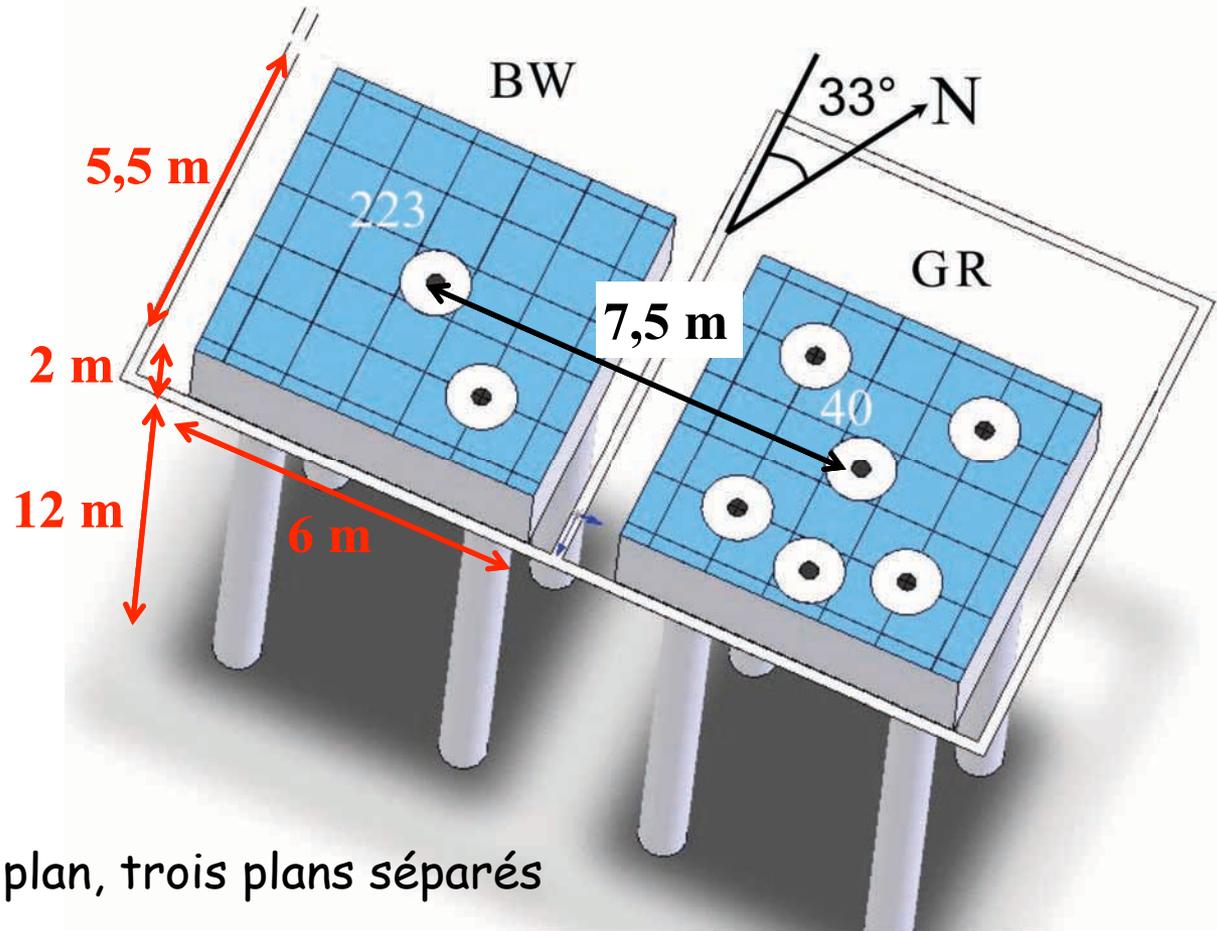
- Mesures de liens

- Cartographie 3D

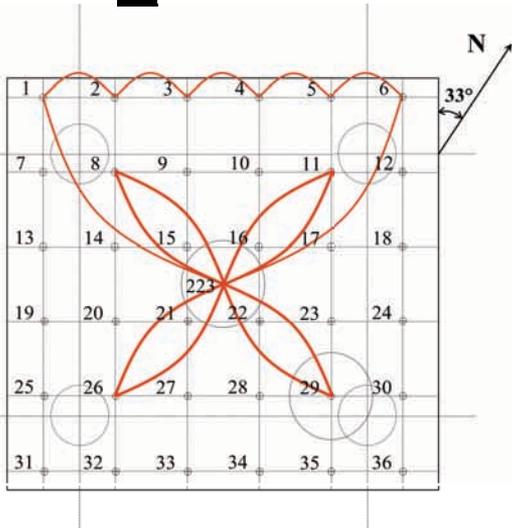
- Modélisation 3D

- 74 stations dans un même plan, trois plans séparés de 50 cm

- Vérification par des comparaisons avec des gravimètres absolus type FG



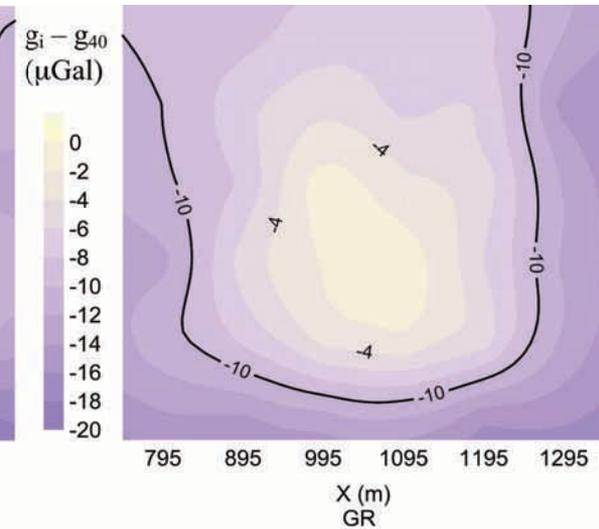
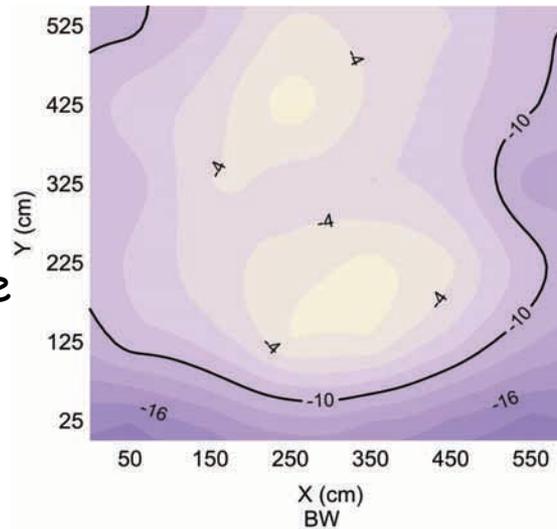
# Cartographie



Liens entre les dalles entre différentes stations  
durant 6 mois :  $sd(\Delta_{centres}) = 0.2 \mu\text{Gal}$

Modélisation dans tout le volume  
(70 m<sup>3</sup>) à mieux que 3  $\mu\text{G}$

De point à point:  $\ll 1 \mu\text{G}$

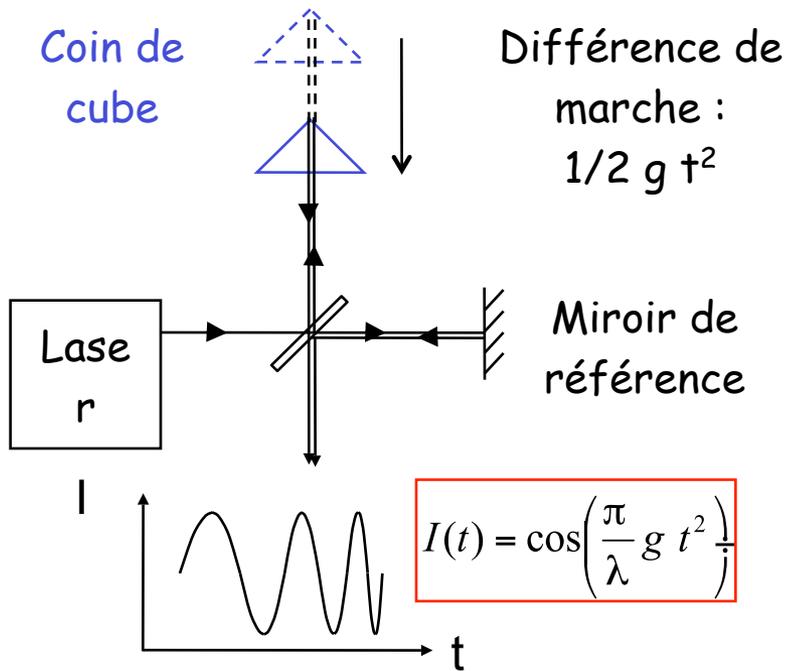


# Plan

- ✓ Introduction à l'interférométrie atomique : principe et points clés
- ✓ Gravimètre atomique
- ✓ Applications :
  - Application à la balance du watt
  - comparaisons avec les gravimètres macroscopiques
  - Application en géophysique
- ✓ Conclusion et perspectives

# Les gravimètres optiques

**Principe** : interféromètre de Michelson avec un coin de cube en chute libre



Exactitude :  $2 \cdot 10^{-9} g$

FG5

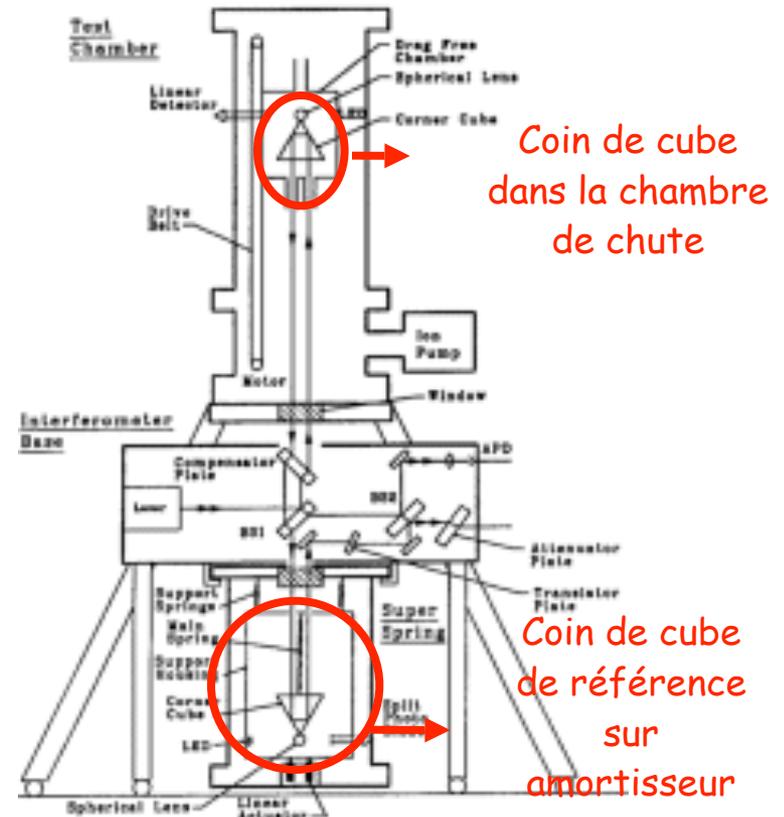


Schéma de principe

([http:// www.microgsolutions.com](http://www.microgsolutions.com))

# Comparaison "Coin de cube/Atomique"

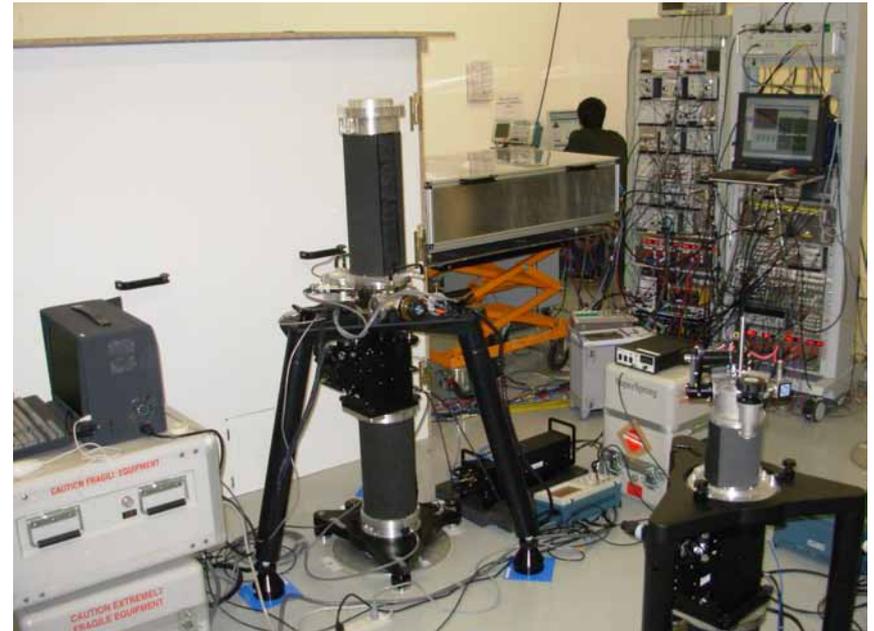
	Coin de cube	Atomes
Vibrations synchrones	Elevées	Faibles
Taux de répétition	Faible ~ 0,1 Hz	Elevé ~ 4 Hz
Vieillessement	Usure du chariot	Lasers
Technologie	Mature	En évolution

- ✓ Tx de répétition élevé : accès à une nouvelle gamme de fréquences pour les gravimètres absolu
- ✓ Pas d'usure mécanique : donne accès à des mesures en continu sur des périodes longues

# Déménagement



# Installation au BIPM



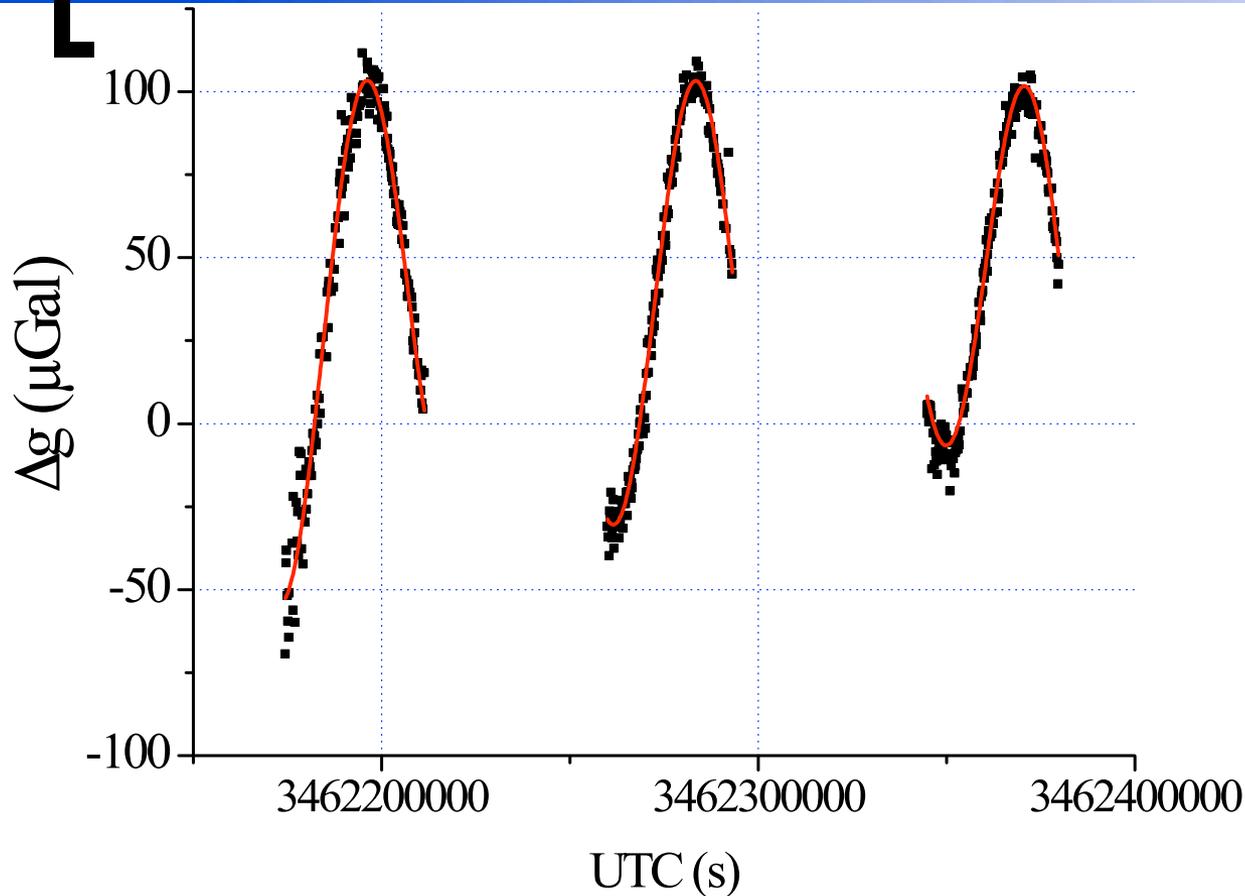
# Réglages



[ Ça marche !!! ]



# Mesures sur le point B du BIPM



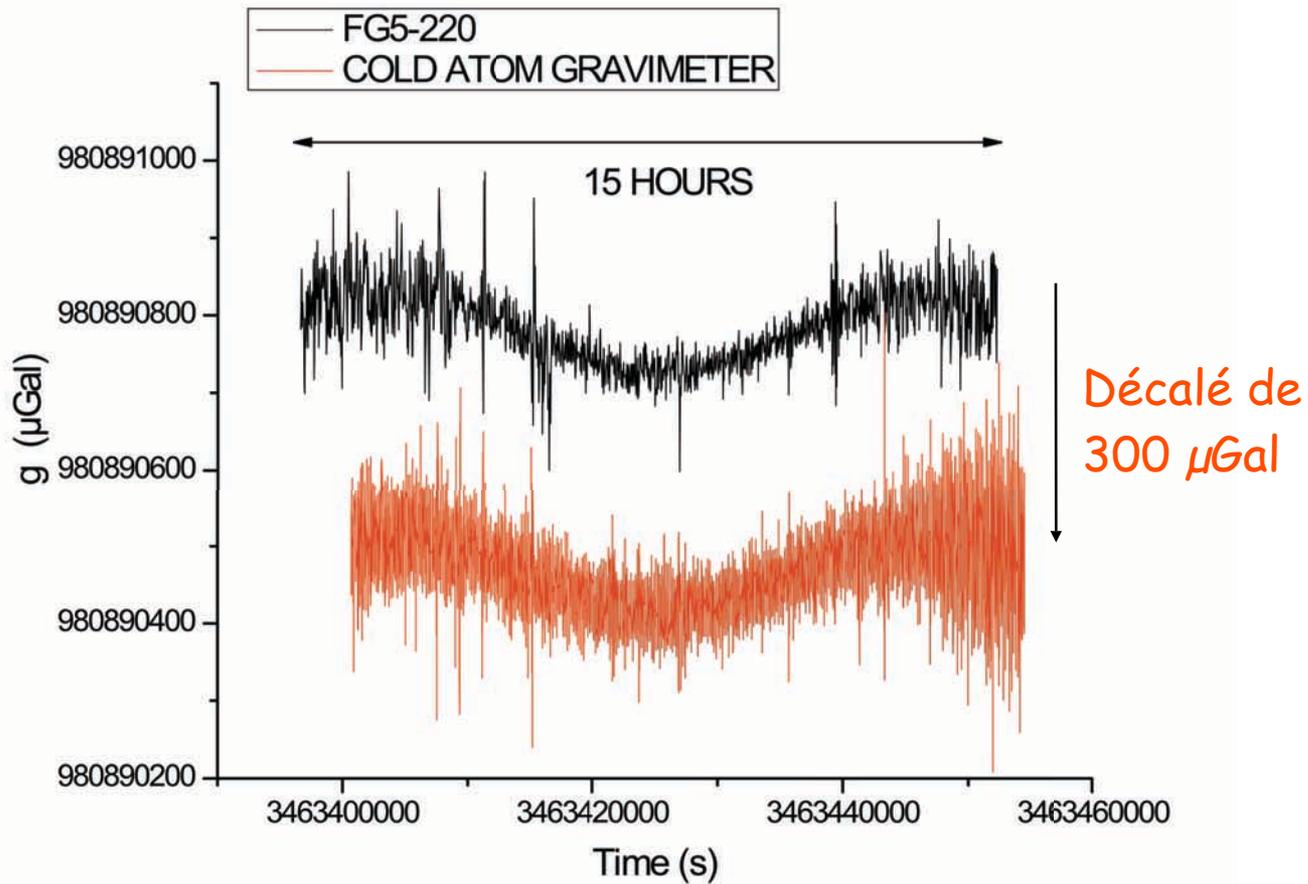
17-18-19 Sept

1 point  
=  
200 coups  
 $\approx$   
1 minute

Excellente stabilité long terme : même valeur à  $\pm 1 \mu\text{Gal}$   
Résultats de la comparaison en cours d'analyse

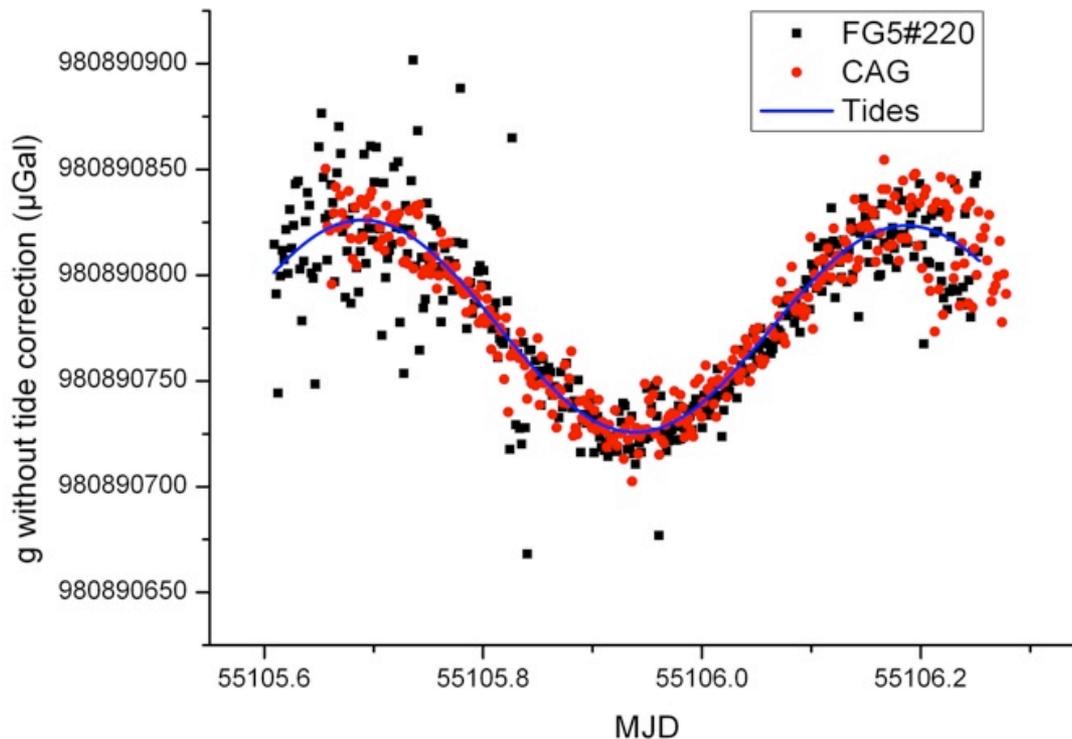
# Comparaison à Trappes

29 Sept- 2nd Oct : FG5 220 : Ludger Timmen and Olga Gitlein, Hanover  
FG5 : 1 point toutes les 30 s, CAG : 3 points/s



# Comparaisons à Trappes :

- ✓ Après correction Marée, Polar, Baro, Ocean Loading :  
 $g_{FG5@G40}=980890741(1)$



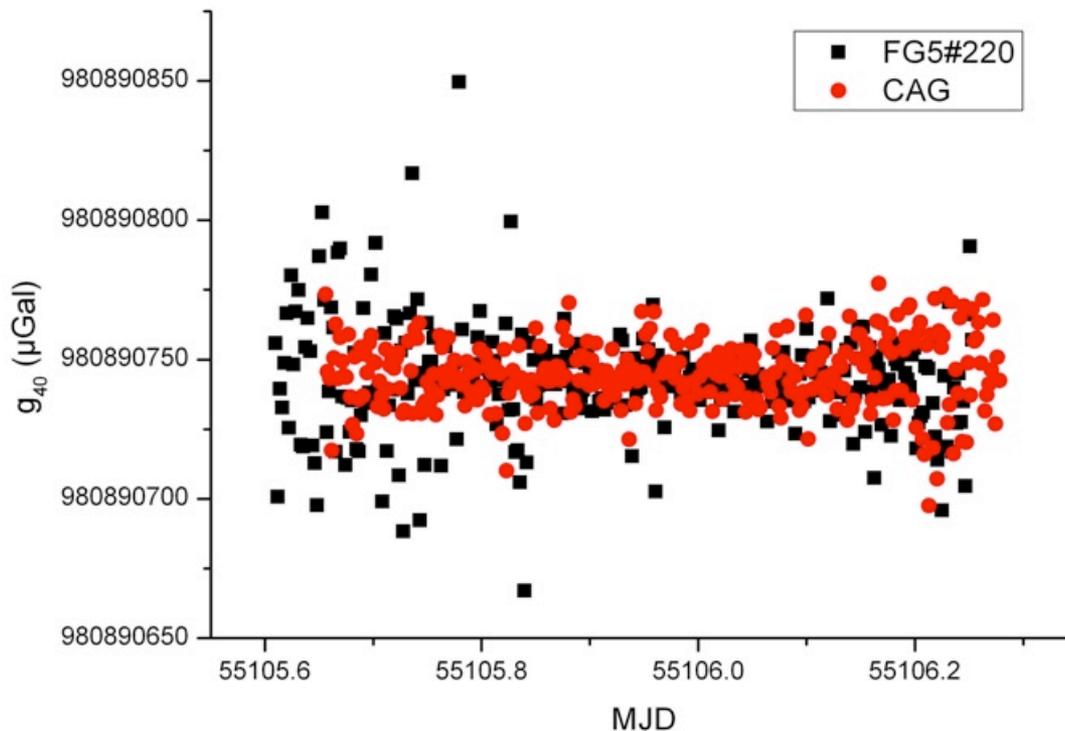
Accord à  $4 \mu\text{Gal}$

Exactitude à  $6 \mu\text{Gal}$

Depuis le 1<sup>er</sup> octobre: Exactitude estimée à  $3 \mu\text{Gal}$

# Comparaisons à Trappes :

- ✓ Après correction Marée, Polar, Baro, Ocean Loading :  
 $g_{FG5@G40}=980890741(1)$



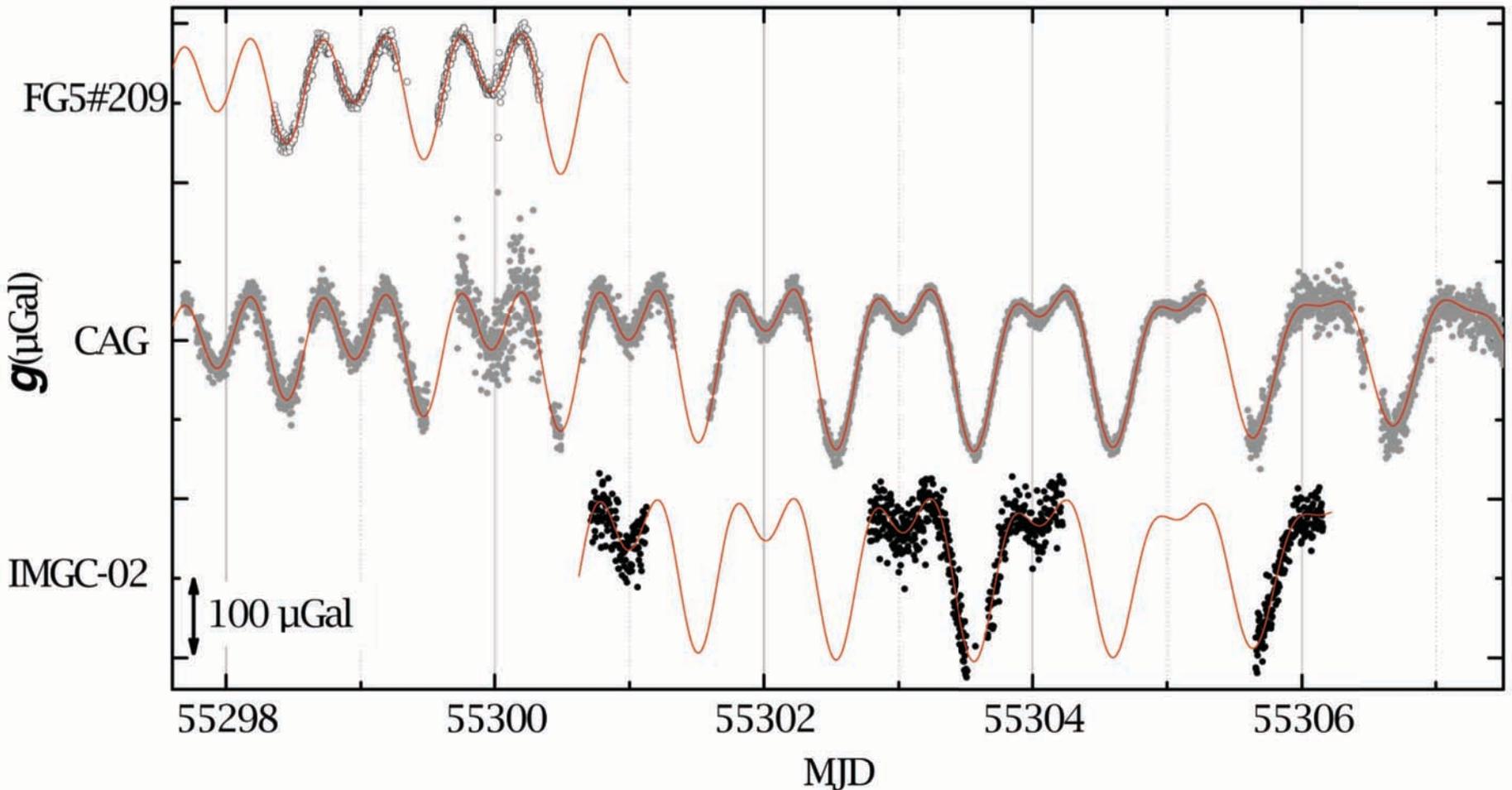
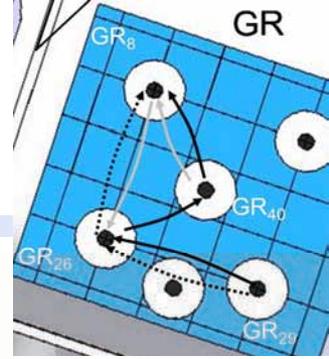
Accord à 4  $\mu\text{Gal}$

Exactitude à 6  $\mu\text{Gal}$

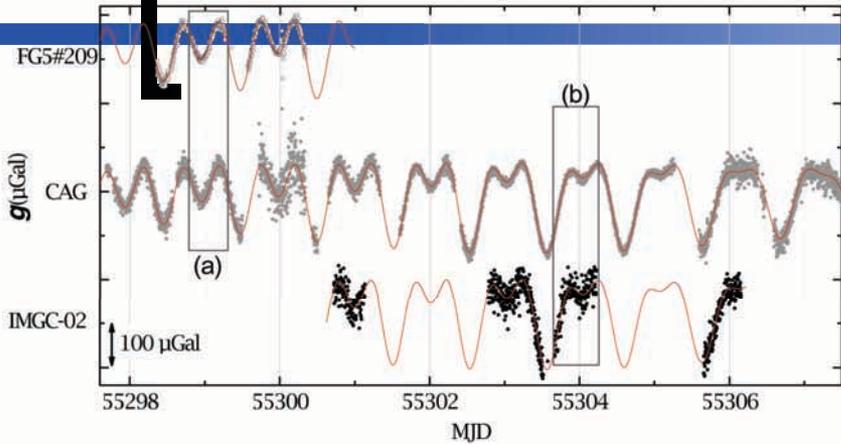
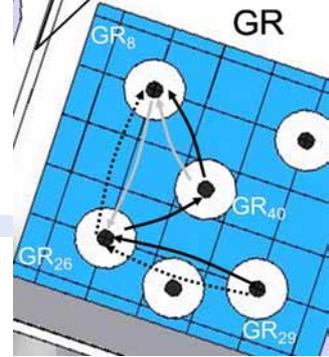
Depuis le 1<sup>er</sup> octobre: Exactitude estimée à 3  $\mu\text{Gal}$

# Mesures pendant 10 jours

Comparaison du 11 au 21 avril 2010

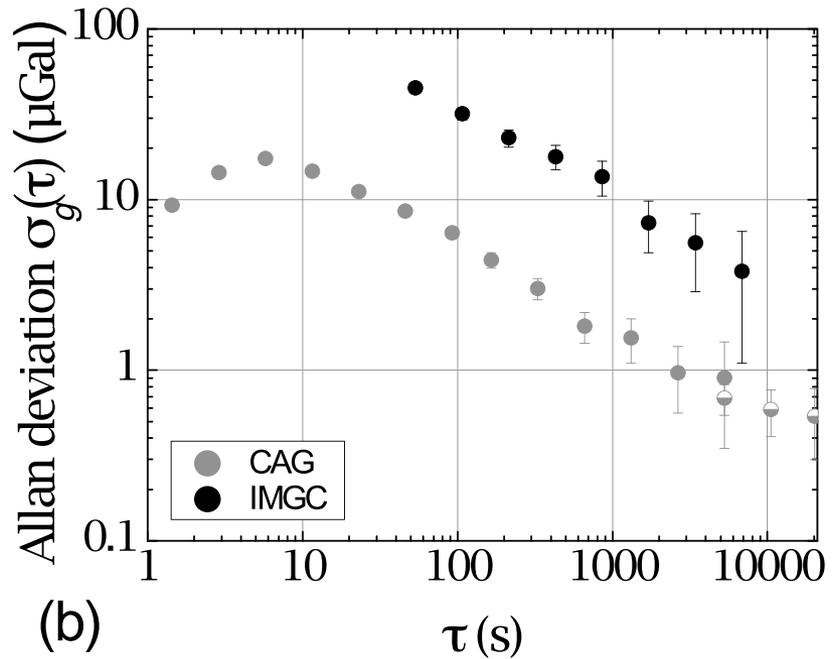
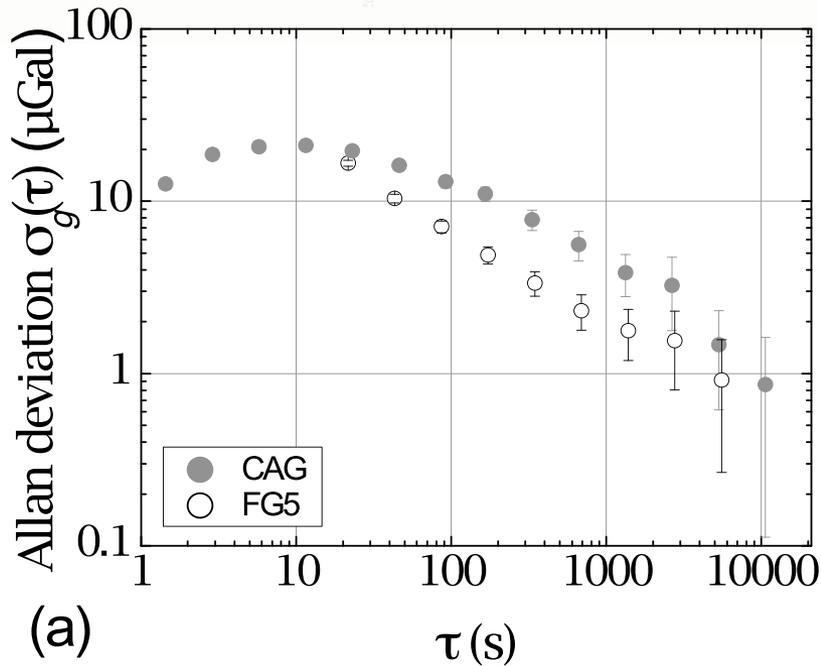


# Stabilité



White noise

- At 1 s :
- FG5#209 70  $\mu\text{Gal}$
  - IMGC-02 330  $\mu\text{Gal}$
  - CAG 140  $\mu\text{Gal}$  (a)
  - 60  $\mu\text{Gal}$  (b)



# Plan

- ✓ Introduction à l'interférométrie atomique : principe et points clés
- ✓ Gravimètre atomique
- ✓ Applications :
  - Application à la balance du watt
  - comparaisons avec les gravimètres macroscopiques
  - Application en géophysique
- ✓ Conclusion et perspectives

# Géophysique : gravimétrie de terrain

alternatives aux technologies standard (gravimètres à coin de cube et relatifs à ressort)

- ✓ **Taux de répétition élevé**
  - s'affranchir des plateformes anti-vibrations
  - possibilité de fonctionner en environnement perturbé (embarquable)
- ✓ **Mesures en continu** : pas de vieillissement mécanique
- ✓ Possibilité d'une tête de capteur réduite et déportée (mesures dans des puits)
- ✓ **Nécessite une simplification des dispositifs**

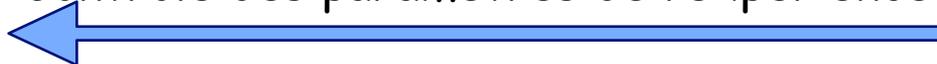
# Architecture d'un senseur inertiel



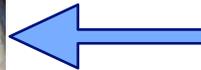
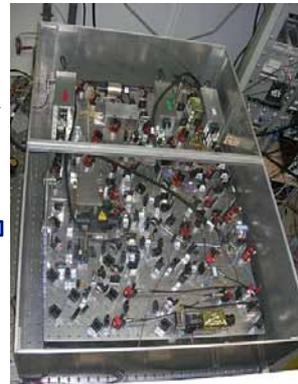
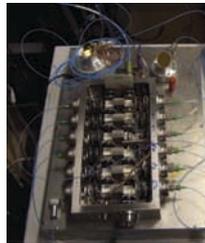
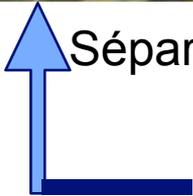
acquisition et traitement des signaux



Contrôle des paramètres de l'expérience



Séparation des faisceaux



Contrôle des paramètres laser



Systeme complexe impliquant toutes des technologies différentes (laser, optique intégré, électronique, vide ...).

Aucun composant "standard" disponible en version miniature et intégrée.

Actuellement : appareil "encombrant" et lourd.

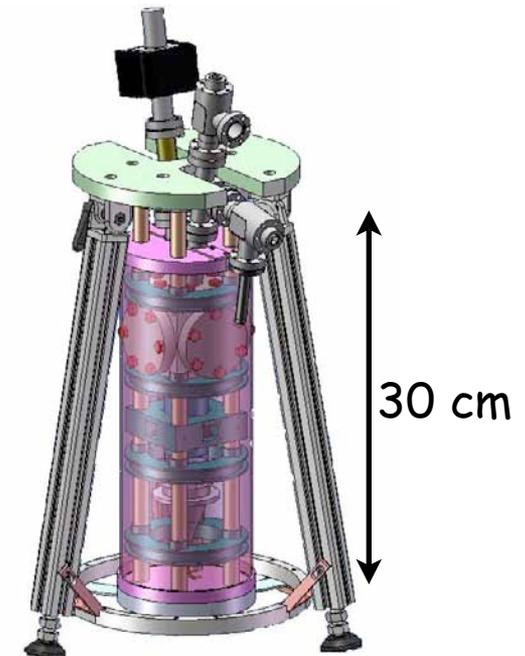
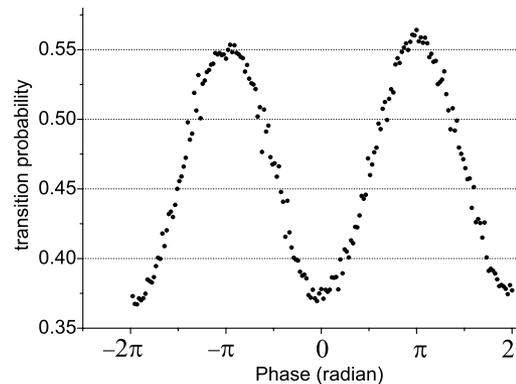
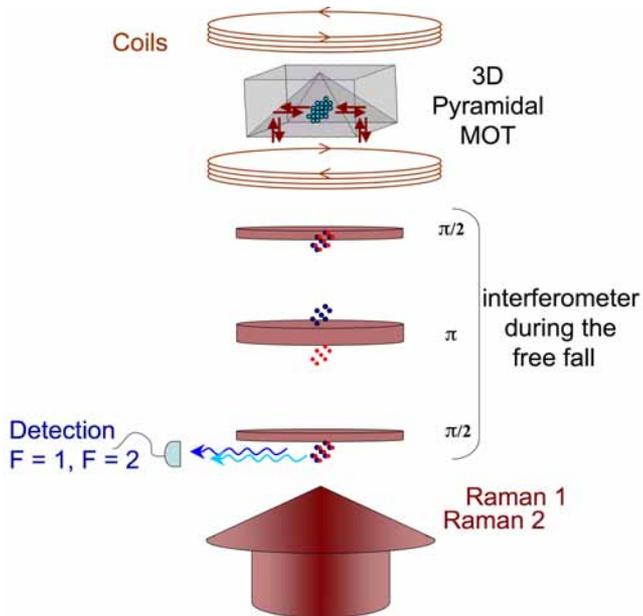
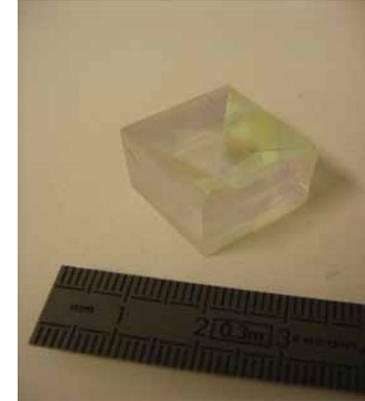
# Points techniques

- ✓ "Tête" du senseur : nouvelle architecture
  - => Reduction of the size
- ✓ Lasers : laser télécom
  - Composants commerciaux
  - Systeme tout fibré
  - Fiabilité des composants télécom
- ✓ Filtrage des vibrations : corrélation un accéléromètre macroscopique (sismomètre...)

# Gravimètre compact

Caractéristiques : réduction drastique de la complexité

- ✓ 1 seul faisceau (piège, interfé., détection)
- ✓ une puissance laser "faible" : 50 mW
- ✓ taille physique très réduite (2l)



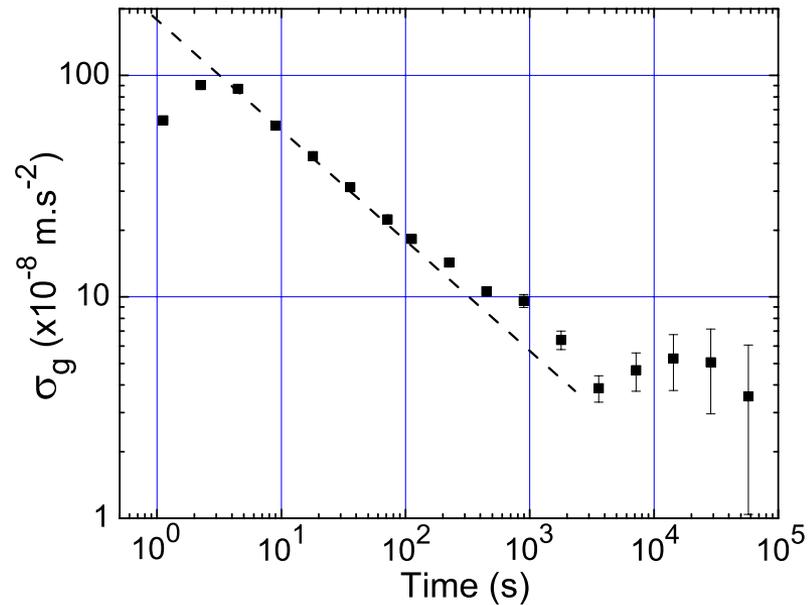
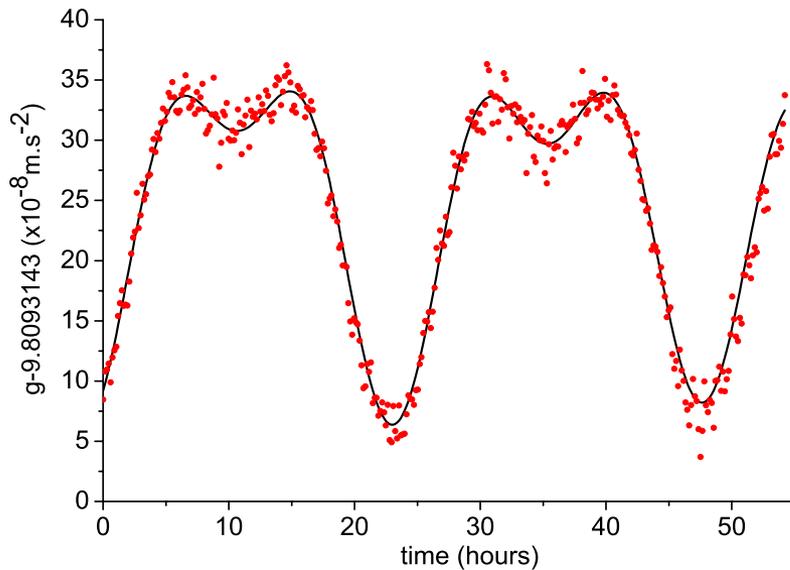
# Gravimètre compact

Expérience de démonstration (fréquence de cycle 2Hz)

Performances *proches de l'état de l'art*

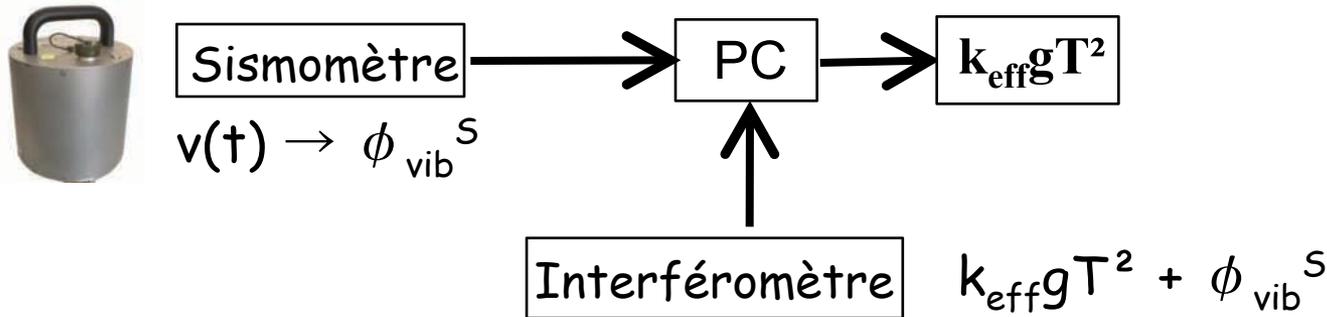
Sensibilité :  $170 \mu\text{Gal}$  en 1s

Stabilité long terme  $5 \mu\text{Gal}$



# Vibrations

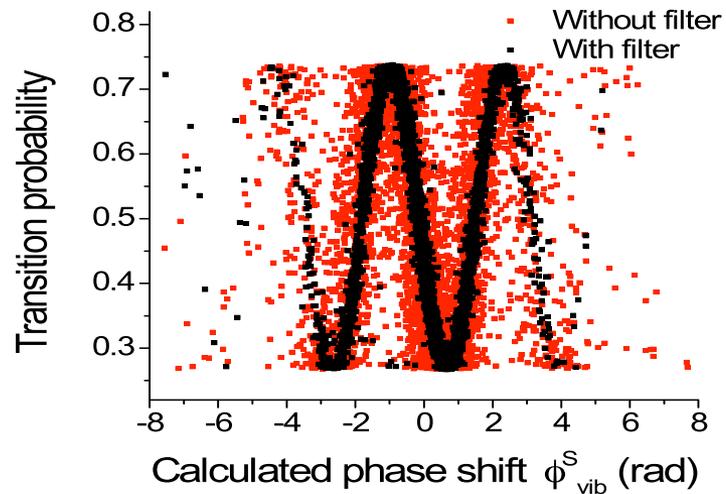
Utilisation d'un accéléromètre annexe pour filtrer les vibrations



Corrélation sismo-atomes

$$\phi_{\text{vib}}^s = k_{\text{eff}} K_s \int_T^{-T} g_s(t) U_s(t) dt$$

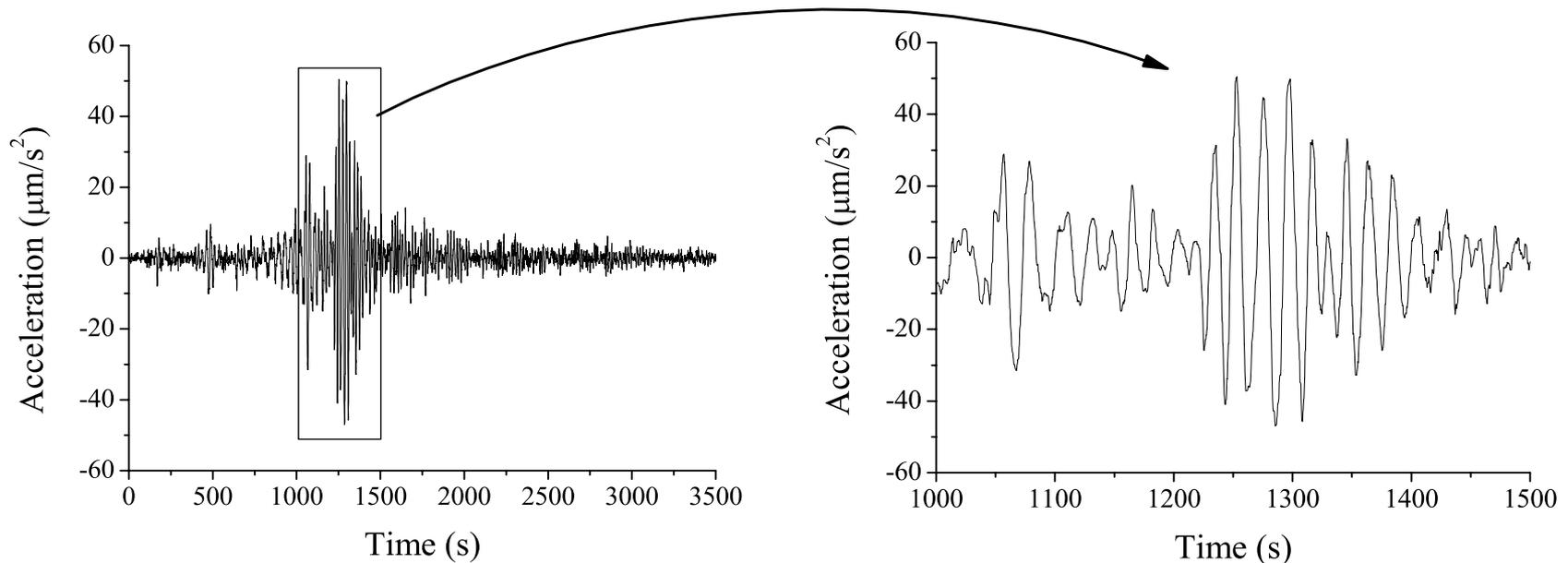
⇒ utilisation du sismomètre pour corriger la mesure des atomes



# Mesures sans isolation des vibrations

Grande simplicité de mise en oeuvre

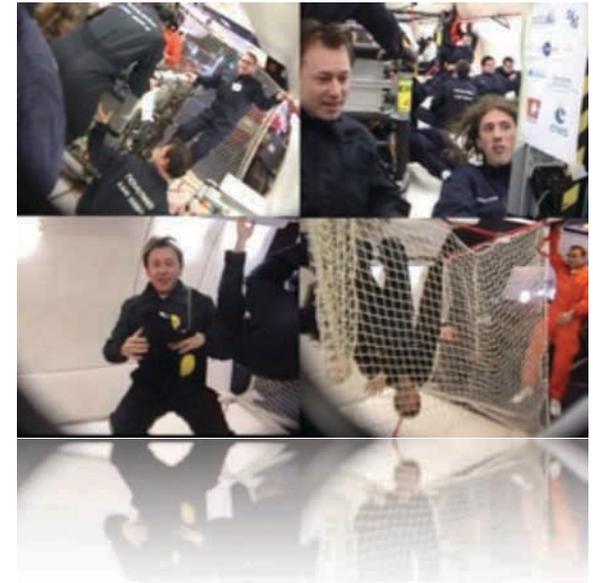
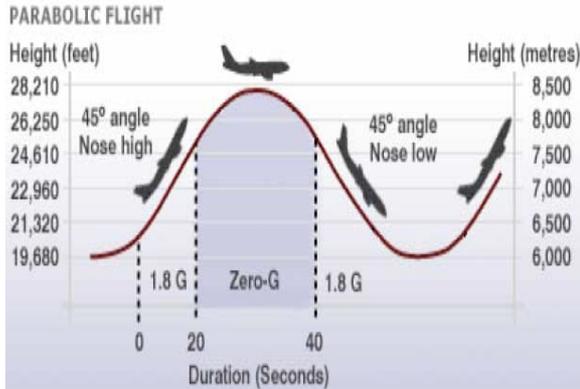
Corrélation avec le sismomètre : sensibilité de  $5 \cdot 10^{-8} \text{ g/Hz}^{1/2}$  (de nuit et dans Paris au lieu de  $2 \cdot 10^{-6} \text{ g/Hz}^{1/2}$ )



Tremblement de terre en Chine le 20 mars 2008 (magnitude 7,7)

# ICE : Accéléromètre dans l'avion O-g du CNES

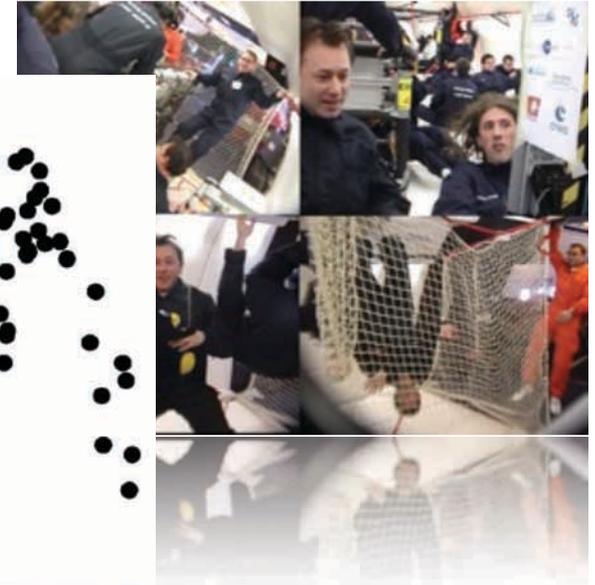
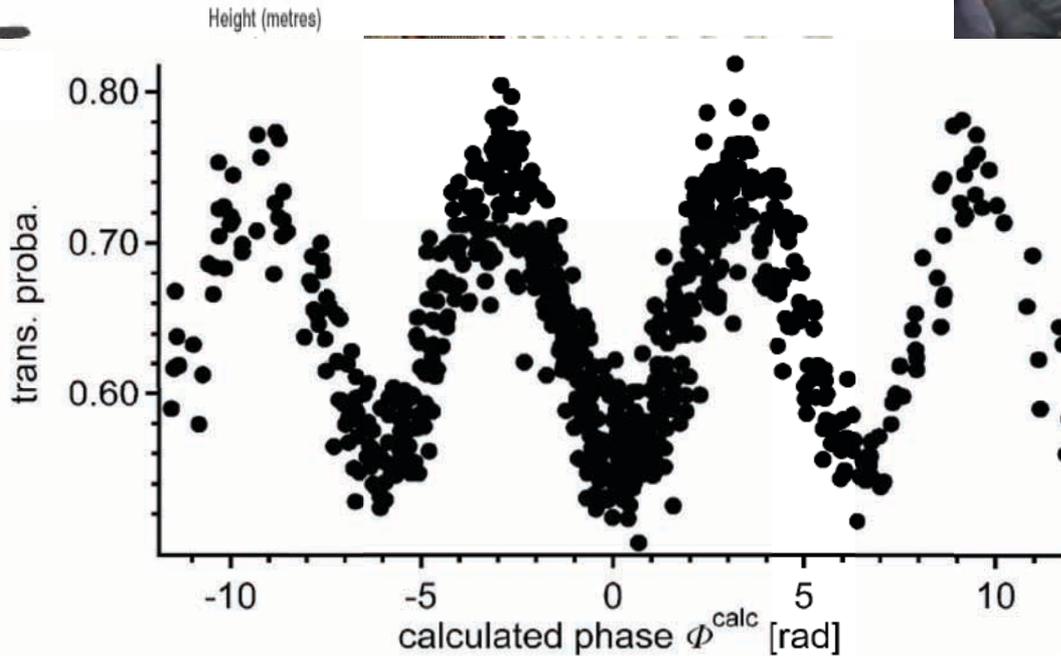
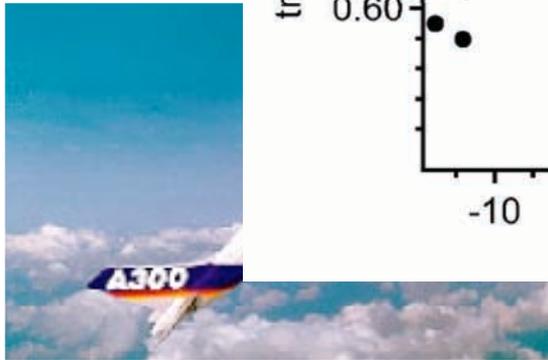
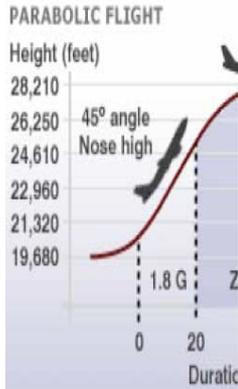
Collaboration avec LCFIO et ONERA



- 20 secondes de 0-g par parabole.
- phase 1-g entre les paraboles

# ICE : Accéléromètre dans l'avion O-g du CNES

Collaboration avec LCFIO et ONERA



Mesure pendant les phases 0-g ou 1-g

Démonstration de sensibilité (1s) :

accord avec l'accéléro mécanique : 100 mGal

sensibilité propre : 10 mGal

- $\ll 0$  secondes de 0-g par parabole.
- phase 1-g entre les paraboles

# Plan

- ✓ Introduction à l'interférométrie atomique : principe et points clés
- ✓ Gravimètre atomique
- ✓ Applications : comparaisons avec les gravimètres macroscopique
- ✓ Conclusion et perspectives

# Conclusion et perspectives

- ✓ **Performance à l'état de l'art en exactitude**
  - exactitude actuelle  $3\mu\text{Gal}$
  - exactitude visée  $<1\mu\text{Gal}$
- ✓ **Développements de gravimètre atomique compact**
  - gravimétrie de terrain
  - gravimétrie souterraine
- ✓ **Emparquabilité :**
  - gravimétrie marine et aéroportée (sensibilité réduite)
  - gravimétrie spatiale :
    - ▶ gain importante en sensibilité ( $\nearrow T^2$  et réduction des vibrations parasites)
    - ▶ Test du principe d'équivalence (ICE, MWXG)
    - ▶ Mesures avec des instruments "absolus" : sans biais ni dérive de biais

# [ gradiométrie ]

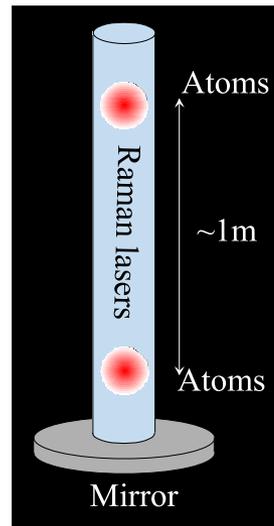
- ✓ Mesure différentielle => s'affranchir des vibrations (mesures par rapport au même miroir de rétro-réflexion) et des dérives

## Gradiomètre

Kasevich :

– Sensibilité:  $3 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-2}/\sqrt{\text{Hz}}$

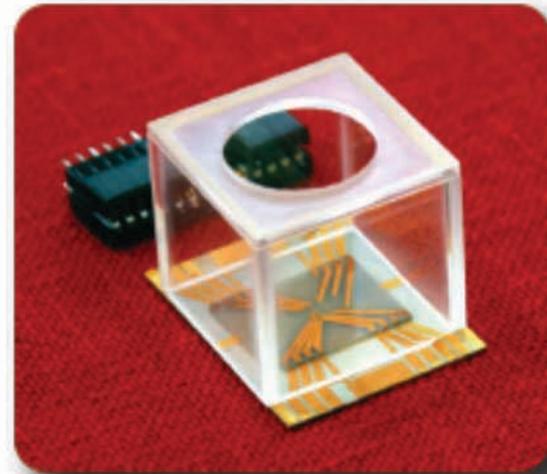
Mesure de  $G$



# Sources ultra-froide

Nouveaux concepts d'interféromètre :

- interféromètre à ondes atomiques **guidées ou piégées**
  - pièges **dipolaires** ou sur puces **magnétiques** :
  - possibilité de capteur avec une géométrie "sur demande"



- Régimes différents
  - temps de mesure plus longs
  - **Interactions** entre atomes et avec le piège

# Remerciements

Travail d'équipe :

- Equipe Interférométrie Atomique et Capteurs Inertiels
- GRAVI : Q. Bodart, A. Chauvet, S. Merlet, F. Pereira Dos Santos + A.L. + anciens
- PYRAMIDE : Q. Bodart, F. Pereira Dos Santos, P. Bouyer, A. L. => MINIATOM

Collaborations :

- Europe : ICE - Hyper - FINAQS - Euroquasar - e-Mass - ESA
- la communauté des géophysiciens

[http://syrtre.obspm.fr/tfc/capteurs\\_inertiels/](http://syrtre.obspm.fr/tfc/capteurs_inertiels/)

