

Gravimètre atomique absolu

Arnaud Landragin



Systemes de Référence Temps-Espace

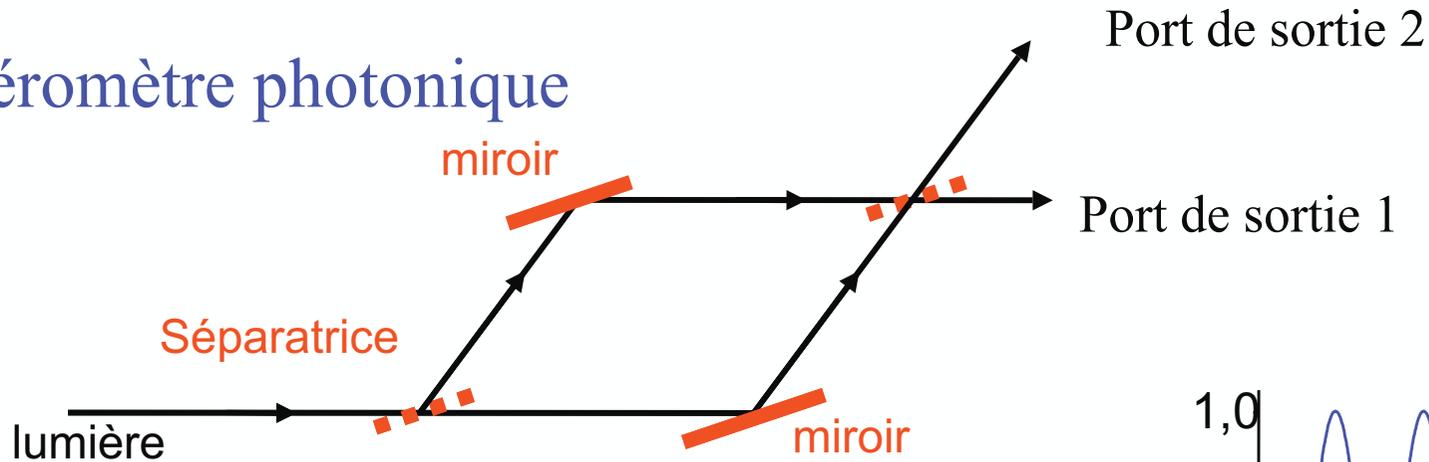


[Plan]

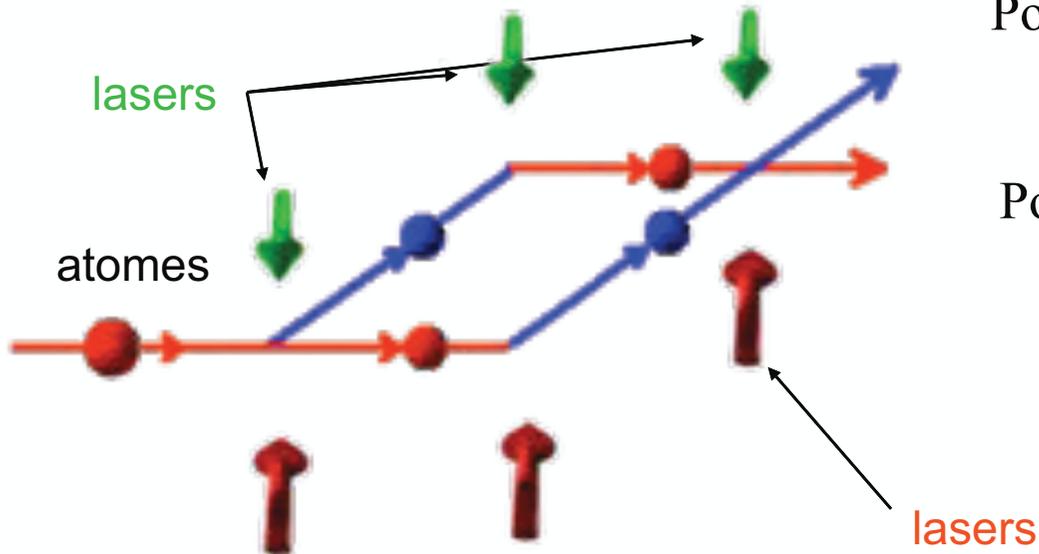
- ✓ Introduction à l'interférométrie atomique : principe et points clés
- ✓ Gravimètre atomique
- ✓ Applications : comparaisons avec les gravimètres macroscopiques
- ✓ Conclusion et perspectives

Interféromètre de type Mach-Zehnder

Interféromètre photonique

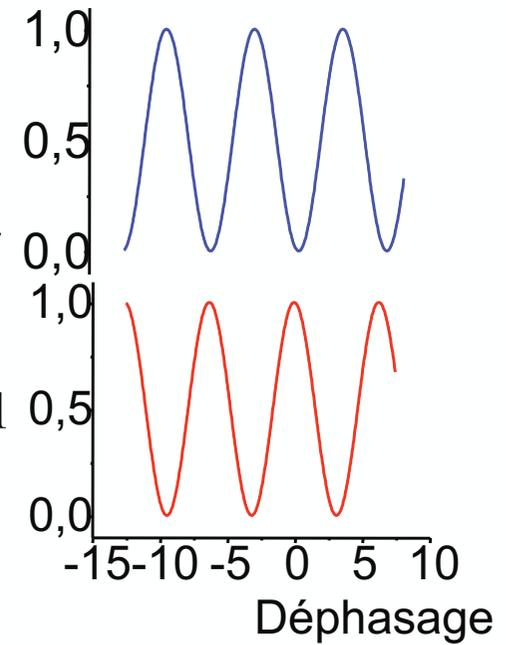


Interféromètre à onde de matière



Port de sortie 2

Port de sortie 1



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

Contexte

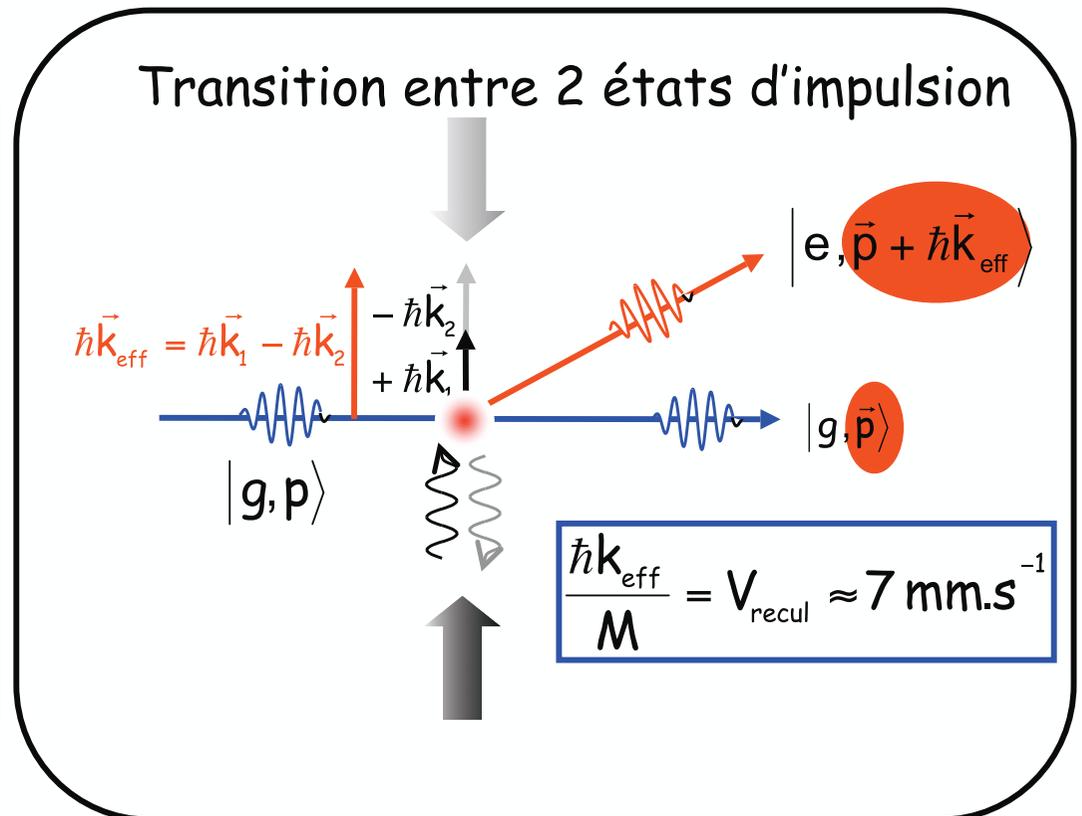
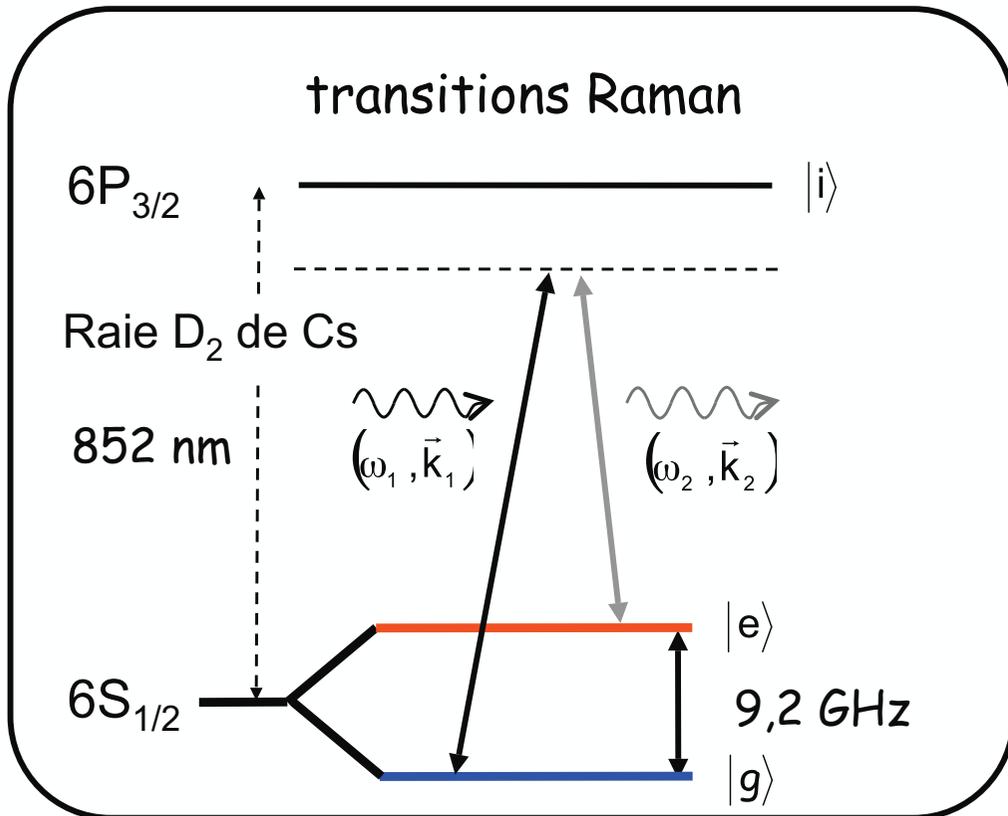
- 1991: premières démonstrations d'interféromètres atomiques
 - Première expérience : fente d'Young
 - F.O. Carnal, J. Mlynek, Phys. Rev. Lett. **66**, p 2689 (1991) .
 - Interféromètre à **séparatrice optique** : **gyromètre** sur jet atomique
 - F. Riehle, Th. Kister, A. Witte, J. Helmcke, Ch. Bordé, 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

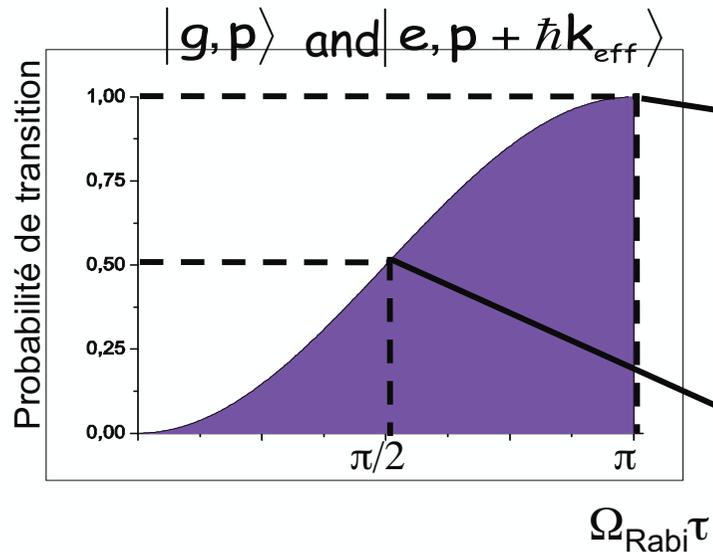
- 1997: Démonstrations de performances proche de l'état de l'art
 - Gyromètre de grande précision : double jets atomiques du groupe de M. Kasevich (Stanford et Yale University)
 - Gravimètre de grande exactitude et mesure de h/m : groupe de S. Chu group (Stanford University)
- => Développement de capteurs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

Transitions Raman Stimulées

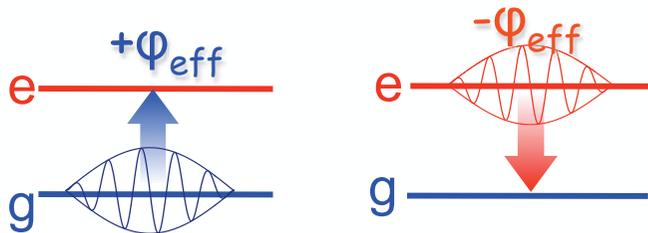


Manipulation des paquets d'ondes

Oscillations de Rabi



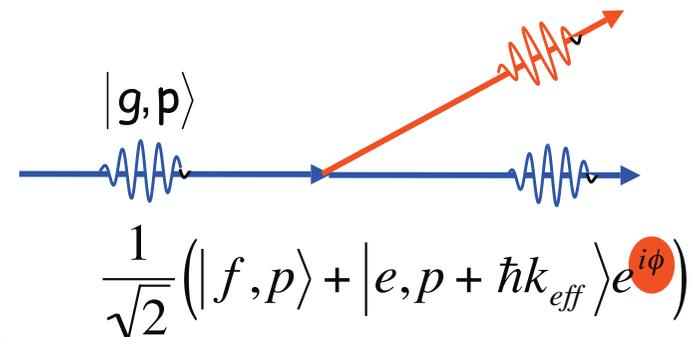
La différence de phase Laser est "copiée" sur la phase de l'onde diffractée



Miroir atomique
impulsion π



Séparatrice atomique
impulsion $\pi/2$



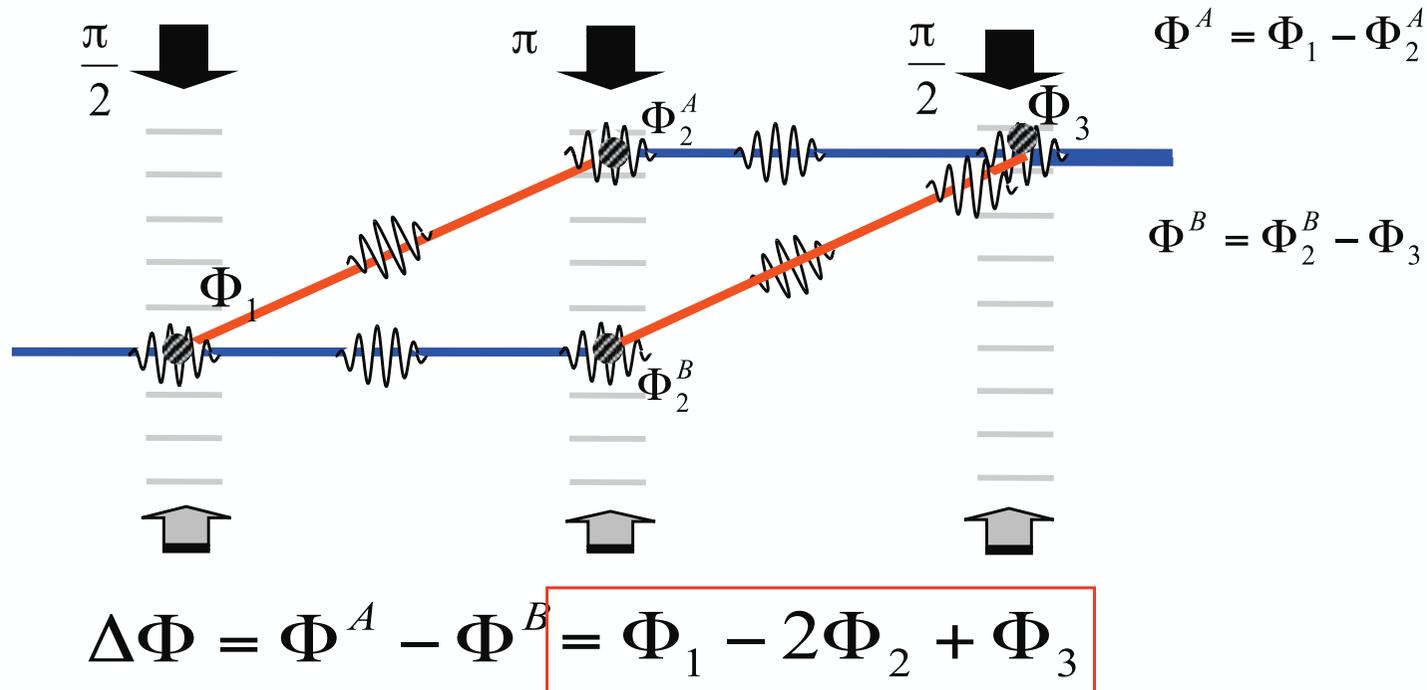
Déphasage atomique

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~~



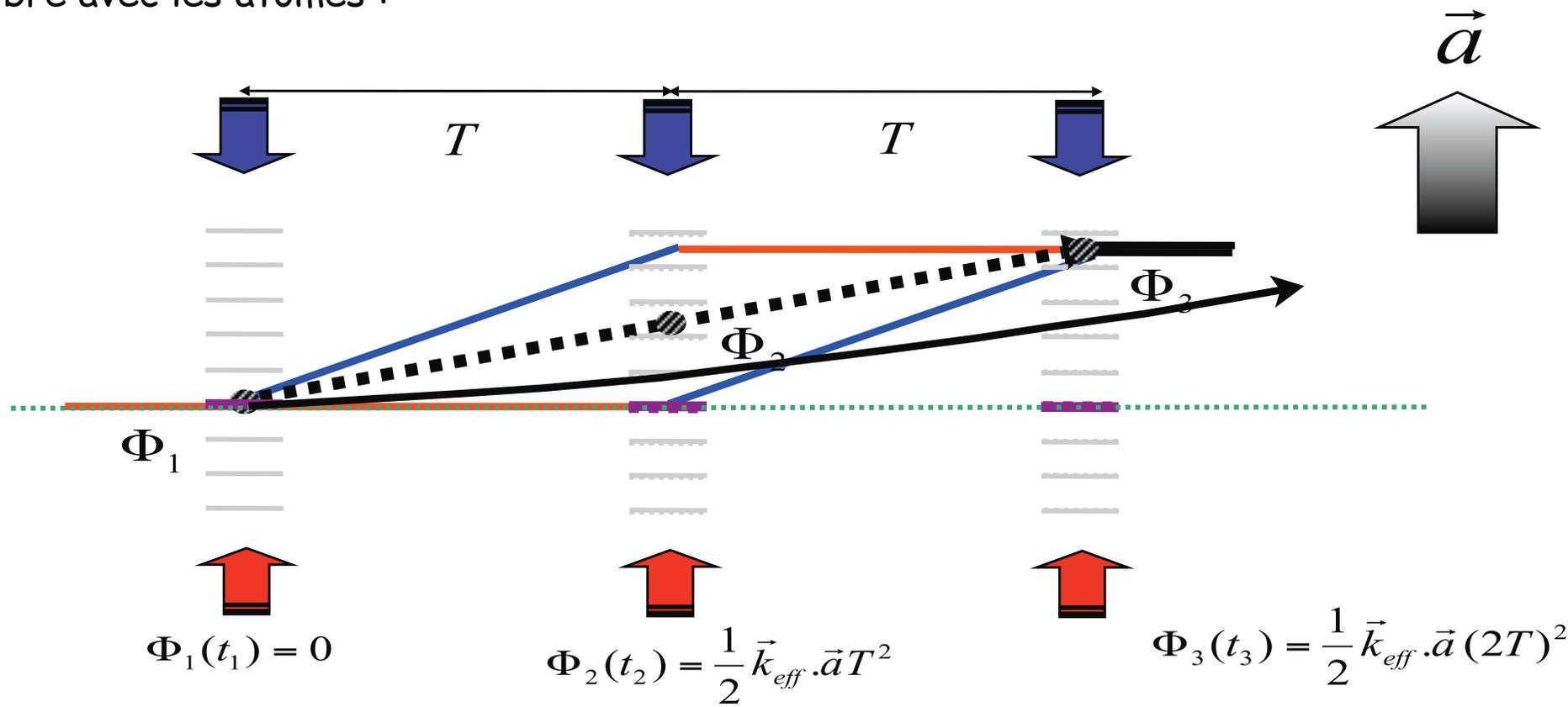
Déplacement relatif des *équiphases laser*/référentiel des atomes en chute libre mesuré au moment des trois impulsions par rapport à une "règle" bien connue : \mathbf{k}

Déphasage d'accélération

Accélération constante \vec{a}

Dans le référentiel en chute libre avec les atomes :

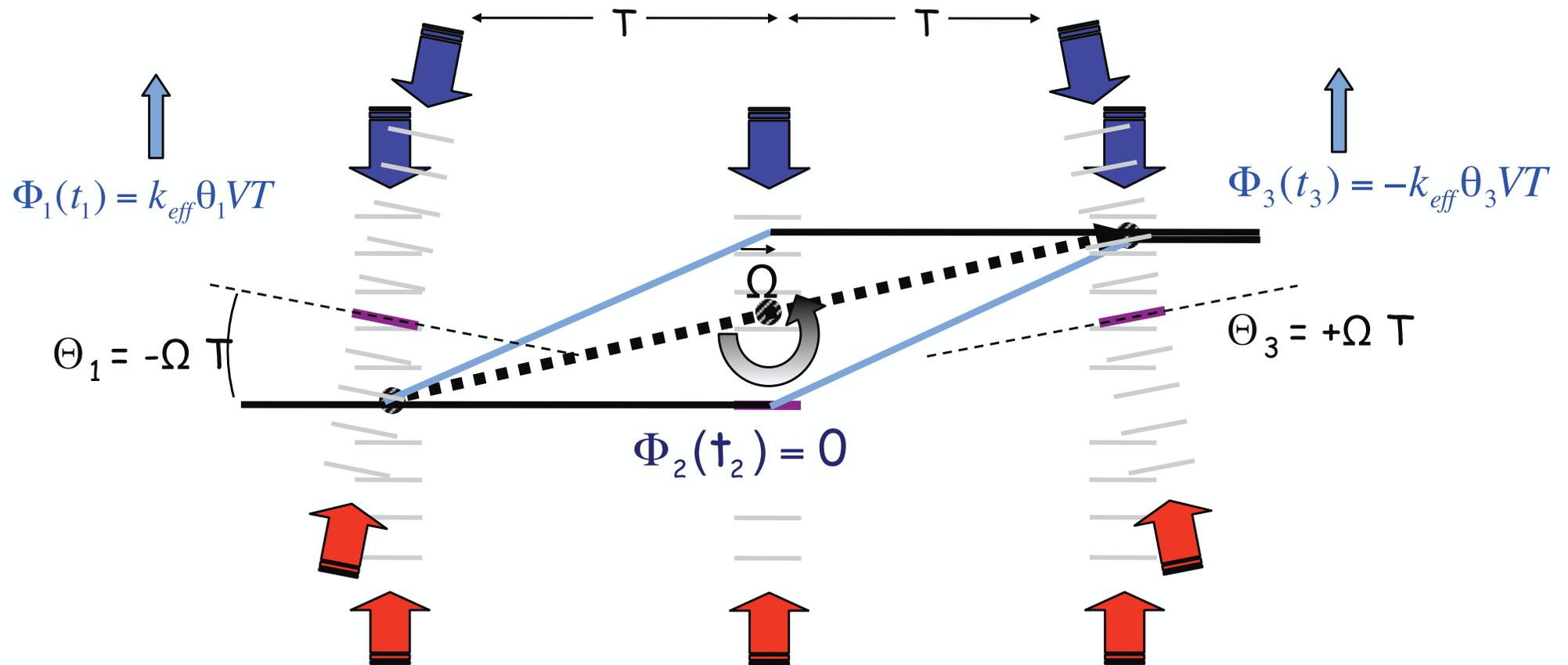
$$\Phi(t) = \vec{k}_{eff} \cdot \vec{r}(t) \rightarrow \frac{1}{2} \vec{a} t^2$$



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

Déphasage de rotation

Un référentiel en chute libre



$$\Delta\Phi = -k_{eff} (\theta_3 - \theta_1) VT$$

Effet Sagnac

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

$$\vec{A} = \frac{\hbar}{m} T^2 (\vec{k}_{eff} \wedge \vec{V})$$

$$\Delta\Phi_{SAGNAC} = \frac{2 E \vec{A} \cdot \vec{\Omega}}{\hbar c^2}$$

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 états internes ("state labeling")
 - ➔ pas de sélection en vitesse initiale : très bien **adaptée aux sources d'atomes froids** "standard" (mélasses)
 - ➔ détection et contraste
- ✓ **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

Etat de l'art (et autres)

Gravimètre

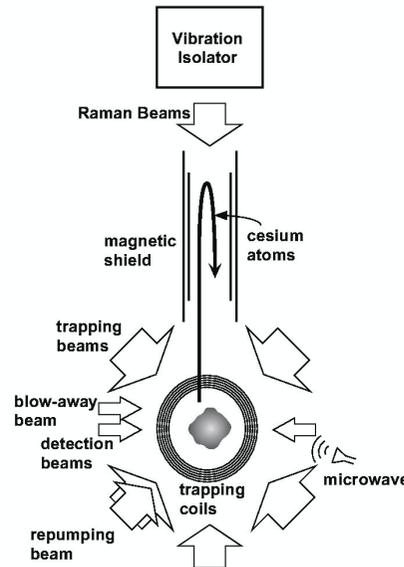
Stanford :

- Resolution:
 $2 \cdot 10^{-8} \text{ g at } 1 \text{ s (2001)}$
 $8 \cdot 10^{-9} \text{ g at } 1 \text{ s (2008)}$
- Exactitude: $\sim 3 \cdot 10^{-9} \text{ g}$

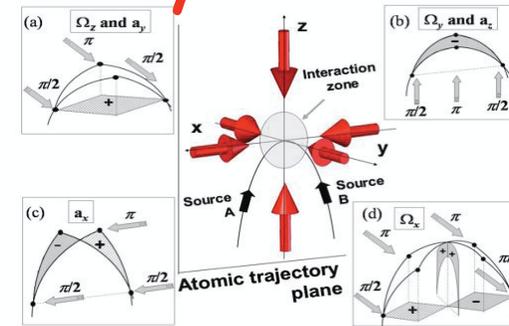
HUB (Berlin)

ONERA (portable)

NIM (China)



Gyromètre



SYRTE (GOM)

Hanover (CASI)

WIPM, China

Gradiomètre

Kasevich :

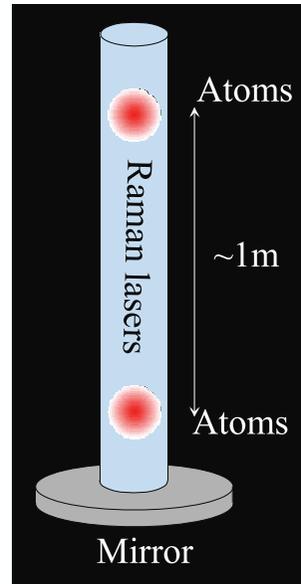
- Sensibilité: $3 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-2}/\sqrt{\text{Hz}}$

Mesure de G

Florence (Mesure de G)

JPL (gravity field mapping)

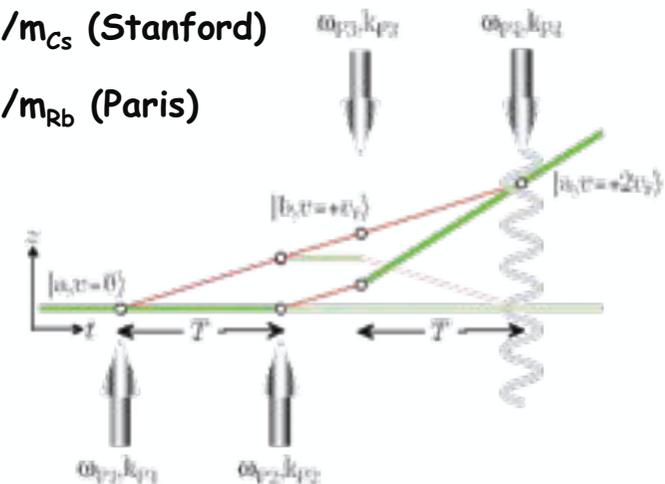
Zhejiang Univ. (Chine)



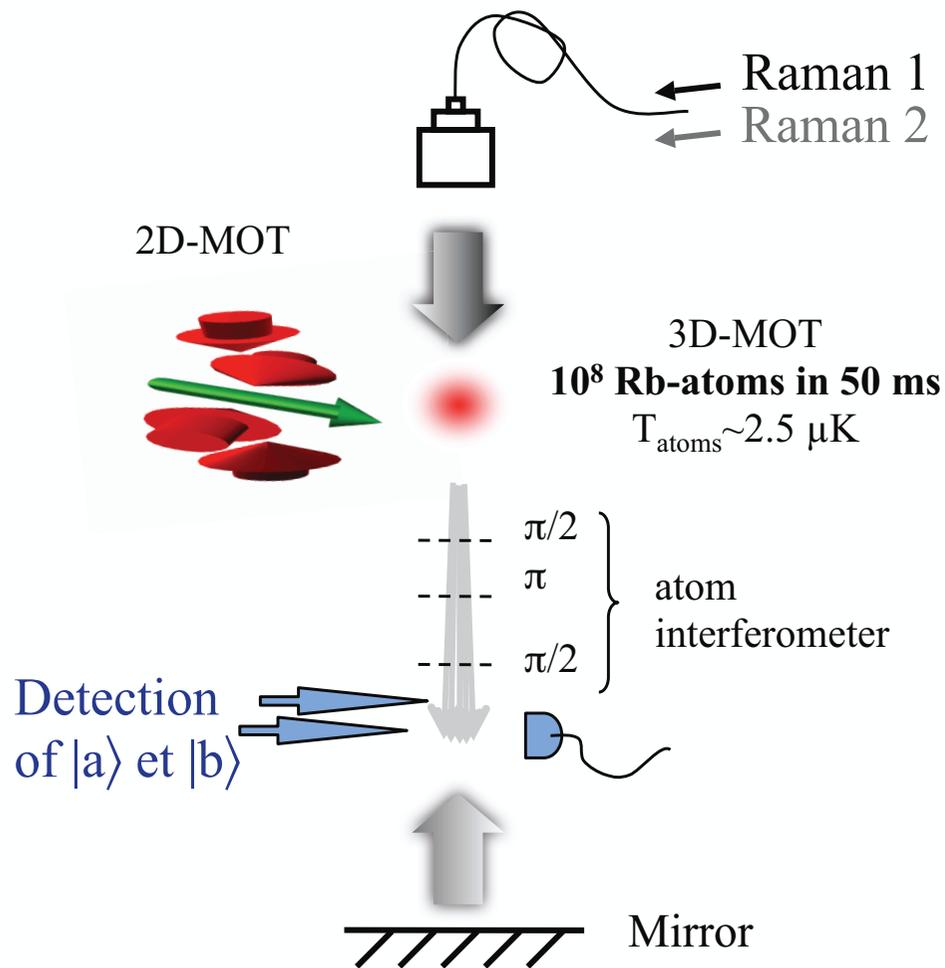
Senseur de vitesse

h/m_{Cs} (Stanford)

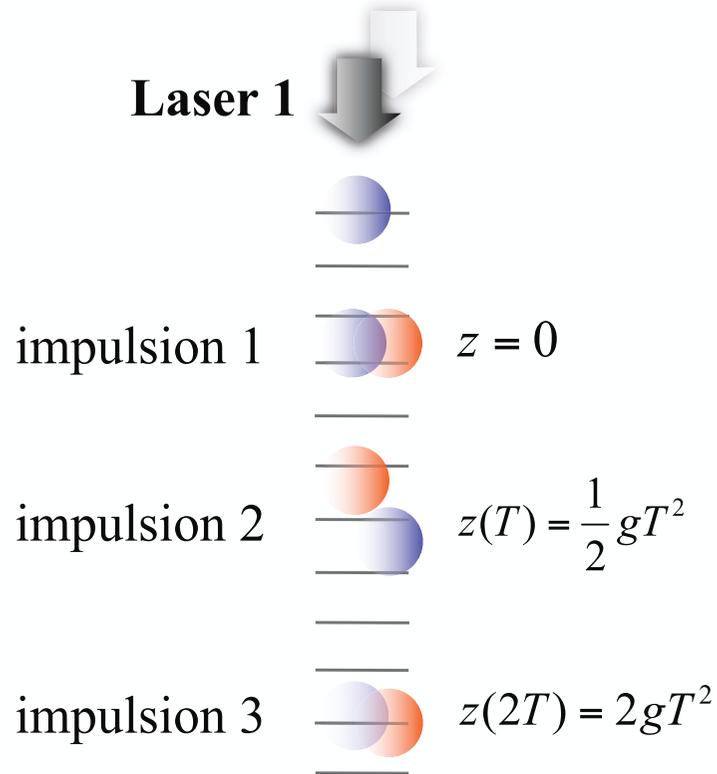
h/m_{Rb} (Paris)



Gravimètre : dispositif expérimental



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

⇒ Equiphasés définies par la position du miroir

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

Interférogramme

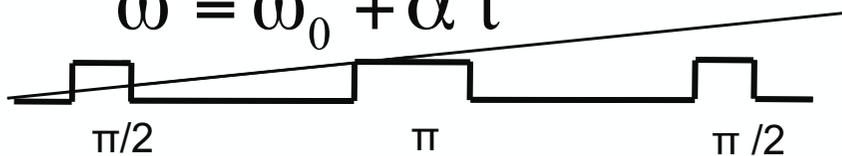
- Chute libre → décalage de la condition de résonance par effet Doppler

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

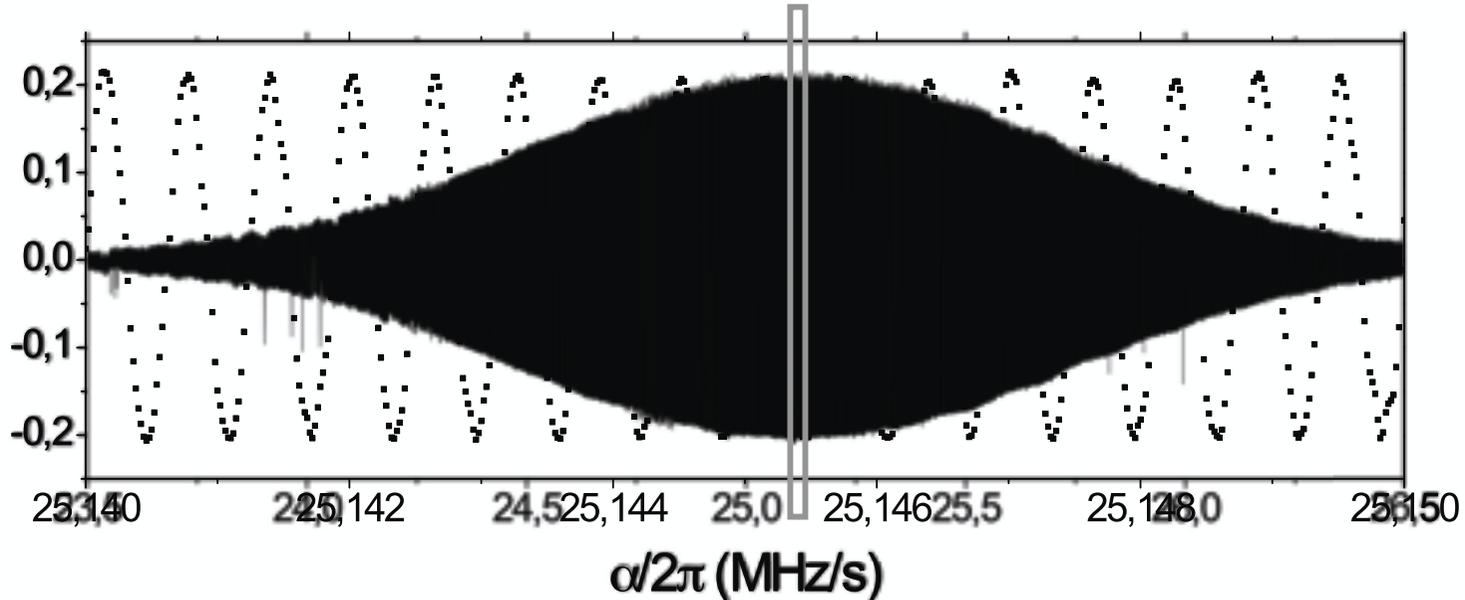
$\delta(\vec{v}) = \vec{k}_{eff} \cdot \vec{v} = \vec{k}_{eff} \cdot (\vec{g}t + \vec{v}_0)$

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

$$\omega = \omega_0 + \alpha t$$



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



Détermination de g

Déphasage total :

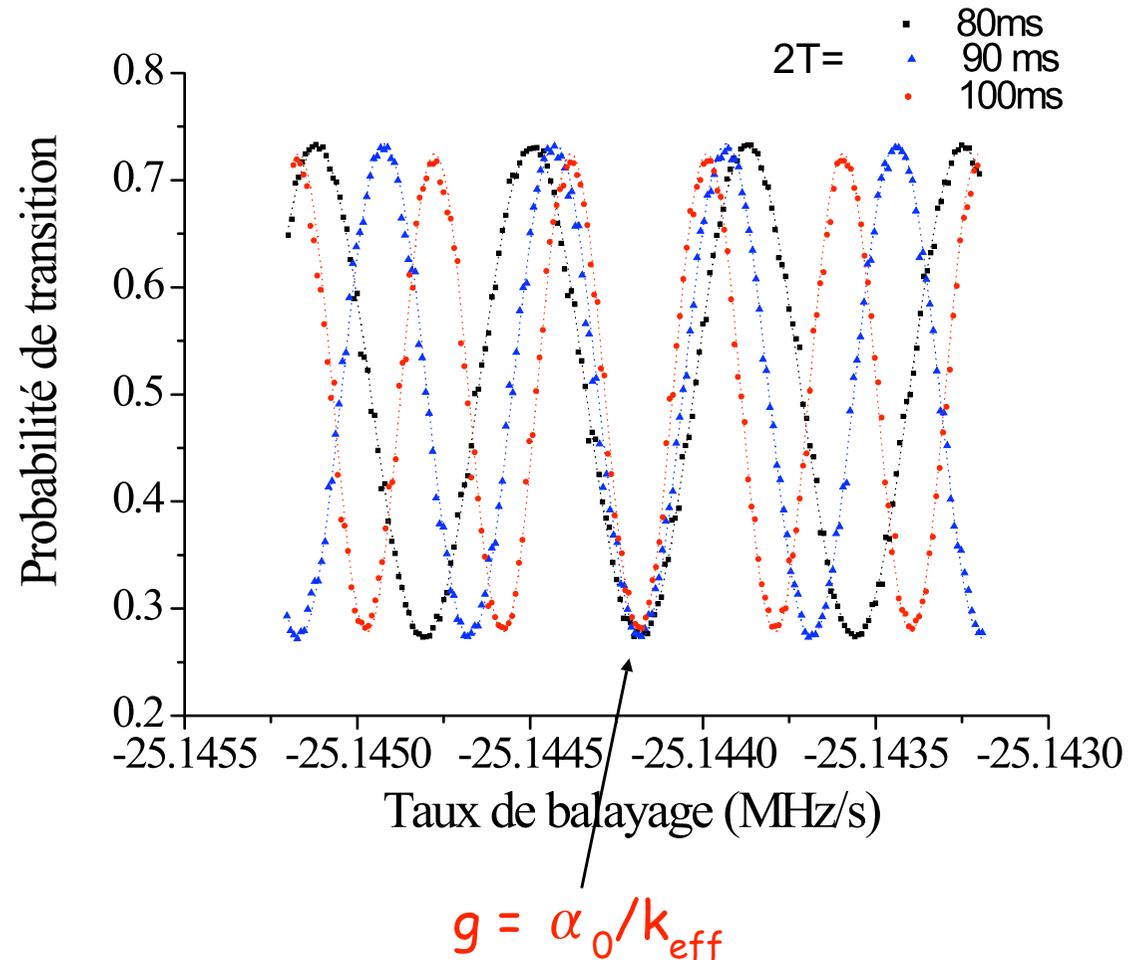
$$\Delta \Phi = (k_{\text{eff}} \cdot g - \alpha) T^2$$

Frangé centrale :

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

\Rightarrow On a alors $\Phi = 0$,

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

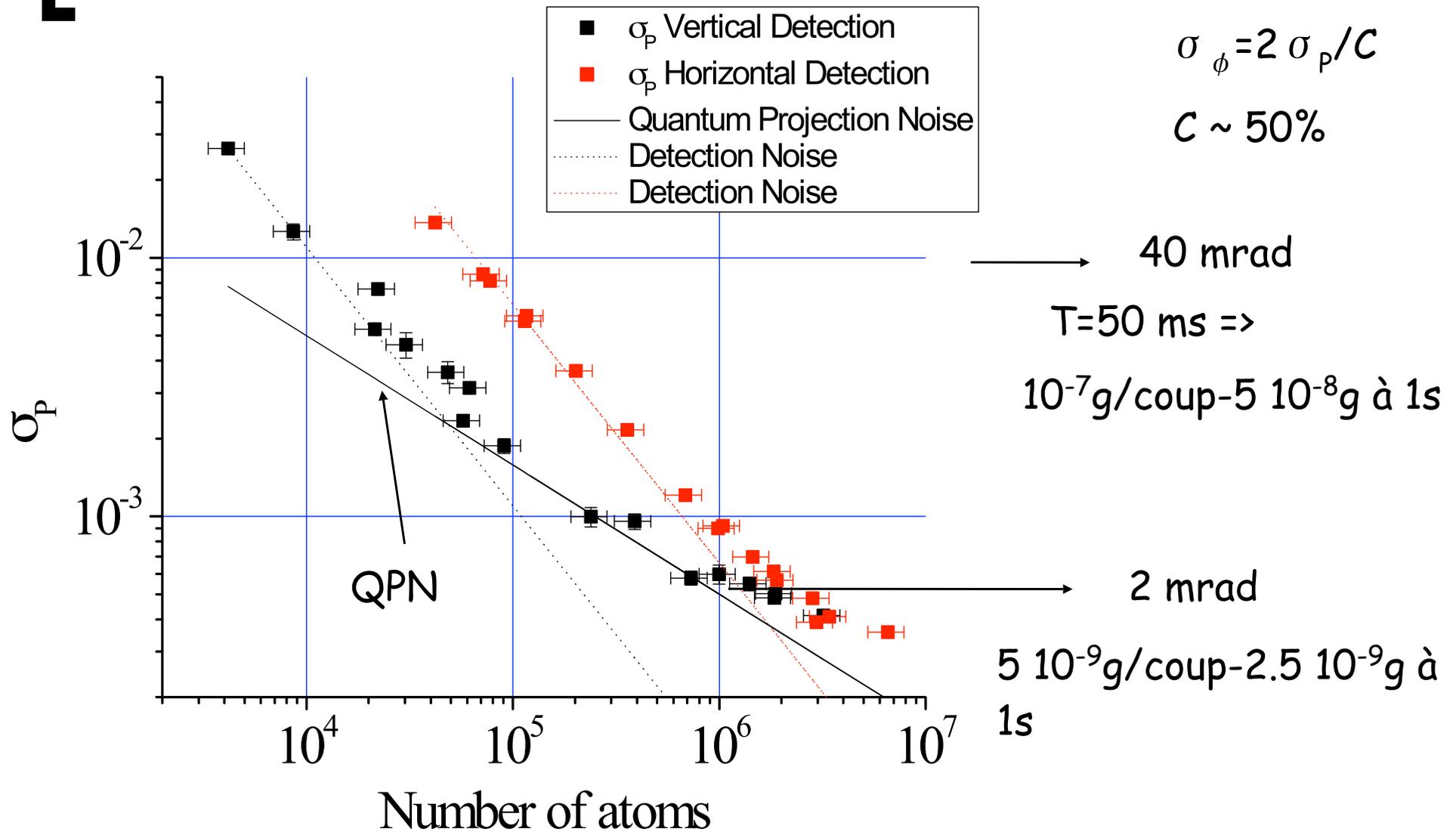


Mesure de g : $\alpha_0 = -25,1442 \text{ MHz/s} \Rightarrow g = 9,80921 \text{ m/s}^2$

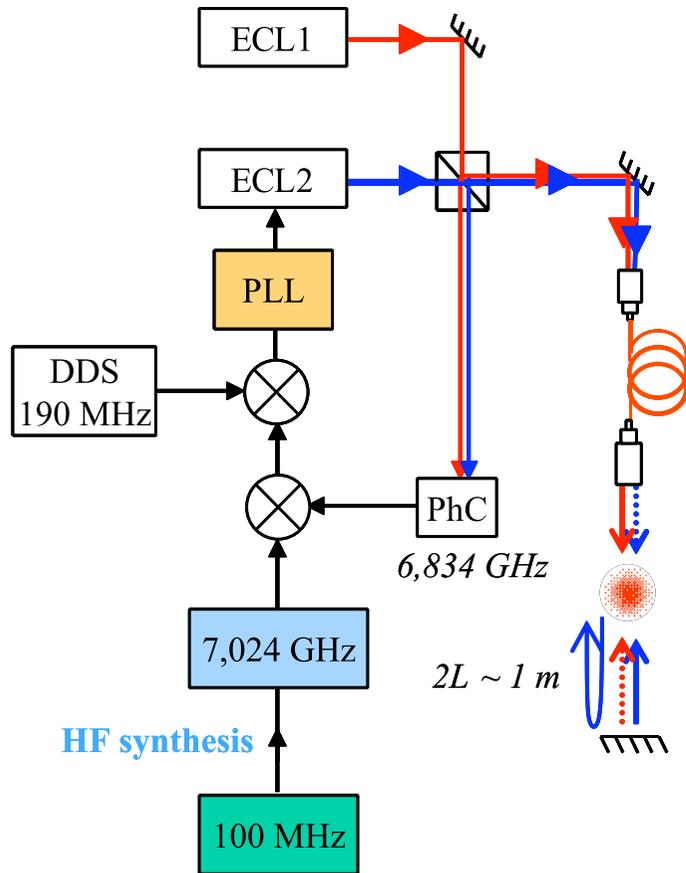
[Plan]

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

Bruit de projection quantique



Bruit de phase des lasers



Source		σ_{Φ} (mrad/coup)	σ_g (g/Hz ^{1/2})
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	$2,6 \cdot 10^{-9}$
	Total	3,1	$3,9 \cdot 10^{-9}$

$\sigma_{\Phi} = 40\text{ mrad/coup} \Rightarrow$ limite : **vibrations**

Réduction du bruit

Paramètres typiques

$$2T=100 \text{ ms}$$

$$T_c = 250 \text{ ms}$$

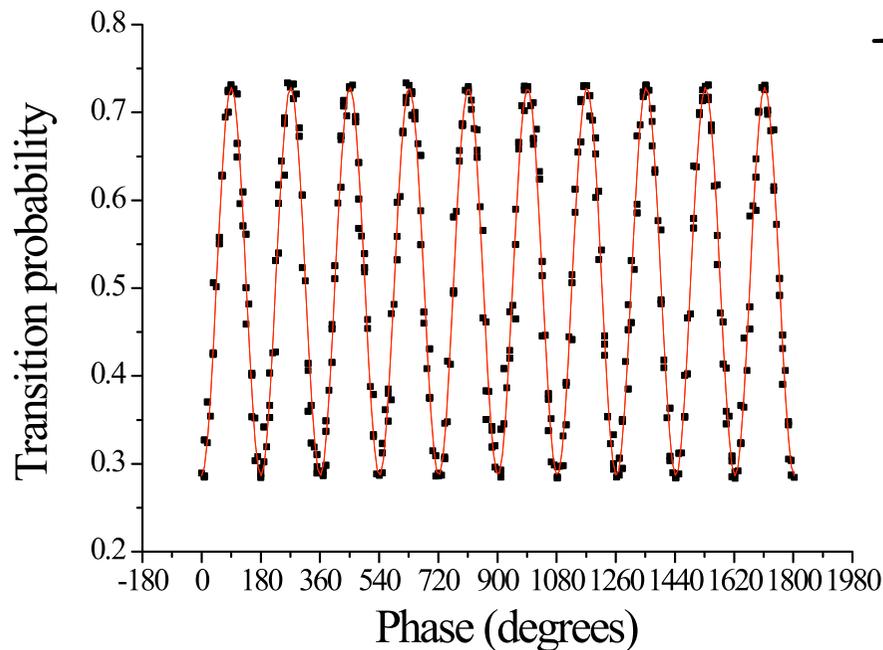
Contraste $\sim 45 \%$

Sources de bruit :

- bruit de phase des lasers et quantique:

$$\Rightarrow \sigma_g/g \sim 4 \cdot 10^{-9} / \text{seconde}$$

- Echantillonnage des vibrations résiduelles du miroir : plateforme anti-vibration passive, isolation acoustique, filtrage par un sismomètre



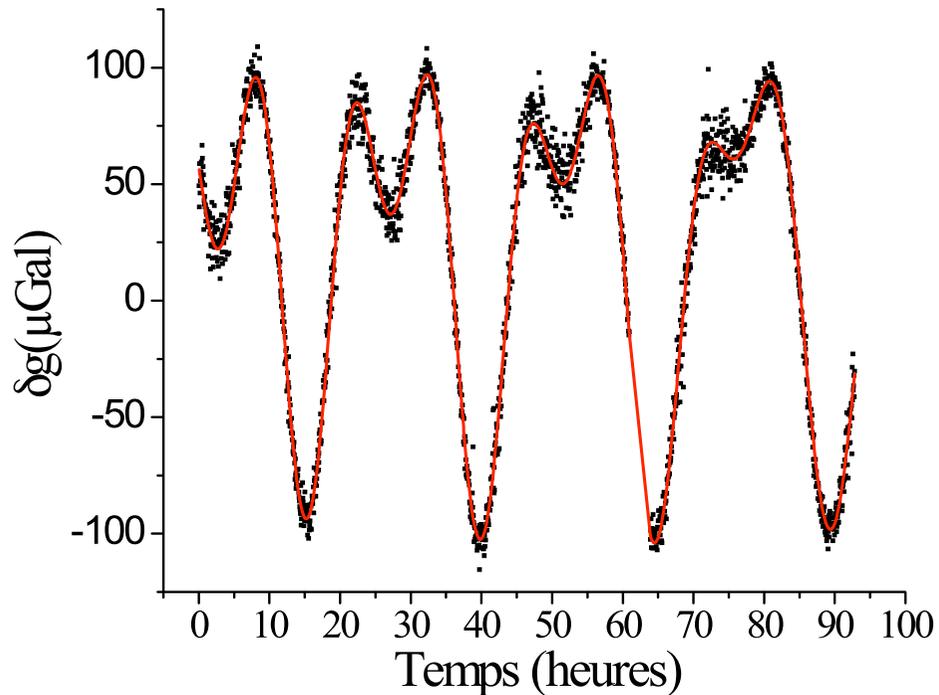
Sensibilité typique (observatoire)

$$\sigma_g = 2 - 3 \cdot 10^{-8} \text{ g à } 1\text{s}$$

Sensibilité optimale (nuit, climatisation éteinte)

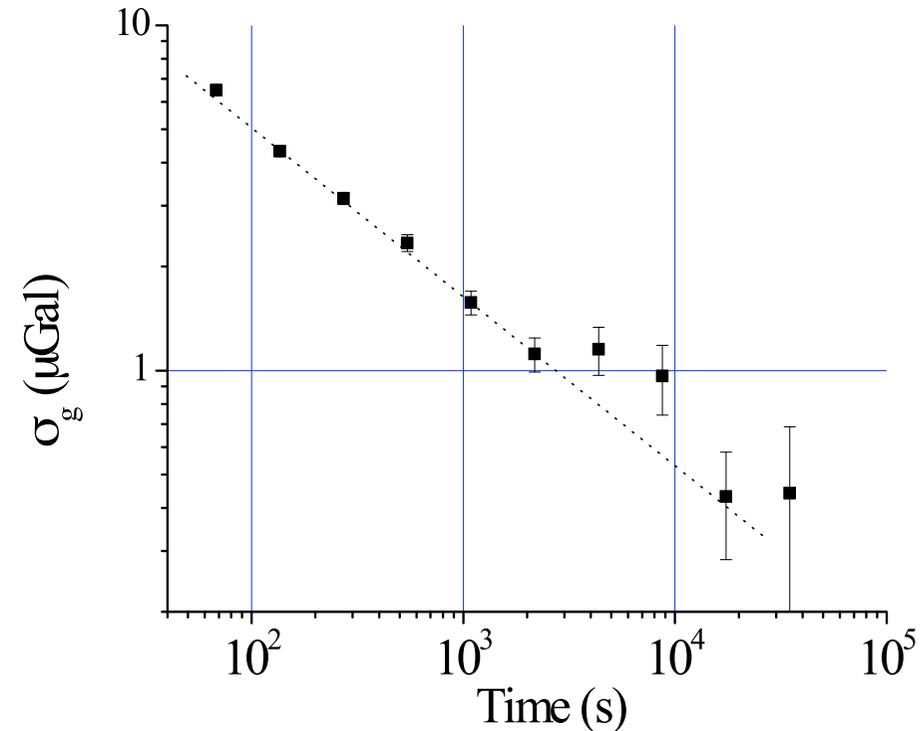
$$\sigma_g = 1.4 \cdot 10^{-8} \text{ g à } 1\text{s}$$

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

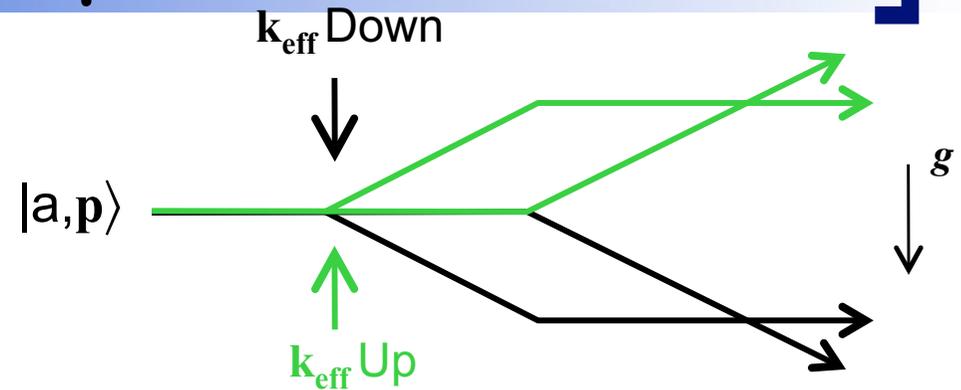
Dérive du gravimètre?
Connaissance du modèle de marée?

[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]

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



Demi-différence → $\Delta\Phi$ dépendent de k_{eff}	Demi-somme → $\Delta\Phi$ indépendants de k_{eff}
Alignements	Gradient de champ magnétique
Accélération de Coriolis	Déplacement lumineux (1 photon)
Aberrations des fronts d'onde	Déphasages RF
Déplacement lumineux (2 photons)	...

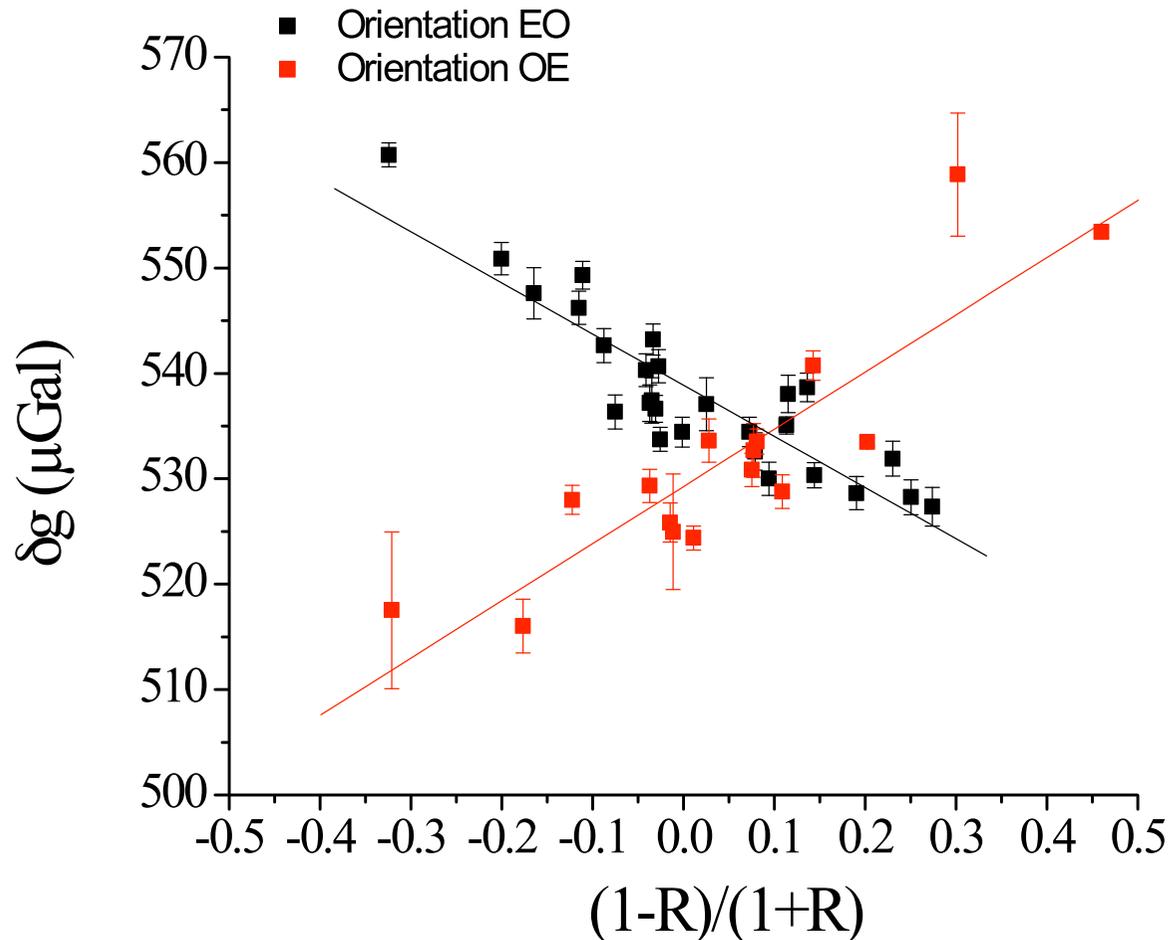
→ Réjection des effets indépendants de k_{eff} en alternant k_{eff} Up/Down

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 :

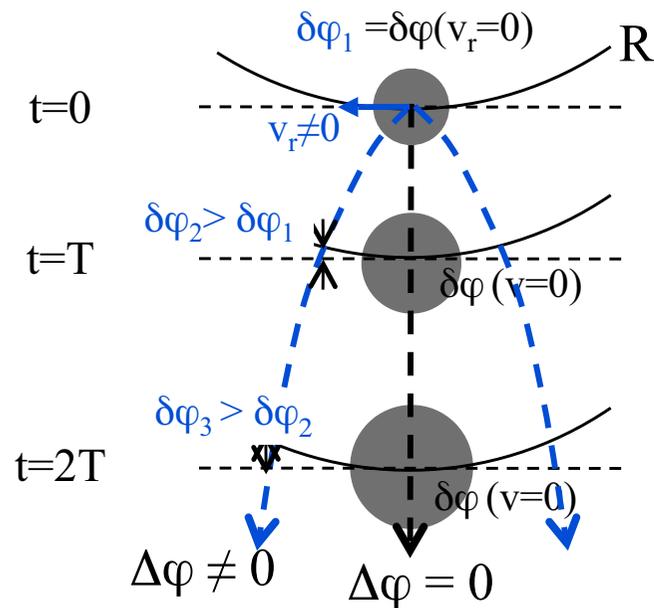
$\sim 0,5 \mu\text{Gal}$

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 :

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



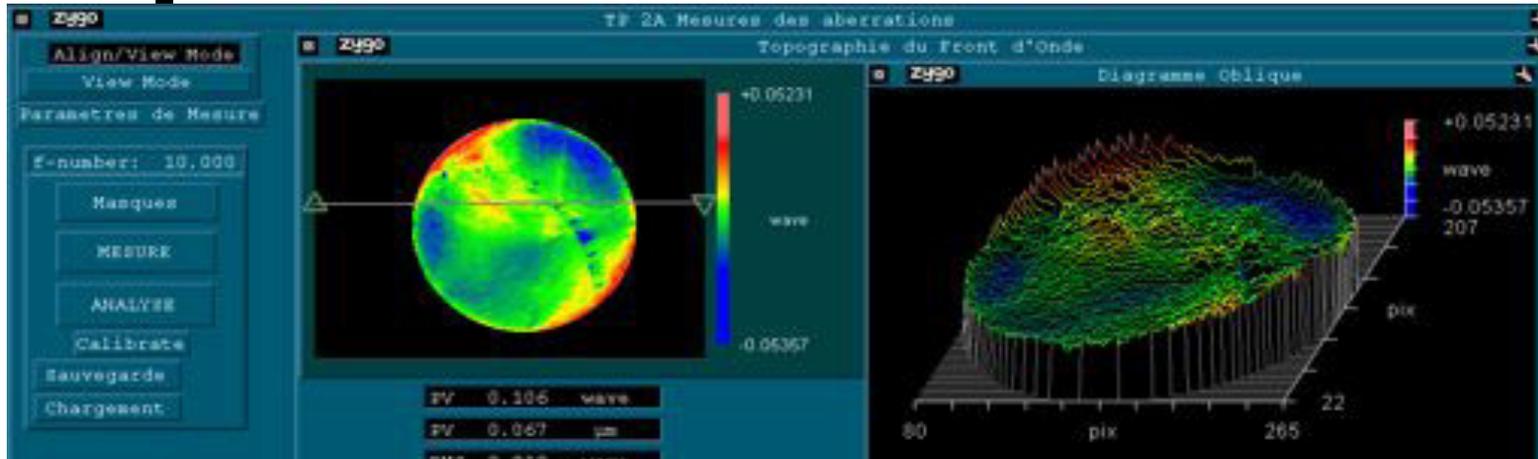
Dépendance avec la température

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

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 :

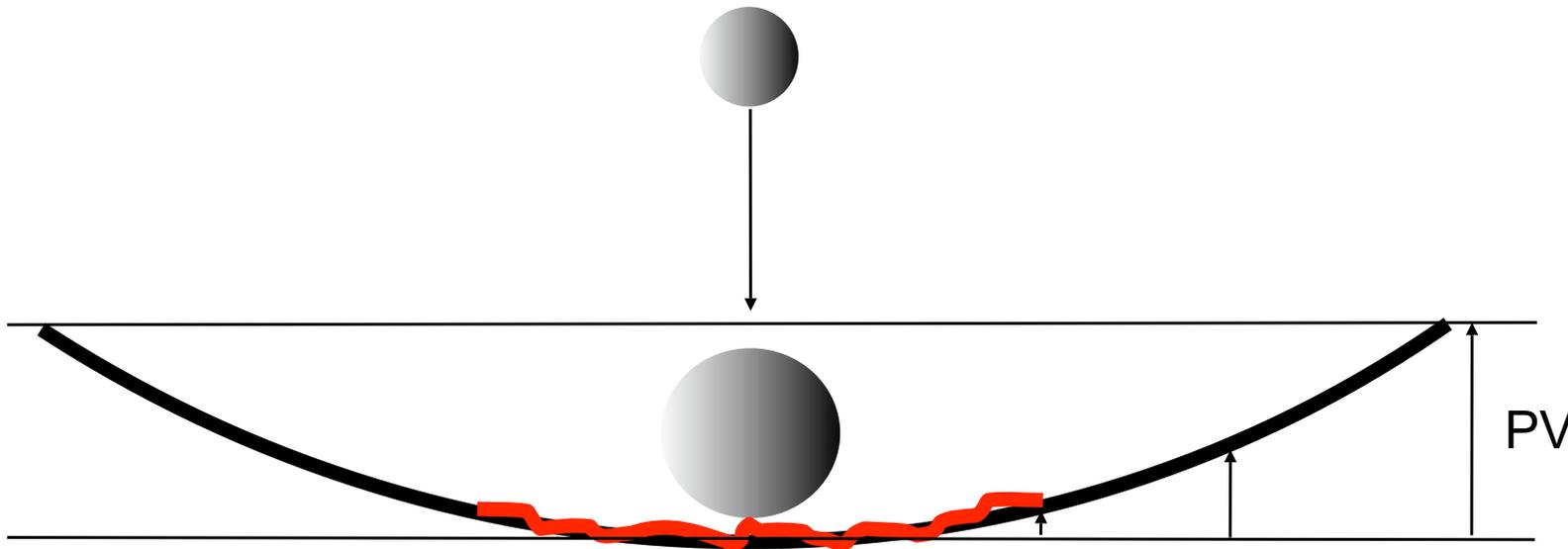
- $T = 2.5\mu K$
- $\sigma = 1.5mm$



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

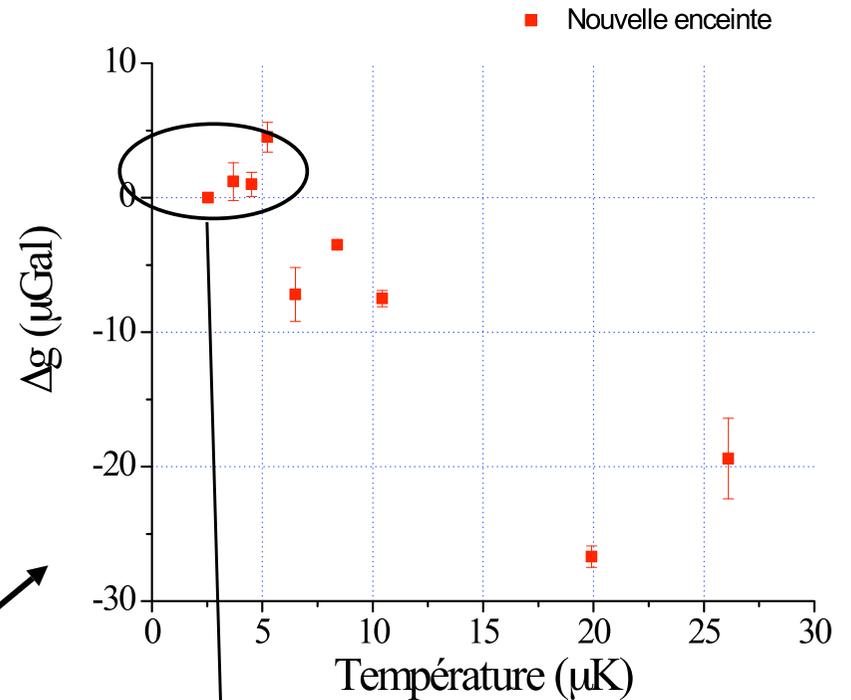
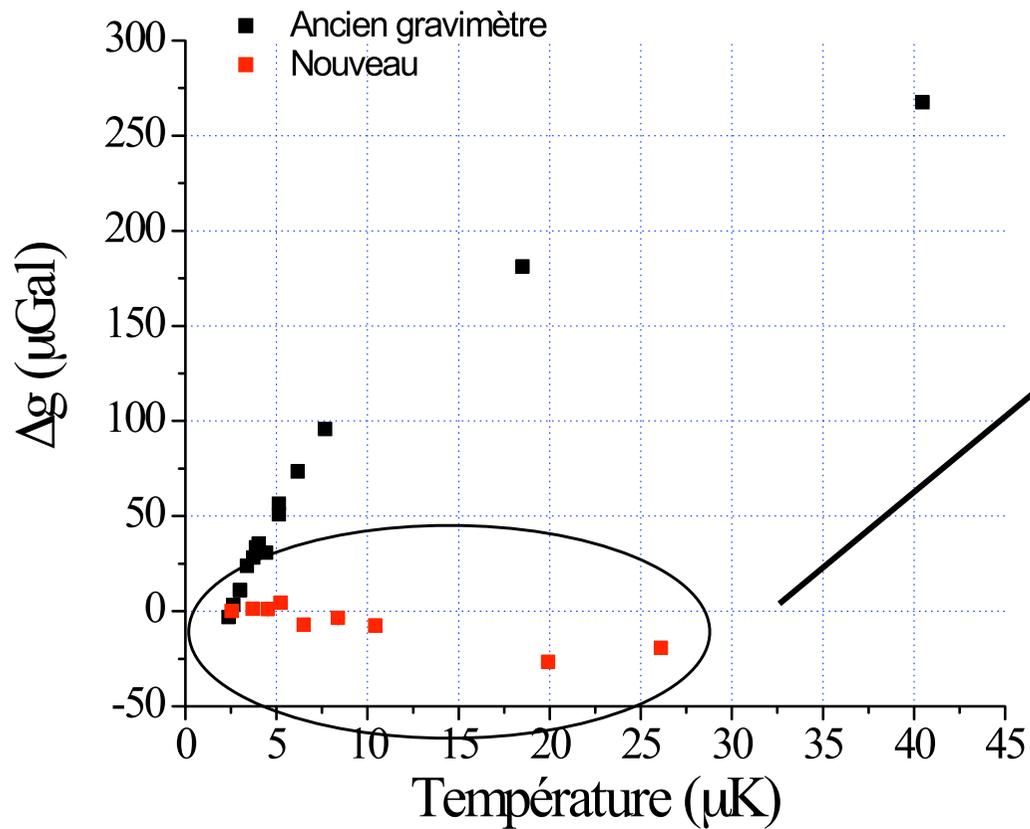
$\lambda/4$

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



Influence de la température

Mesures préliminaires



Réduction
par un ordre de grandeur

Extrapolation à t° 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)

[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

- Physique fondamentale, métrologie



- mesure de α , G ...

- test de la gravité

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

- **balance du watt** (gravimètre)



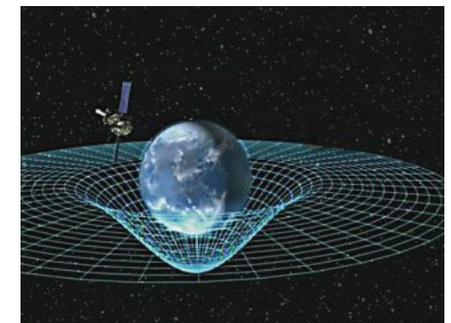
- Géophysique (au sol ou dans l'espace)

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



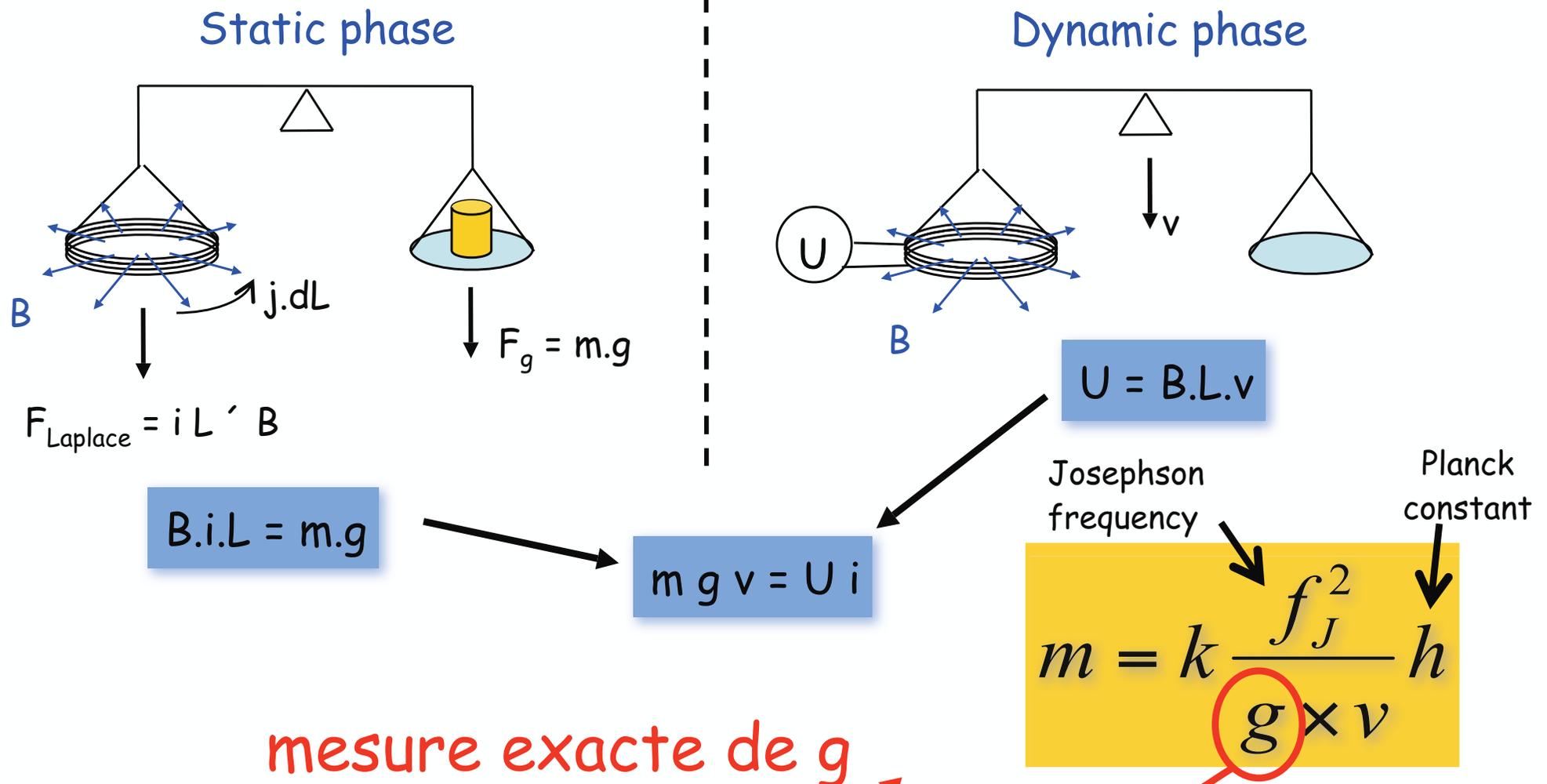
- Navigation inertielle satellite, sous-marin...

- (navigation sur carte)



balance du watt

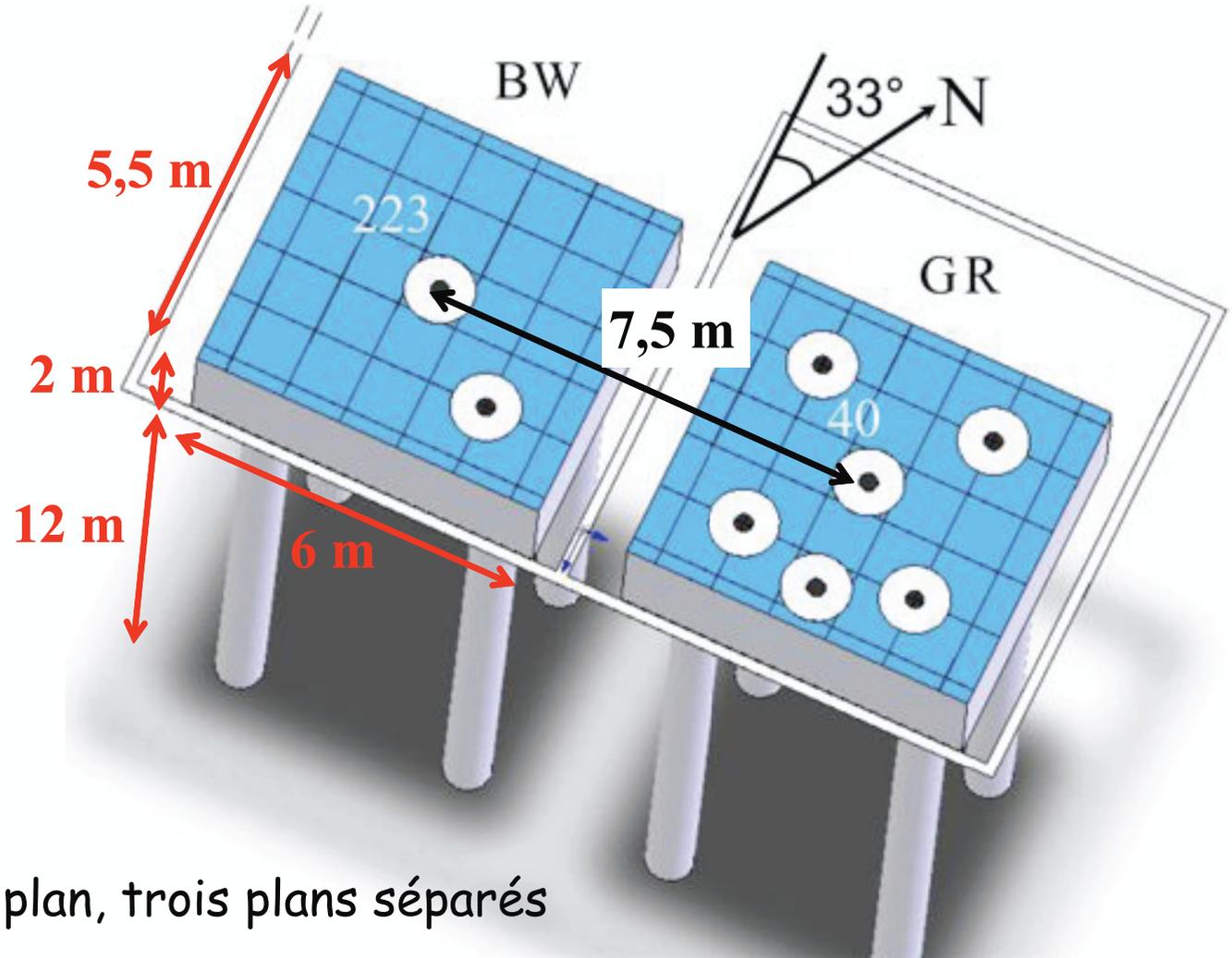
But : Remplacer la définition du kg (étalon) par une définition liée à h
 Mesure de la constante de Planck h à 10^{-8} en exactitude



Laboratoires, cartographie et modélisation des variations de g

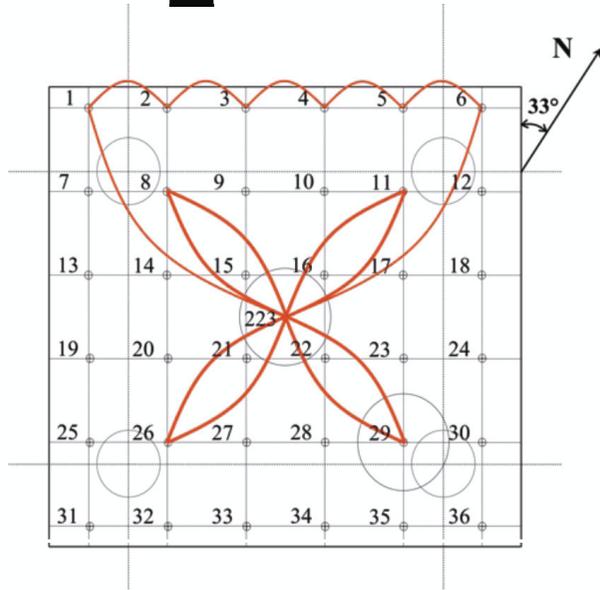
A l'aide d'un gravimètre relatif Scintrex CG-5

- 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

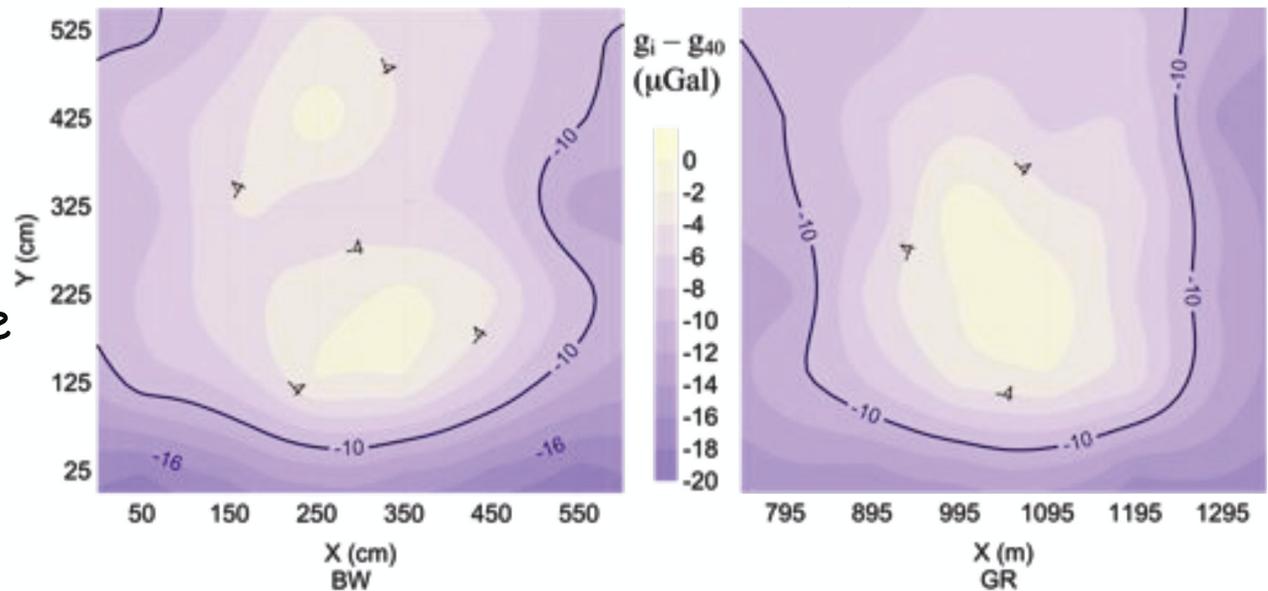
Cartographie



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

Modélisation dans tout le volume
(70 m³) à mieux que 3 μG

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

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

Observation d'un Corps en chute libre
(exacts)

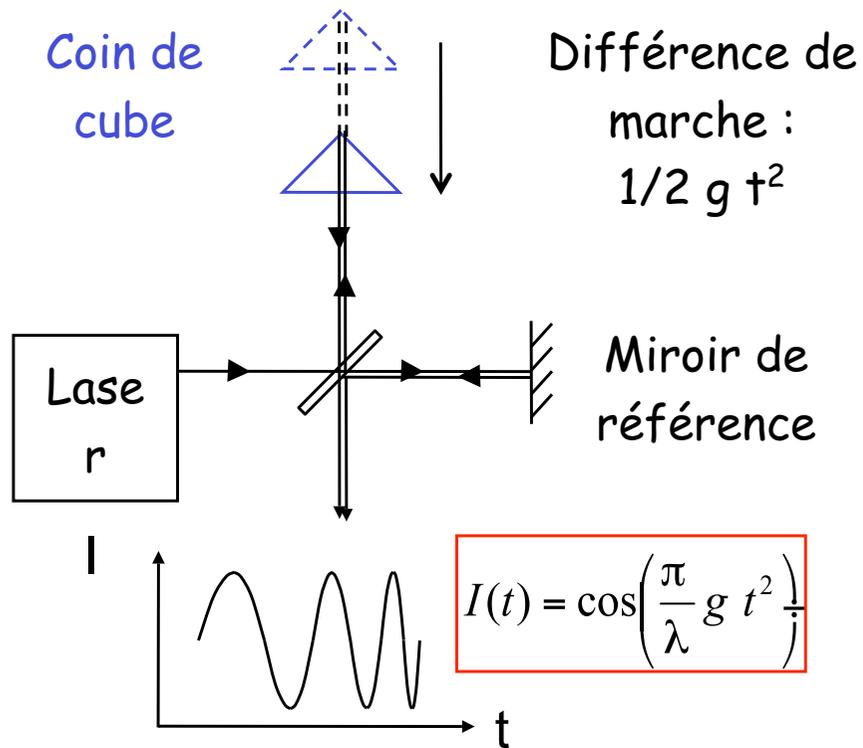
+

Référence de temps
Référence de longueur

- **Gravimètre à coin de cube**
sensibilité : qlq $10^{-8} \text{g.Hz}^{-1/2}$
Exactitude : $2 \cdot 10^{-9} \text{g}$
- **Gravimètre atomique**
Steven Chu - Stanford
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

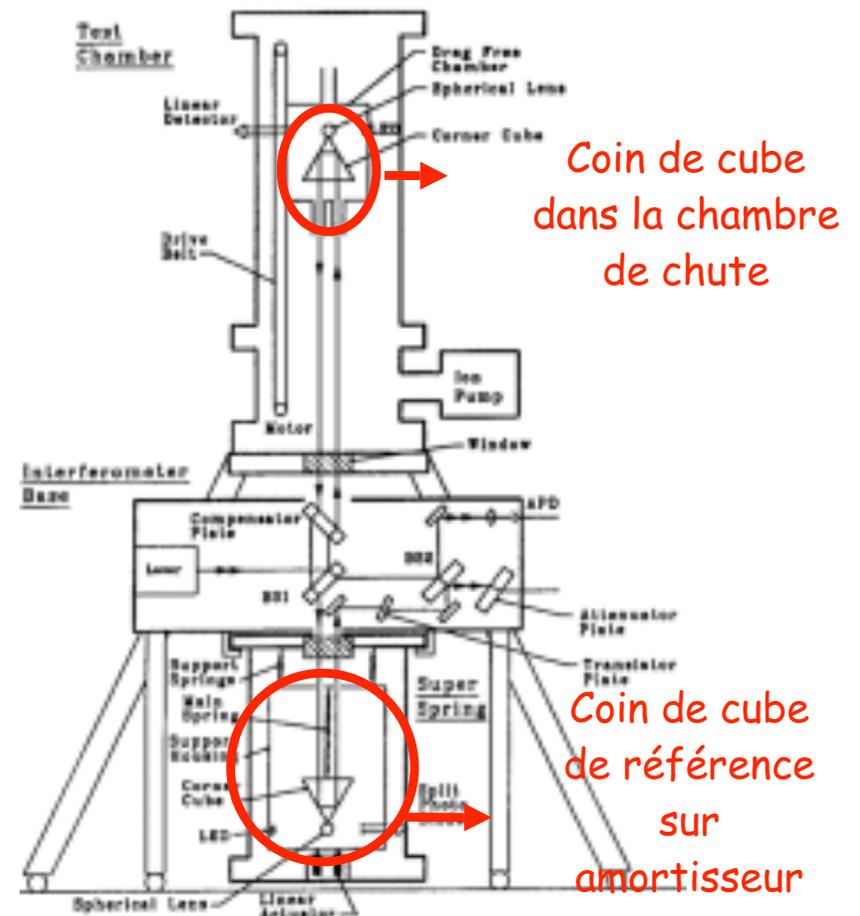


Schéma de principe

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

Comparaison "Coin de cube/Atomique"

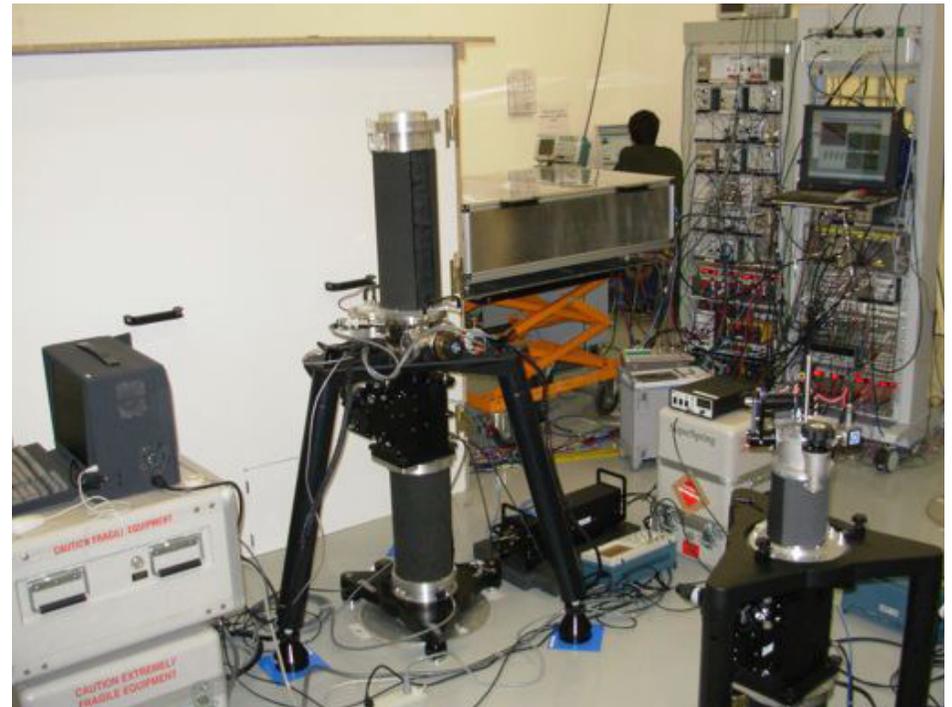
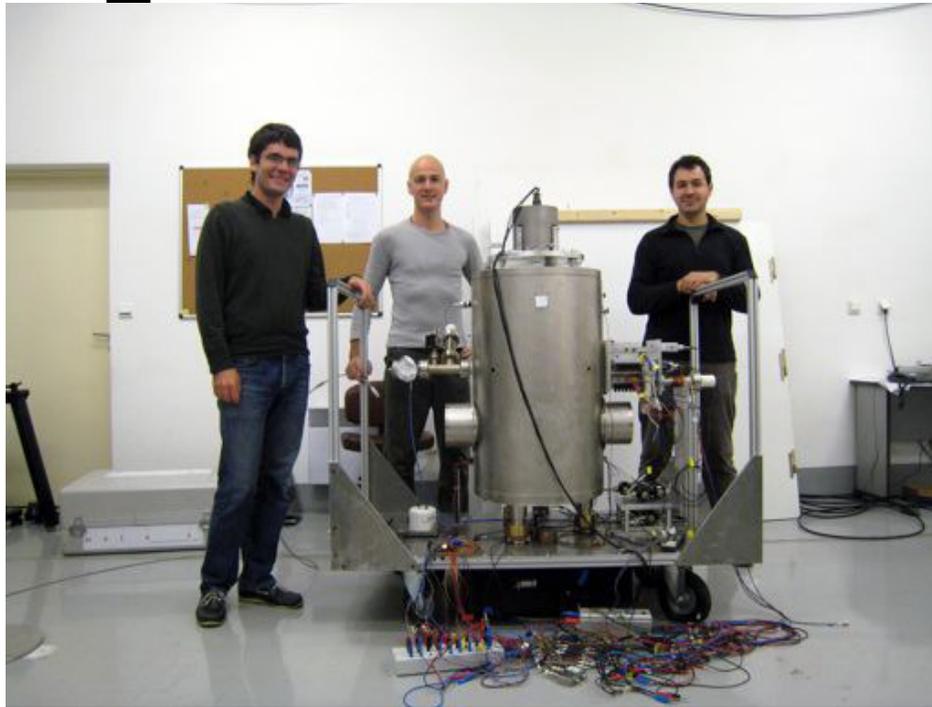
	Coin de cube	Atomes
Vibrations synchrones	Elevées	Faibles
Taux de répétition	Faible ~ 0,1 Hz	Elevé ~ 4 Hz
Vieillessement	Usure du chariot	Lasers
Technologie	Mature	En évolution
Balances du watt	UK, USA, Suisse, BIPM	France

- ✓ 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



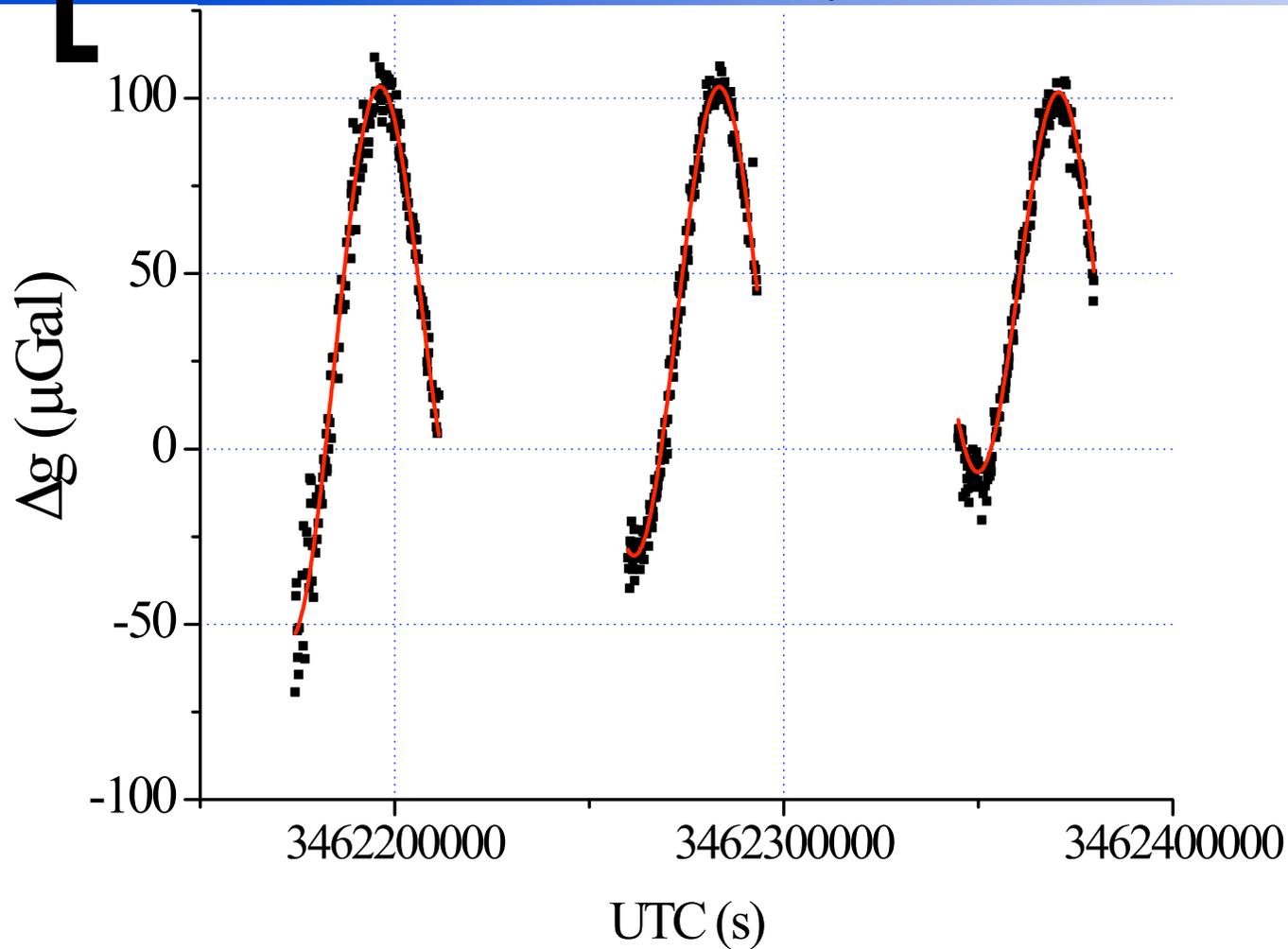
[Réglages



[Ça marche !!!]



Mesures sur le point B du BIPM



17-18-19 Sept

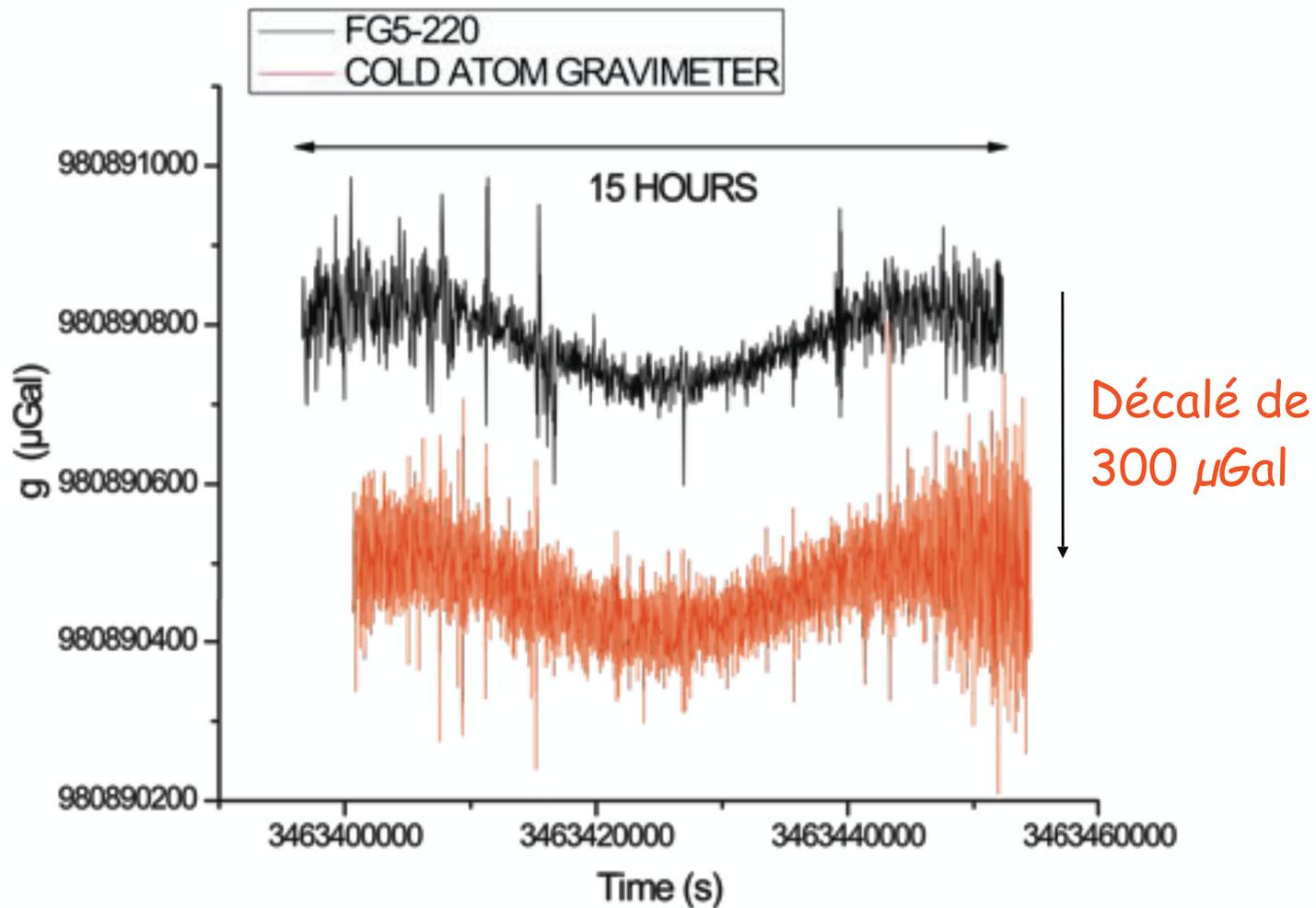
1 point
=
200 coups
 \approx
1 minute

Excellente stabilité long terme : même valeur à $\pm 1 \mu\text{Gal}$

Résultats de la comparaison en cours d'analyse

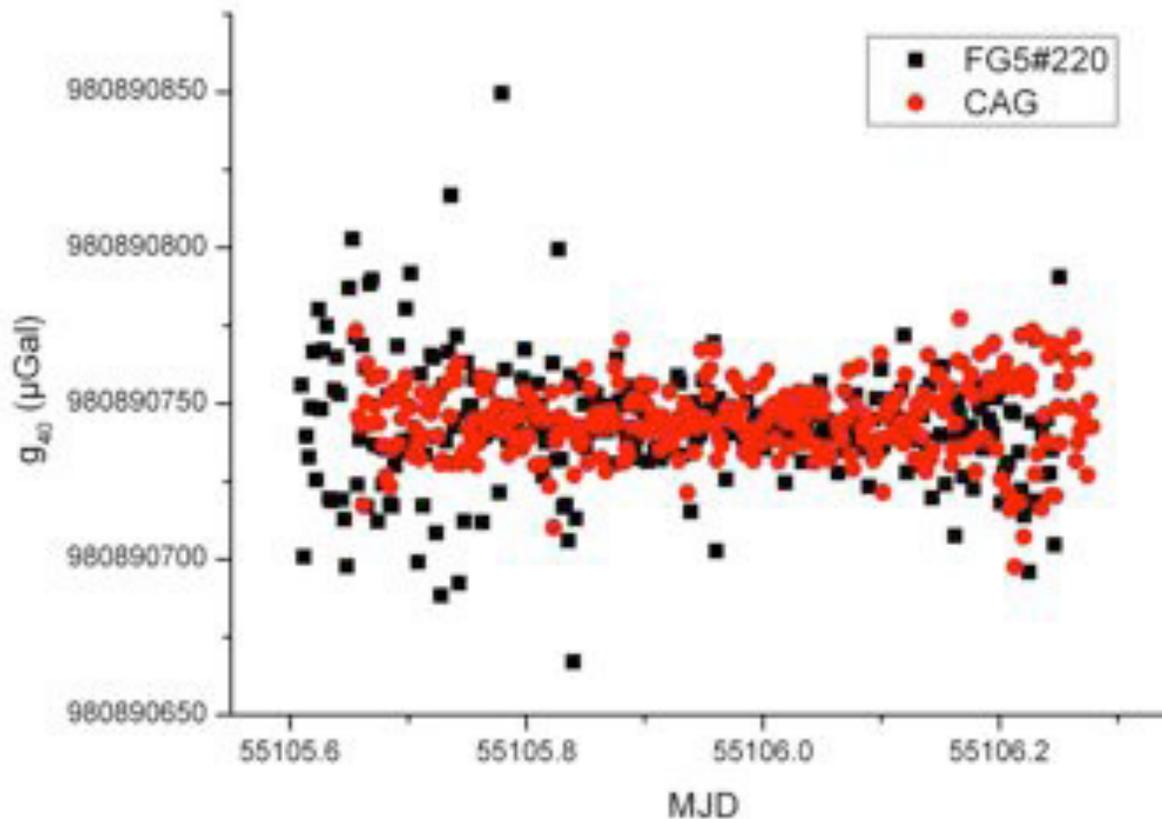
Comparaison à Trappes

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 :
gFG5@G40=980890741(1)



Accord à 4 μGal

Exactitude à 6 μGal

Depuis le 1^{er} octobre: Exactitude estimée à 3 μGal

[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

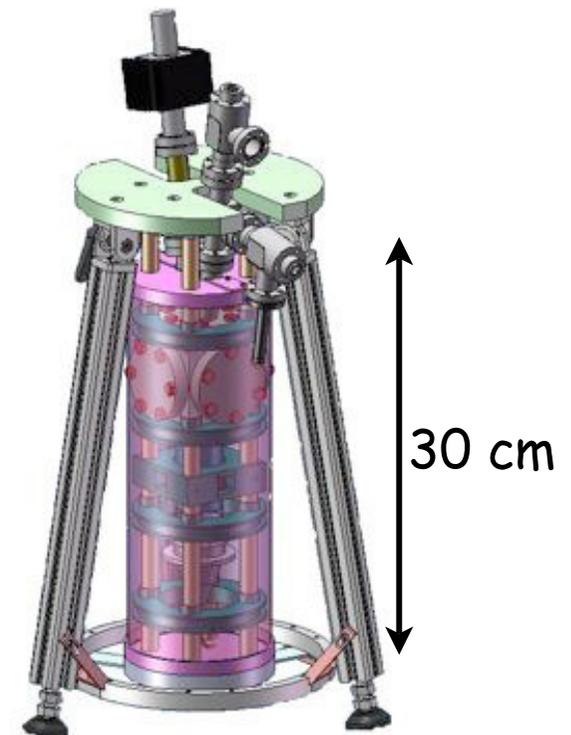
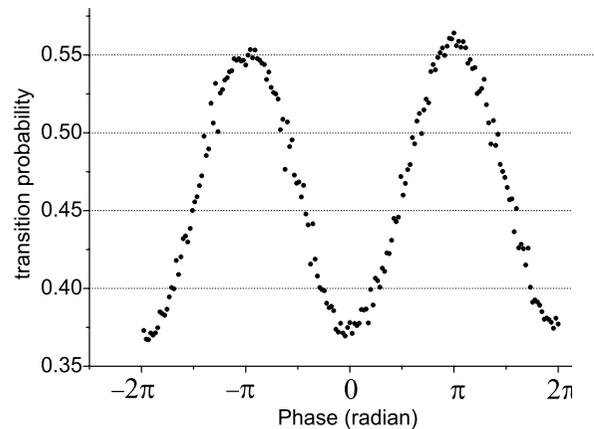
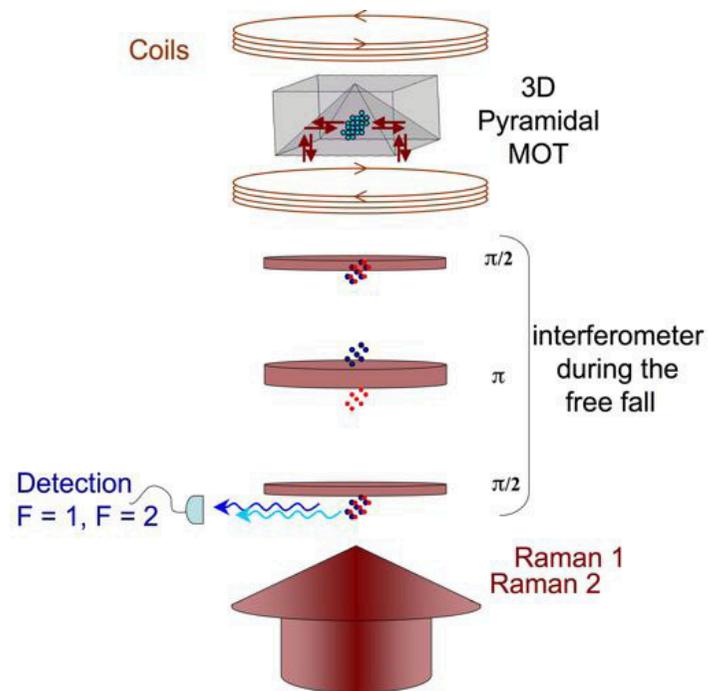
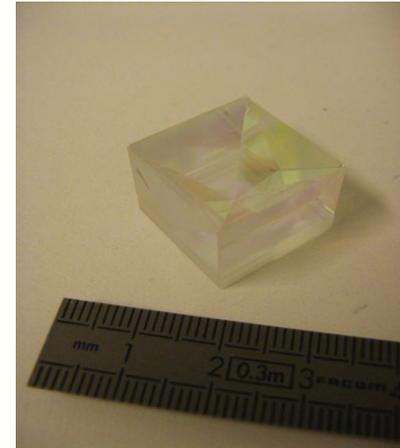
alternatives aux technologies standard (gravimètres à coin de cube et relatifs à ressort)

- ✓ Nécessite une **simplification** des dispositifs
- ✓ Intérêt du **taux de répétition élevé**
 - s'affranchir des plateformes anti-vibrations
- ✓ **Mesures en continu** : pas de vieillissement mécanique

Gravimètre compact

Caractéristiques : réduction drastique de la complexité

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



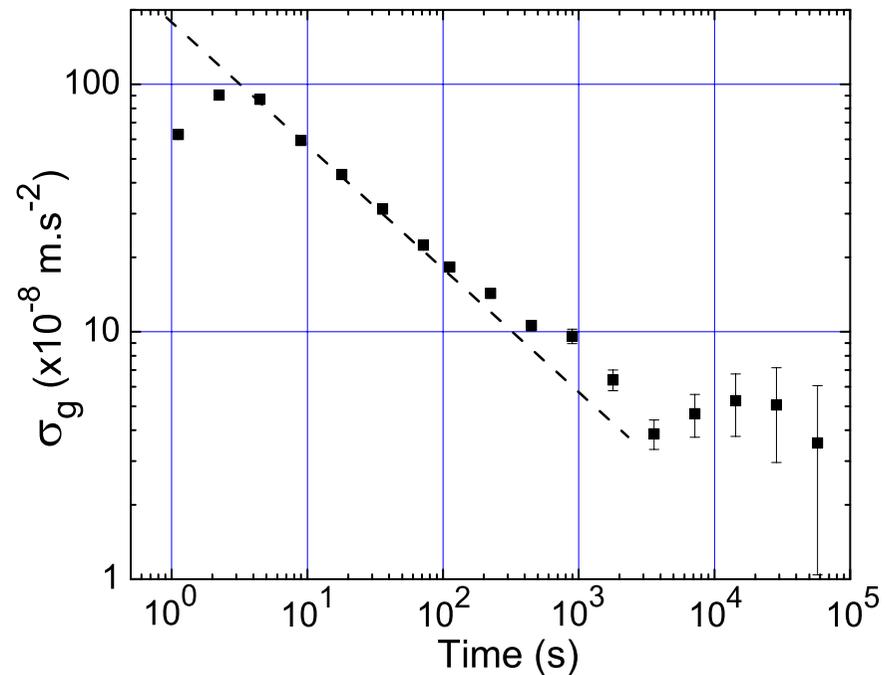
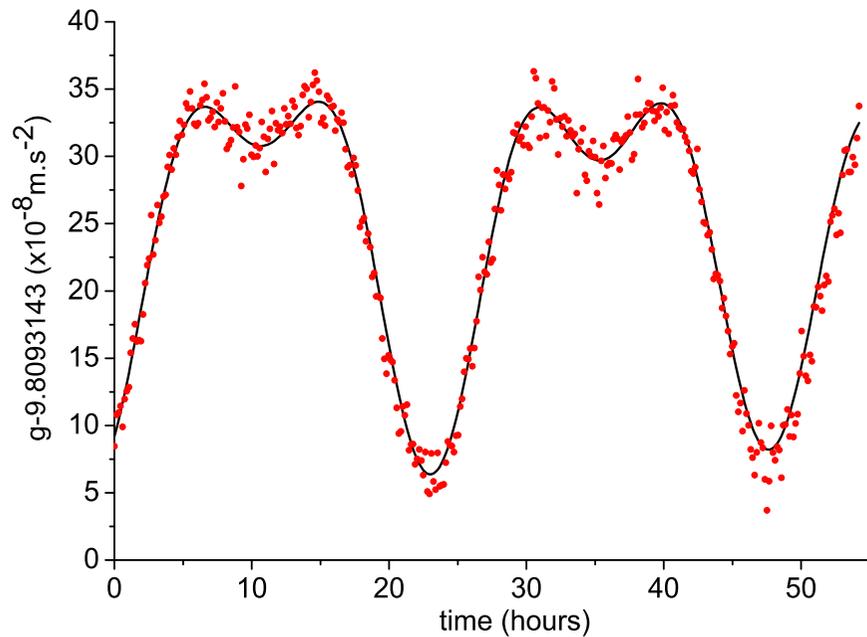
Gravimètre compact

Expérience de démonstration (fréquence de cycle 2Hz)

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

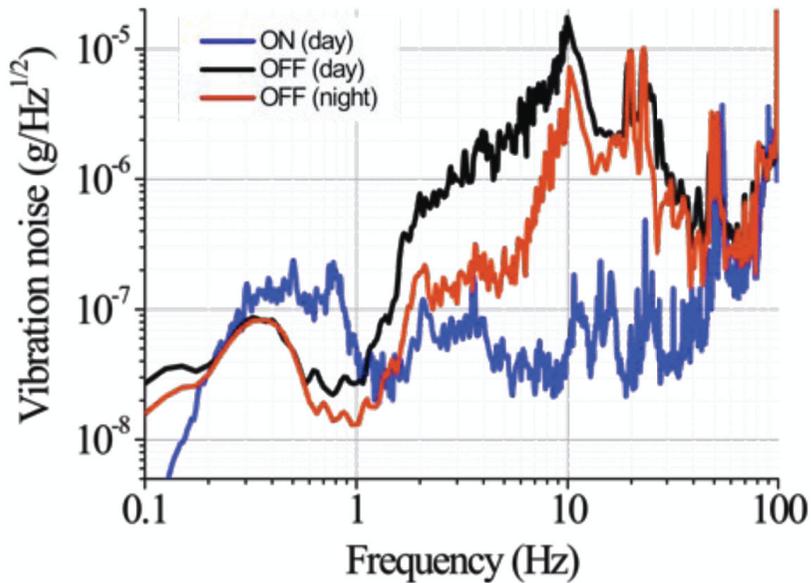
Sensibilité : 170 μGal en 1s

Stabilité long terme 5 μGal



Vibrations

Bruit de vibration



Influence

$$\Delta\Phi = k_{eff} (z_g(-T) - 2z_g(0) + z_g(T)) = k_{eff} \int_{-T}^T g_s(t) v_g(t) dt$$

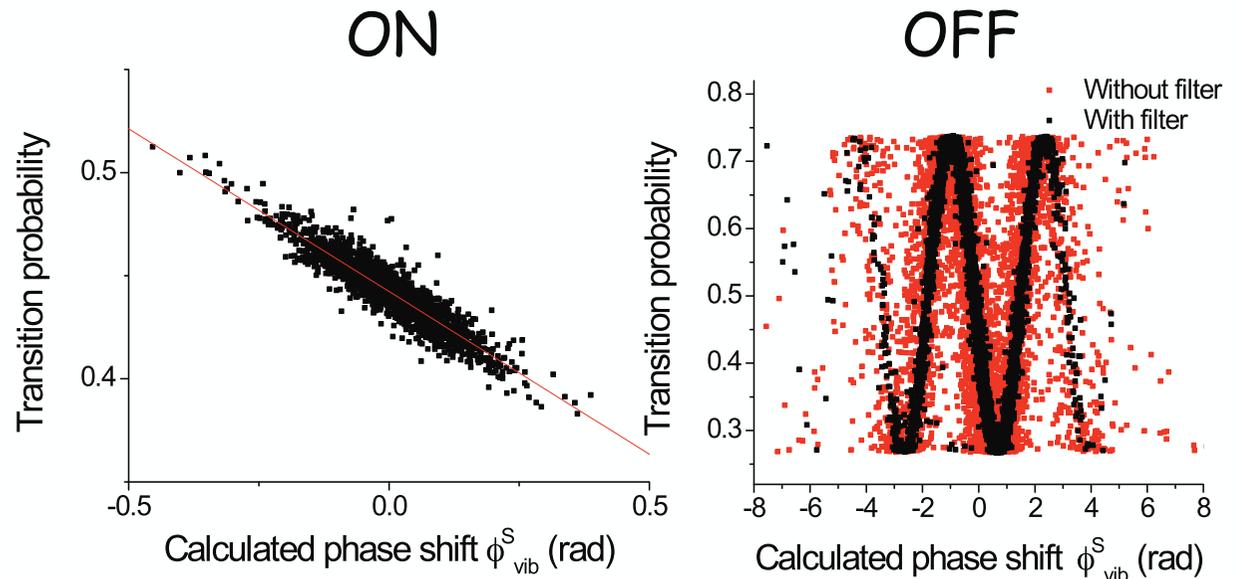
Plateforme anti-vibrations

@ 1s : 2,9 · 10⁻⁶ g ; 1,4 · 10⁻⁶ g ; 7,6 · 10⁻⁸ g
 OFF (jour) OFF (nuit) ON (jour)

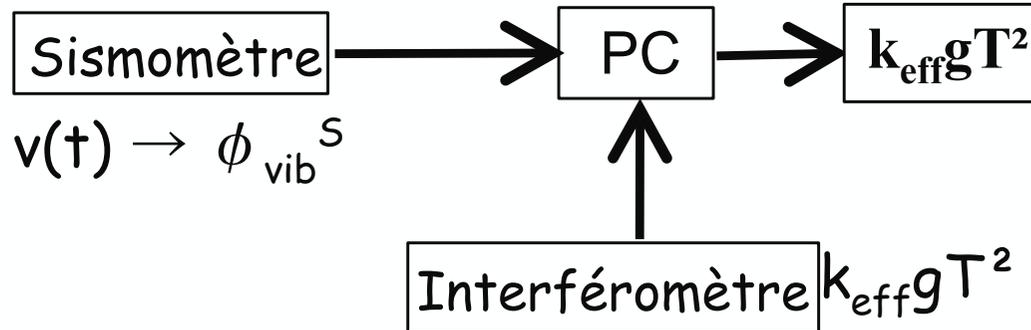
Corrélation sismo-atomes

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

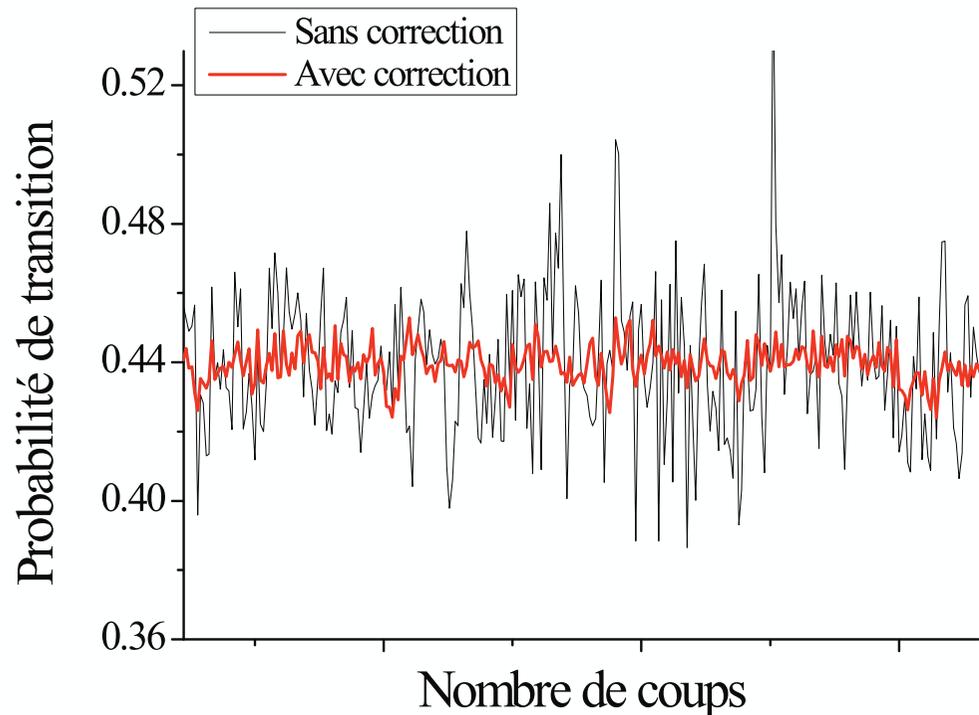
⇒ utilisation du sismomètre pour
 corriger la mesure des atomes



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 ~ 3

Meilleur résultat

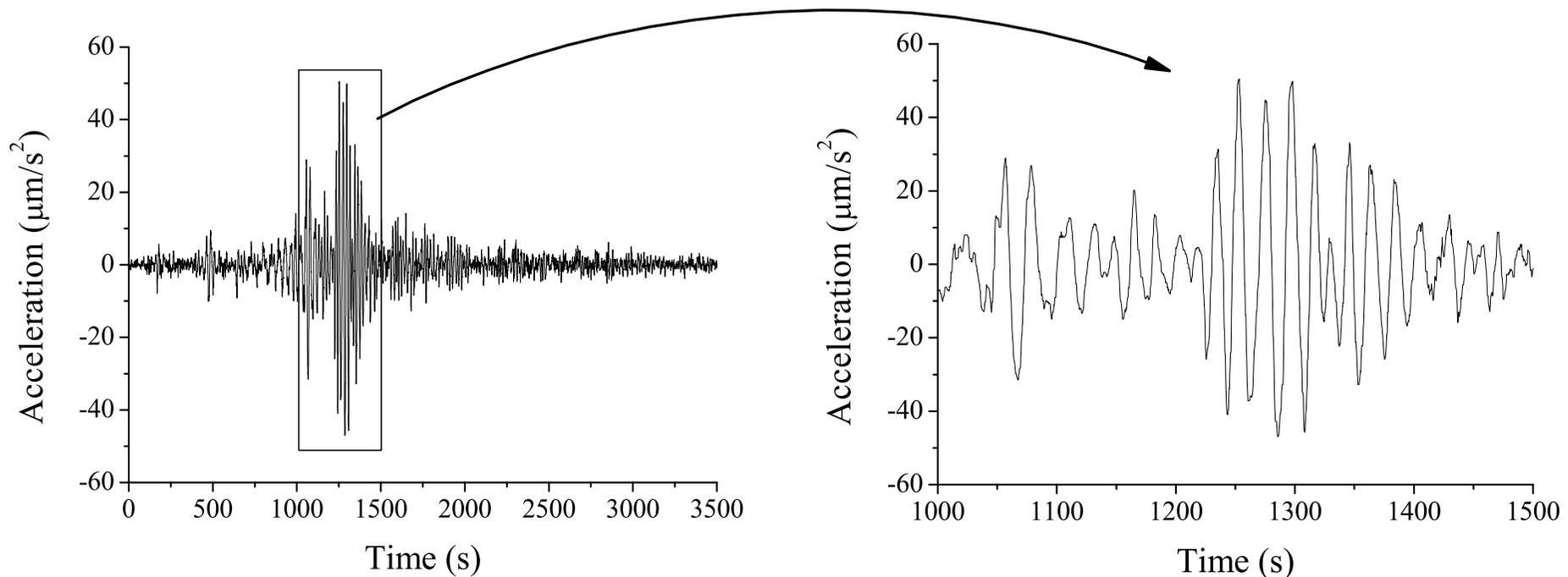
Nuit - Clim éteinte

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

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)

[Plan]

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

Gravimètre : conclusion et perspective

- ✓ Performance à l'état de l'art
 - Sensibilité court terme $20 \mu\text{Gal}$ à 1s (observatoire de Paris)
 - Interféromètre atomique : $8 \mu\text{Gal}$ à 1s (S. Chu et al.)
 - FG5 (commercial) : $40 \mu\text{Gal}$ à 1s (observatoire de Paris)
 - Exactitude : $3 \mu\text{Gal}$
 - FG5 : $2-3 \mu\text{Gal}$
- ✓ Future proche : affiner l'exactitude : but $1 \mu\text{Gal}$
 - utilisation de sélection Raman suivant les directions transverses
 - cartographie des déphasages liés aux défauts de front d'onde

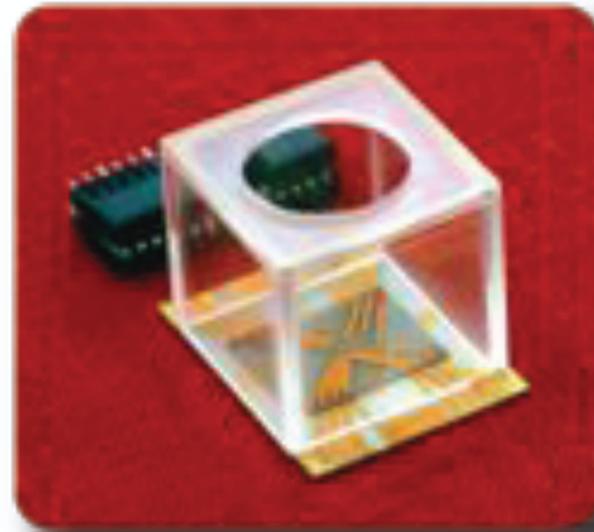
Sources ultra-froide (BEC)

- ✓ Dans une géométrie standard d'interféromètre : utilisation d'un piège dipolaire (lumineux)
 - Meilleure définition de la source atomique : limite les effets systématiques liés aux défauts de front d'ondes des lasers :
 - 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° nulle
 - Étude des déphasages d'interactions entre atomes
 - Augmentation du temps de mesure : applications spatiales
 - Test du principe d'équivalence (ICE, MWXG)

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

