tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Senseur inertiel à ondes de matière aéroporté

Remi Geiger

Groupe d'Optique Atomique

Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique

Directeurs de thèse: Philippe Bouyer & Arnaud Landragin

Financement de la thèse:

soutenance de thèse – 17 octobre 2011

Quelques applications des senseurs inertiels

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

Navigation inertielle

- accéléromètres et gyromètres embarqués

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

biais ~ 10^{-5} $m.s^{-2}$

↓

dérive en position ~ 100 m après une heure de vol

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Quelques applications des senseurs inertiels

Navigation inertielle

- accéléromètres et gyromètres embarqués

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

biais ~ 10^{-5} $m.s^{-2}$

↓

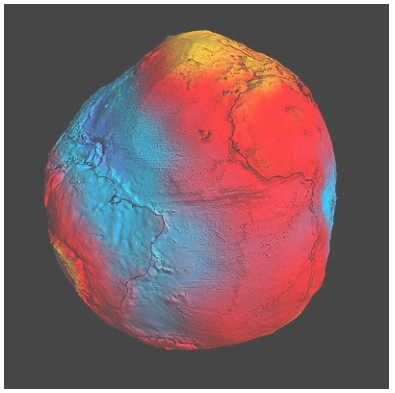
dérive en position ~ 100 m après une heure de vol

Géophysique

- étude du sous-sol (hydrocarbures)
- campagnes de prospection aéroportées

→ précision ~ 1 μg

- détermination du géoïde (océanographie)



ESA/GOCE, 2011

sensibilité: 10^{-12} $m.s^{-2}$

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Quelques applications des senseurs inertiels

Navigation inertielle

- accéléromètres et gyromètres embarqués

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

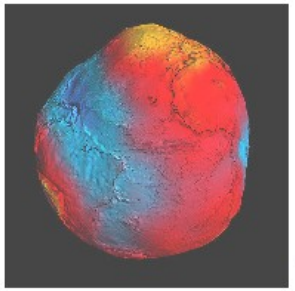
biais ~ 10^{-5} $m.s^{-2}$

↓

dérive en position ~ 100 m après une heure de vol

Géophysique

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



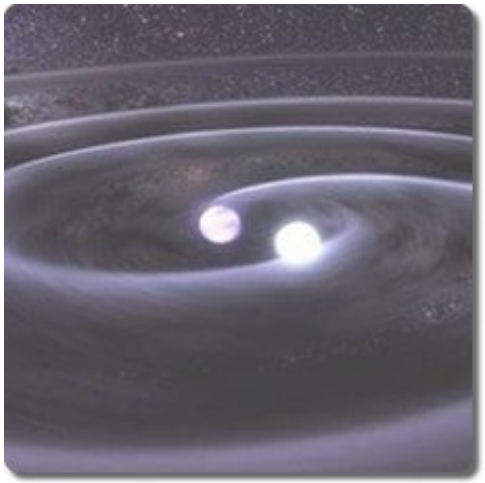
ESA/GOCE, 2011

sensibilité: 10^{-12} $m.s^{-2}$

Physique fondamentale

- *test du principe d'équivalence*
- détection d'ondes gravitationnelles

→ mesurer l'accélération relative de deux objets



sensibilité requise:

~ 10^{-15} $m.s^{-2}$ à f_{GW}

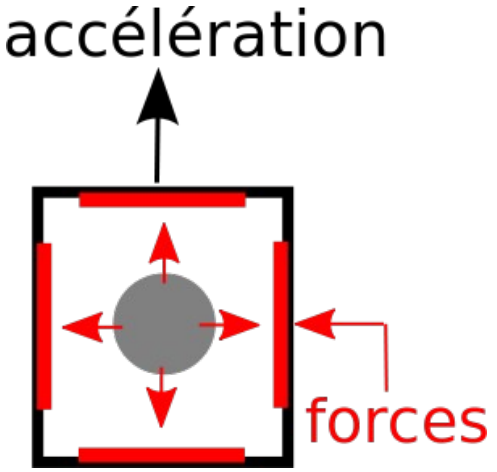
(~ 1 Hz par exemple)

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Technologies d'accéléromètres

1. **Suivi du mouvement d'un objet solidaire du référentiel accéléré**

- accéléromètres piézo-électriques
- accéléromètres à poutres vibrantes (MEMS)
- gravimètres supraconducteurs, accéléromètres électrostatiques (masse d'épreuve maintenue en position fixe)



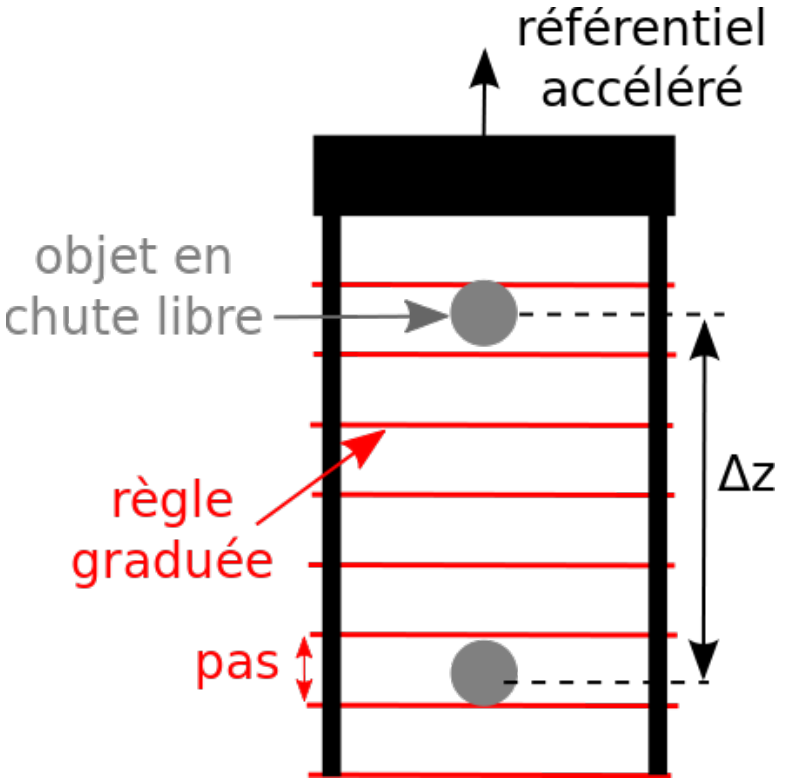
tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Technologies d'accéléromètres

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

2. **Mesurer le déplacement du référentiel accéléré relativement à un objet en chute libre:**

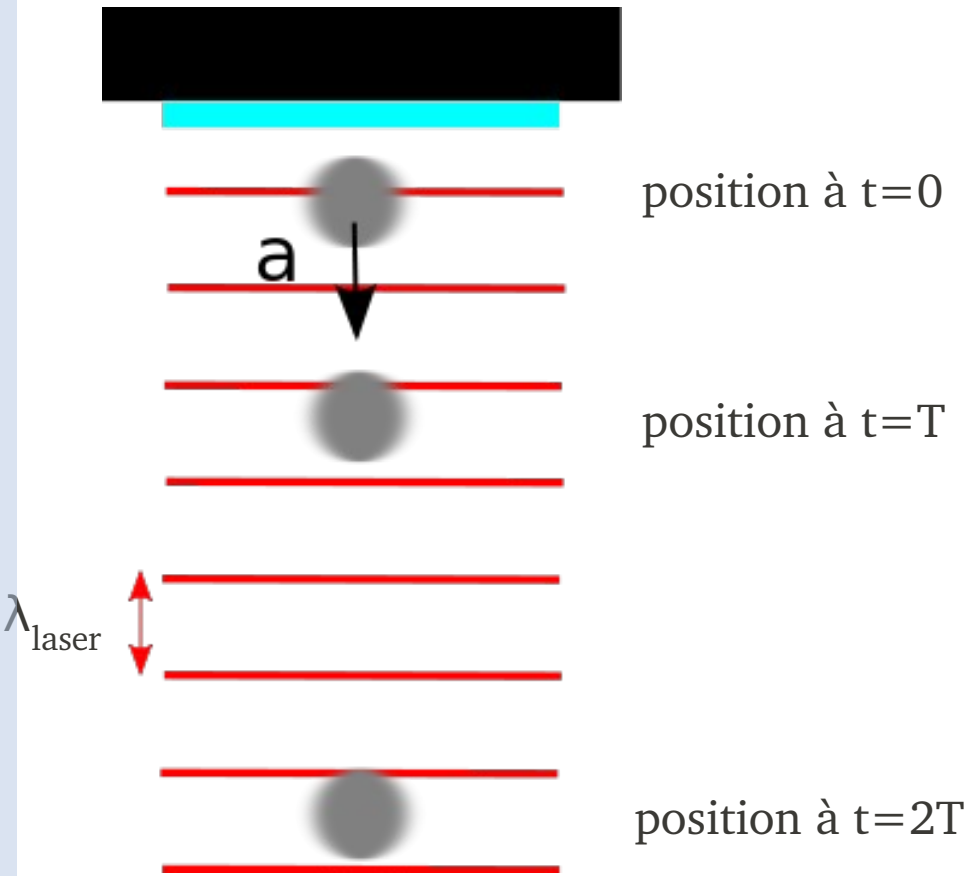
- gravimètre à coin du cube (Faller, 1967)
- interféromètres à ondes de matière (neutrons, 1975 – atomes, 1991)



Principe simplifié de l'accéléromètre atomique

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



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

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Ordres de grandeur

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

- 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 ~ 20 ms

→ sensibilité aux accélérations ~ 10^{-5} m.s^{-2}

meilleurs accéléromètres aéroportés

- temps d'interrogation 2T ~ 10 s (espace)

→ sensibilité aux accélérations ~ 10^{-11} m.s^{-2}

tests des lois de la gravitation

Deux applications intéressantes des interféromètres atomiques

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Plan de l'exposé

1. Accéléromètre atomique: principe & dispositif expérimental

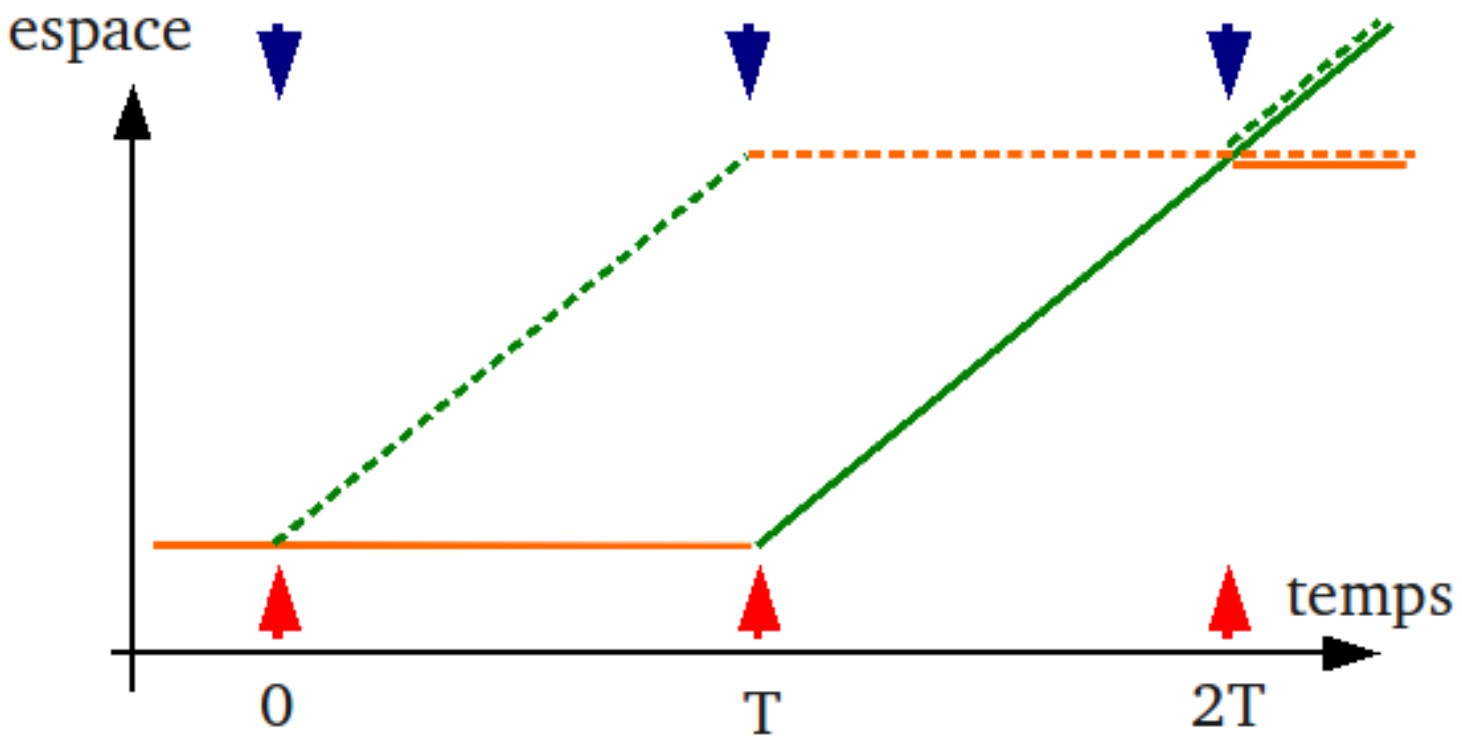
2. Fonctionnement aéroporté d'un accéléromètre à atomes de ^{87}Rb

3. Vers un test du principe d'équivalence faible par interférométrie atomique

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Interféromètre atomique

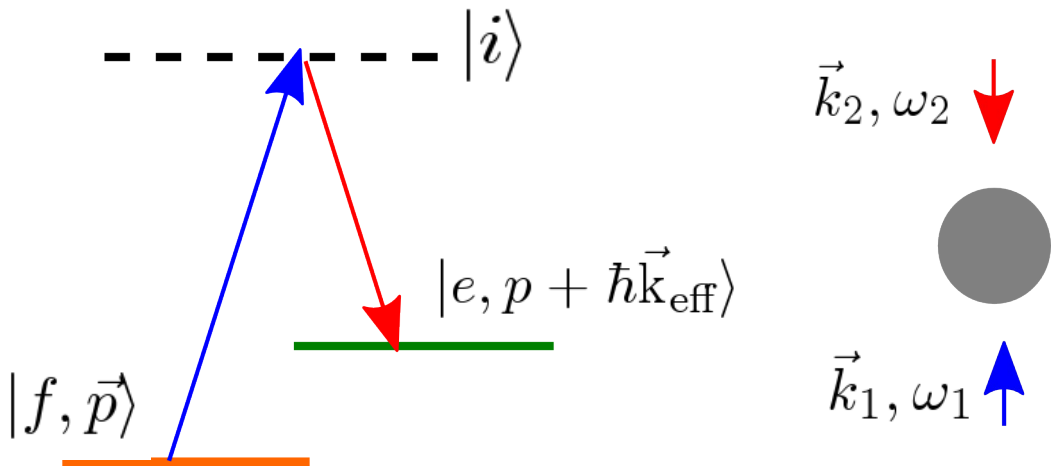


Différence de phase entre les deux ondes de matière → accélération

Bordé, 1989 – Kasevich & Chu, 1991

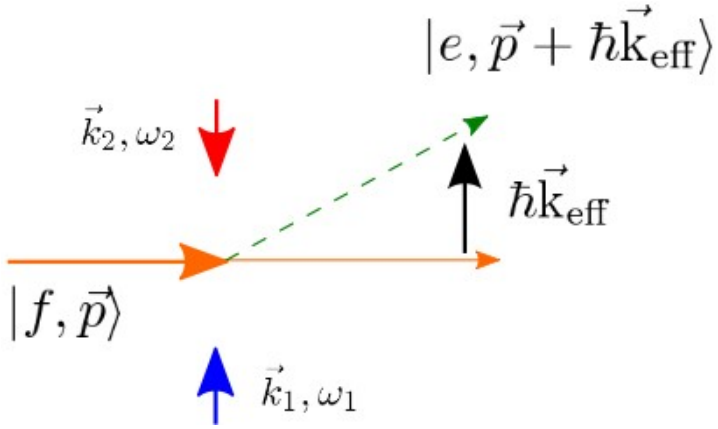
Transitions Raman stimulées

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



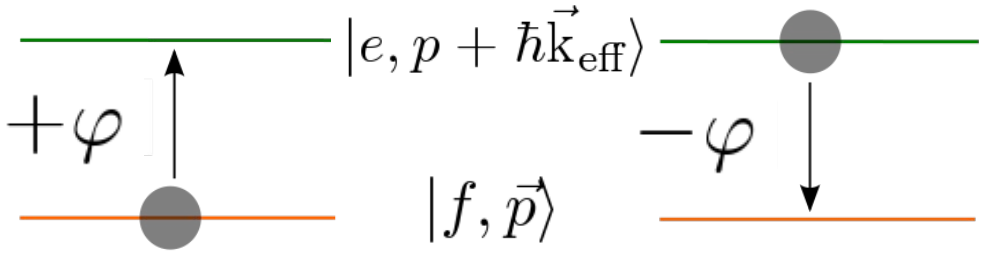
Transfert d'impulsion (~1 cm/s)

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



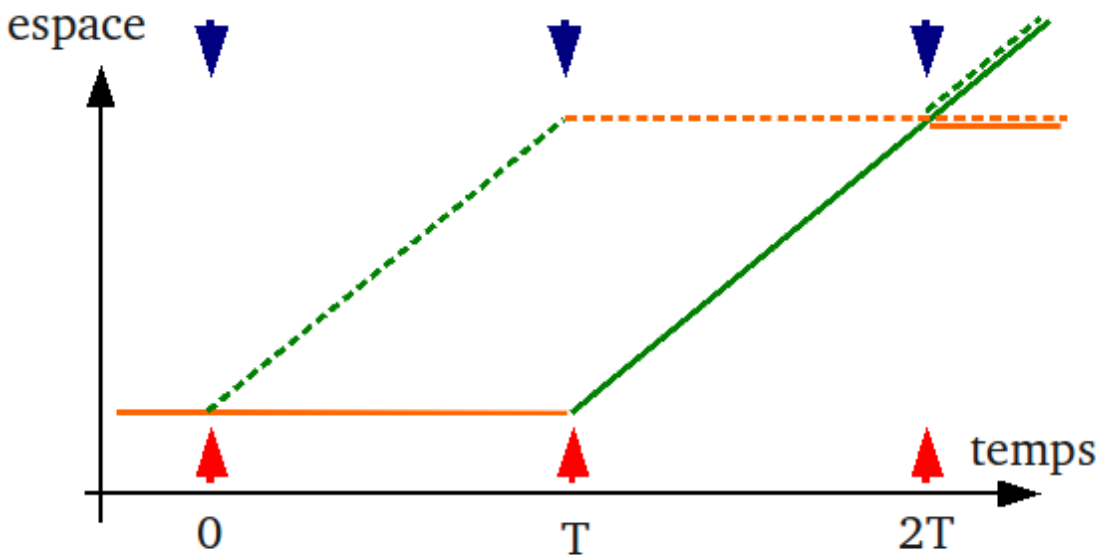
Impression de la différence de phase des lasers:

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



tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Différence de phase entre les deux ondes



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

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

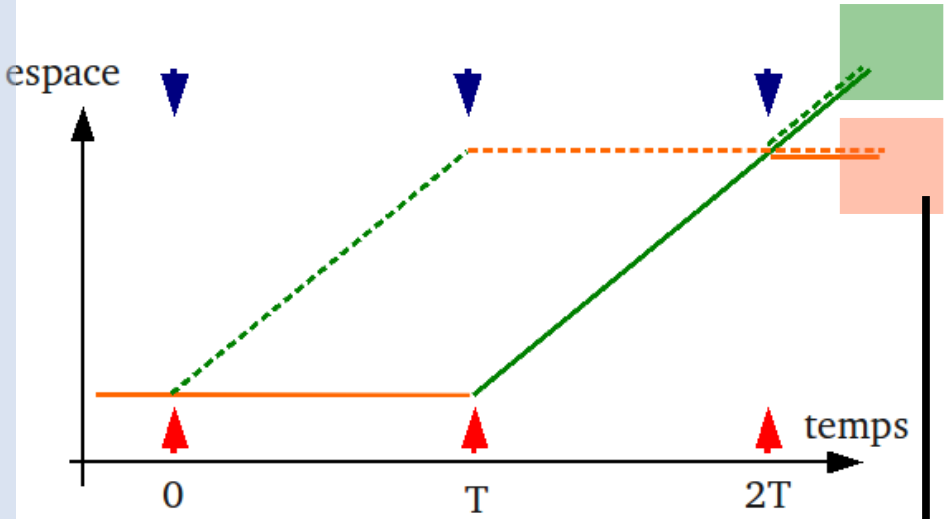
$\longrightarrow$ accélération constante

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

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

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Mesure de la différence de phase

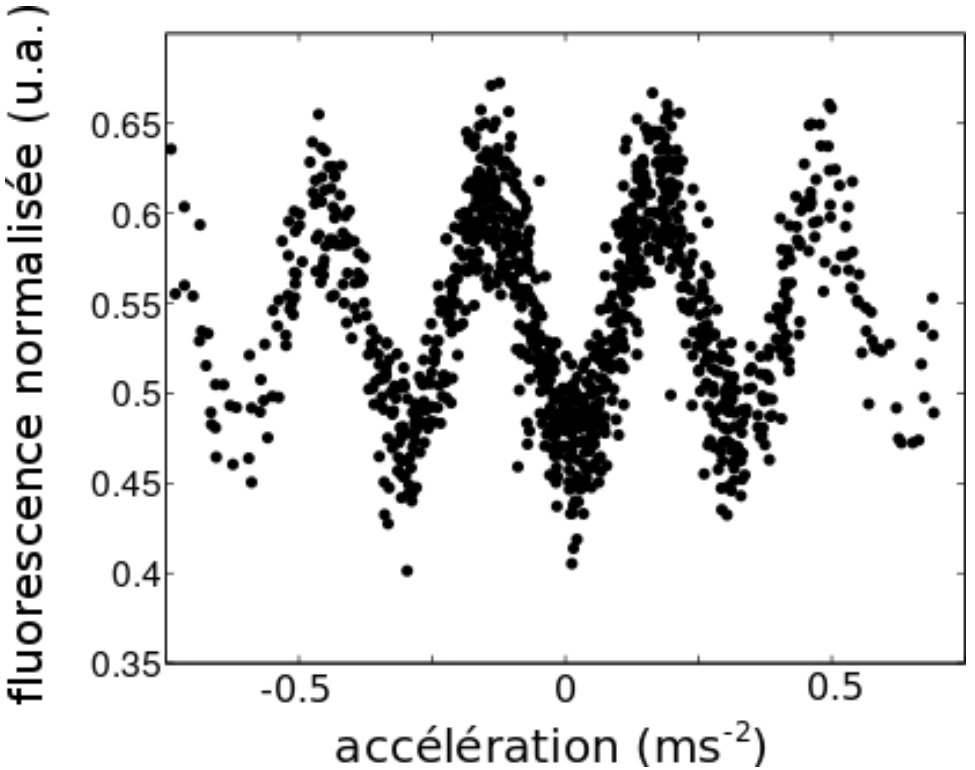


Détection normalisée des deux populations d'atomes par fluorescence

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

Signal en sortie de l'interféromètre:

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



tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Pourquoi des atomes froids?

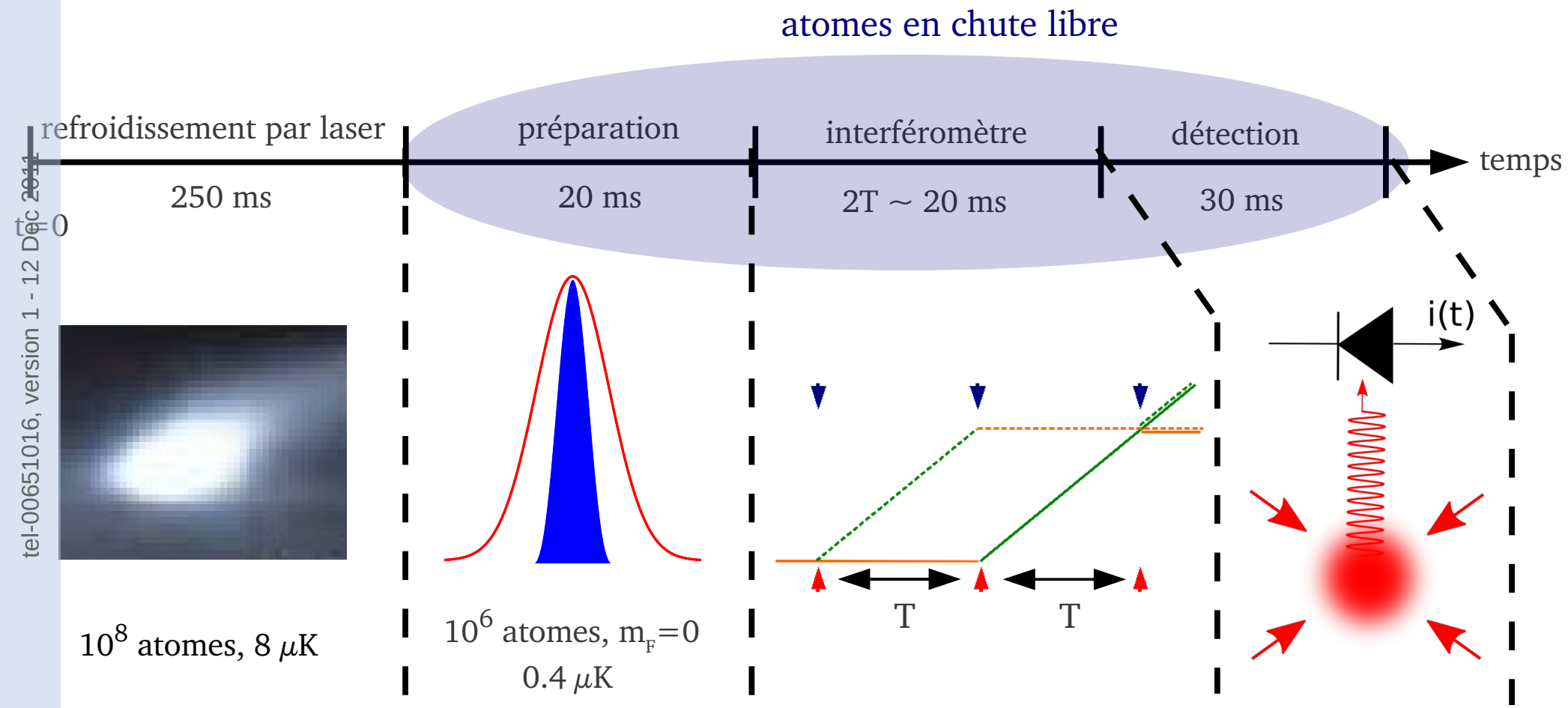
Contraste de l'interféromètre limité par:

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

$2T \sim 20$ ms **atomes froids** $v_{at} \sim 1$ cm/s (température $\sim \mu$K)	$2T \sim 10$ s **atomes ultra-froids** $v_{at} \sim 1$ mm/s (température ~ 10 nK)

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Séquence expérimentale



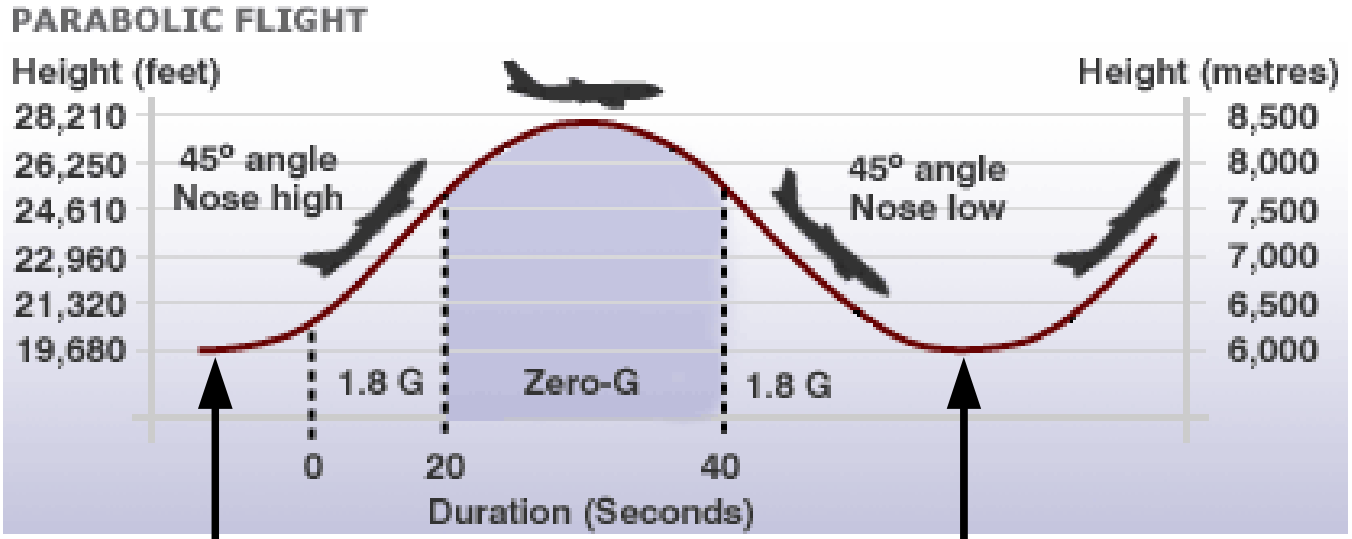
tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Notre laboratoire: l'Airbus A300-0g de Novespace

Notre laboratoire: l'Airbus 0-g de Novespace

aéroport de Bordeaux-Mérignac

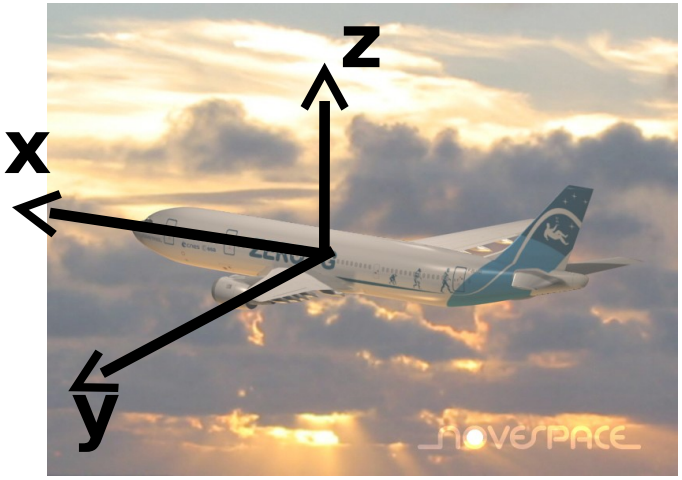


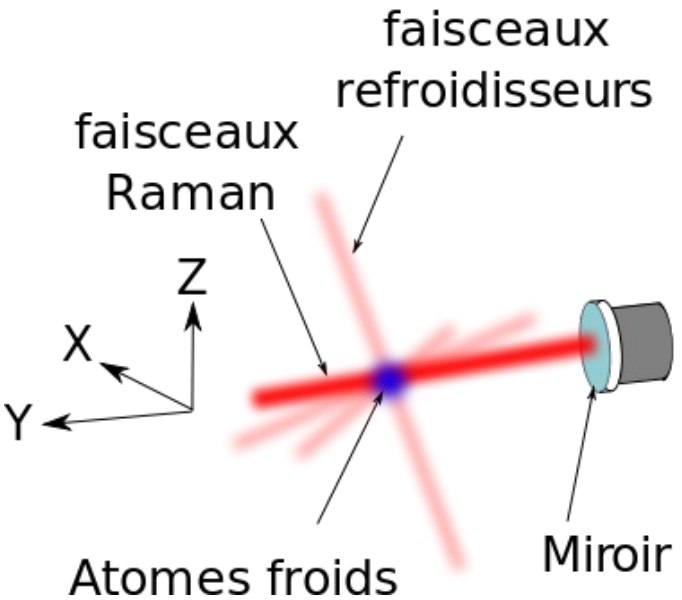
1-g 1-g

- 30 minutes de 0-g par campagne de vols
- niveau de vibrations résiduelles ~ 10^{-2} g
- **expériences durant les phases 1-g et 0-g**

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Direction choisie pour les mesures d'accélération





Durant ma thèse, nous avons effectué les mesures d'accélération suivant la direction des ailes (Y)

- fonctionnement similaire sous 1-g et en 0-g
- niveau de vibrations plus faible que suivant les axes X et Z

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Contraintes & solutions

Contraintes pour une expérience d'atomes froids:

- Transport Palaiseau - Bordeaux
- Vibrations $\sim$ 0.5 ms^{-2}
- Phases d'hypergravité
- Fluctuations de température 5 - 30°C (nuit - jour)
- Acquisition de données limitée à 3 jours/6 mois

- composants fibrés de la technologie télécom (longueur d'onde: 1.56 μm)
- doublage de fréquence en espace libre → 780 nm pour refroidir et manipuler le ^{87}Rb

Lienhart *et al.*, 2007 - Stern *et al.*, 2009

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Expérience dans l'avion en 2010

3 bâtis (2 m^3), 700 kg, consommation électrique de 1000W

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

2. Accéléromètre à atomes de ^{87}Rb aéroporté

- étendue de mesure du capteur atomique

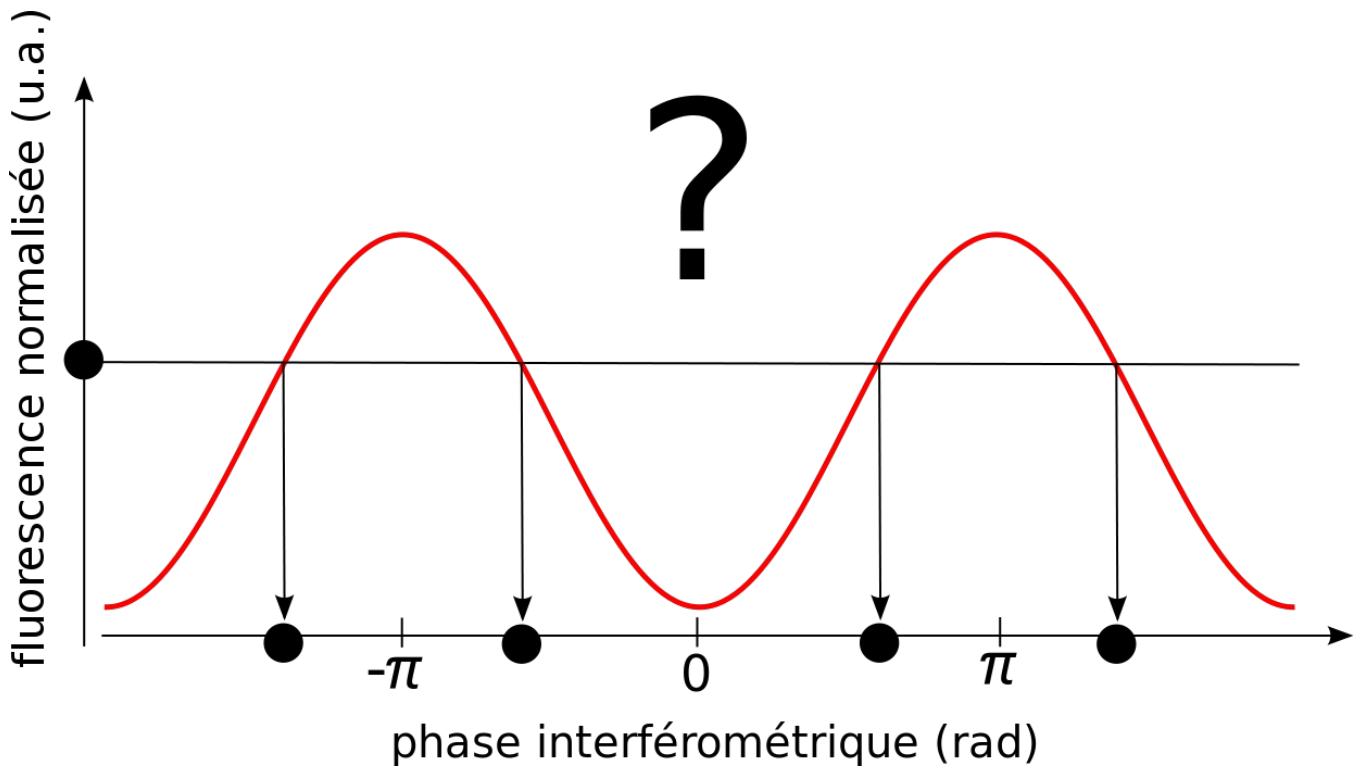
- corrélation avec des accéléromètres mécaniques

→ premières mesures d'accélération dans un avion

Plage de réciprocité de l'interféromètre

Signal en sortie d'interféromètre: $P = P_0 - A\cos\Phi$

perte d'information si $\delta\Phi > \pi$
(réponse non réciproque de l'interféromètre)



tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

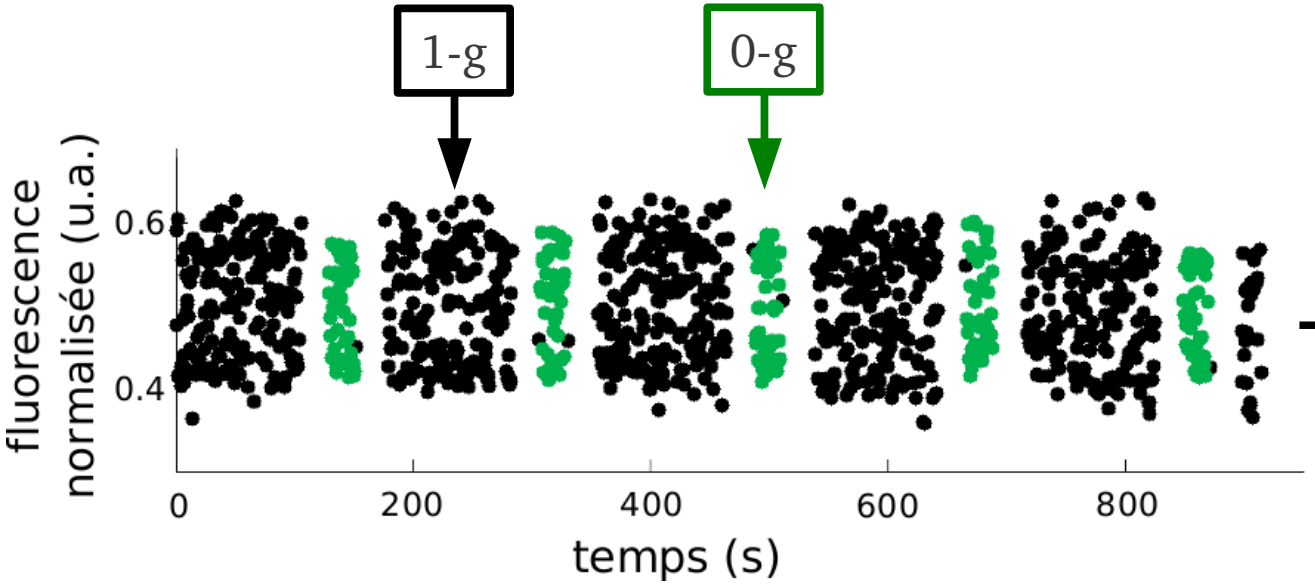
Plage de réciprocité de l'interféromètre

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

hors de la zone de réciprocité de l'IA

Fluctuations d'accélération $\delta a \sim 0.5$ m.s^{-2}

→ fluctuations de phase $\delta\Phi = \delta a \times k_{eff} T^2 \sim 15$ rad pour T=1.5 ms



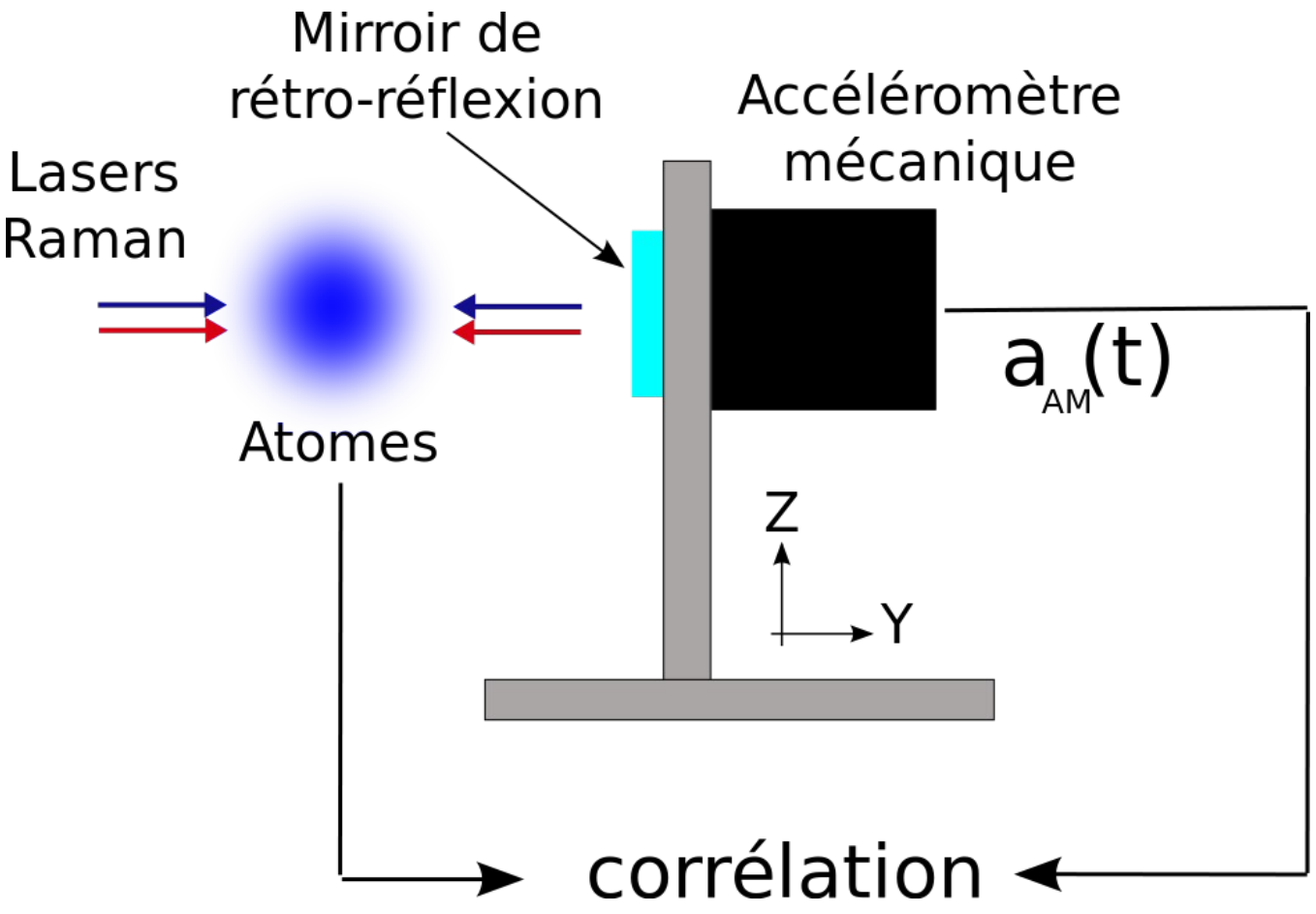
information inexploitable *a priori*

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

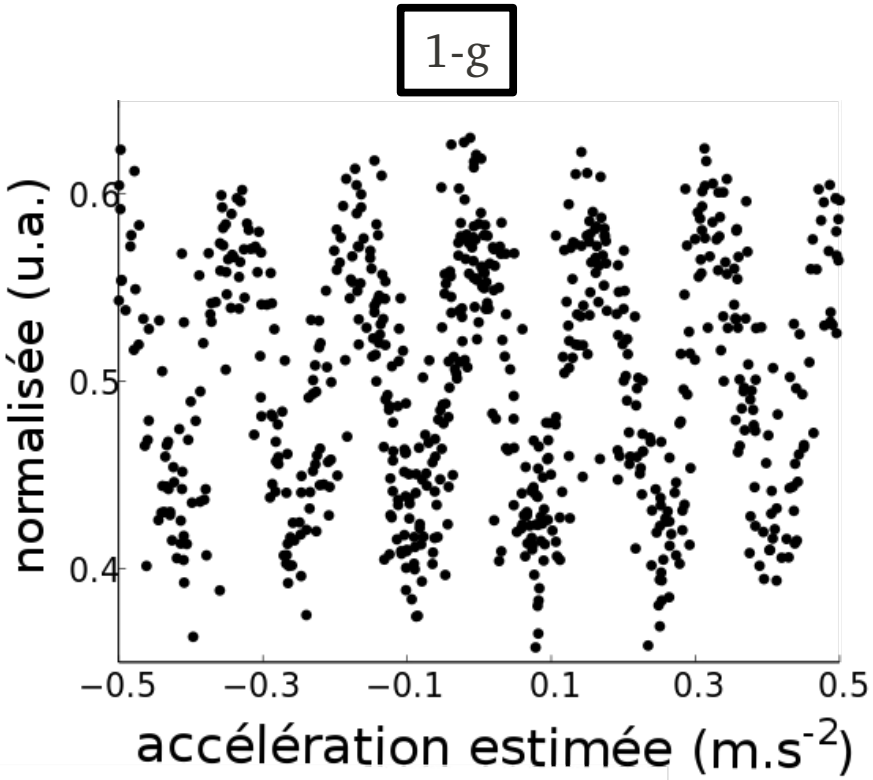
Comment retrouver l'information sur l'accélération?

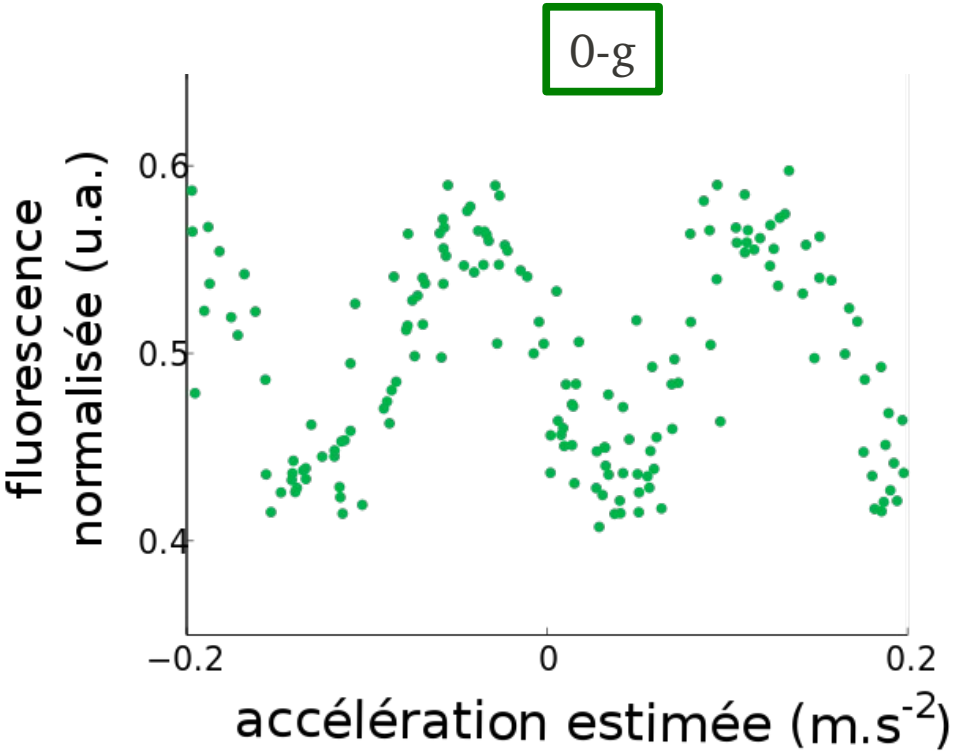
1. Utilisation d'un capteur auxiliaire mesurant les accélérations sur une large plage
2. Corrélation des signaux de l'IA et du capteur auxiliaire



Merlet *et al.*, 2009

Corrélation IA – accéléromètre mécanique



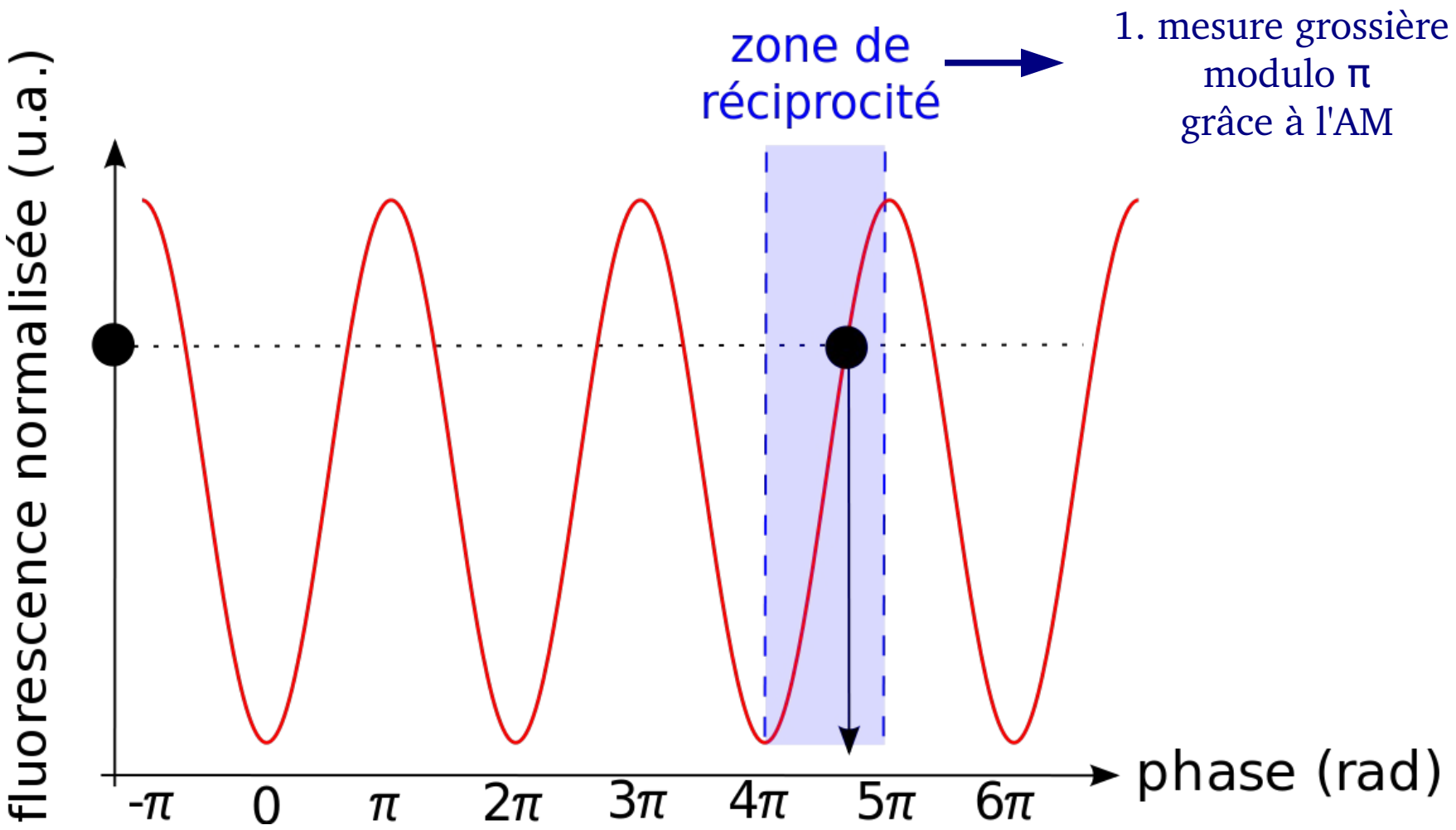


On retrouve l'information sur l'accélération !

Question: comment exploiter au mieux le signal de l'interféromètre atomique ?

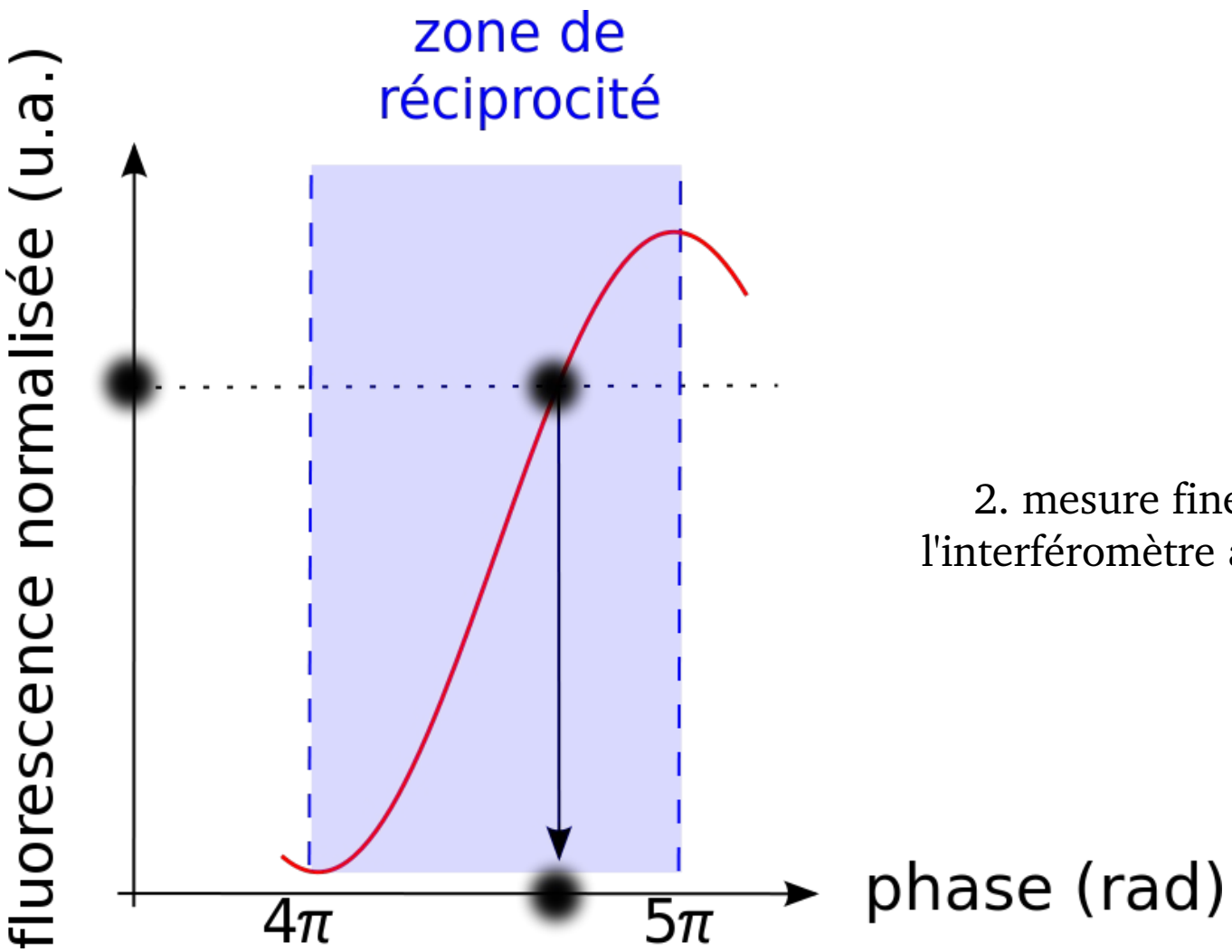
tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Accéléromètre hybride mécanique/atomique



tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Accéléromètre hybride mécanique/atomique



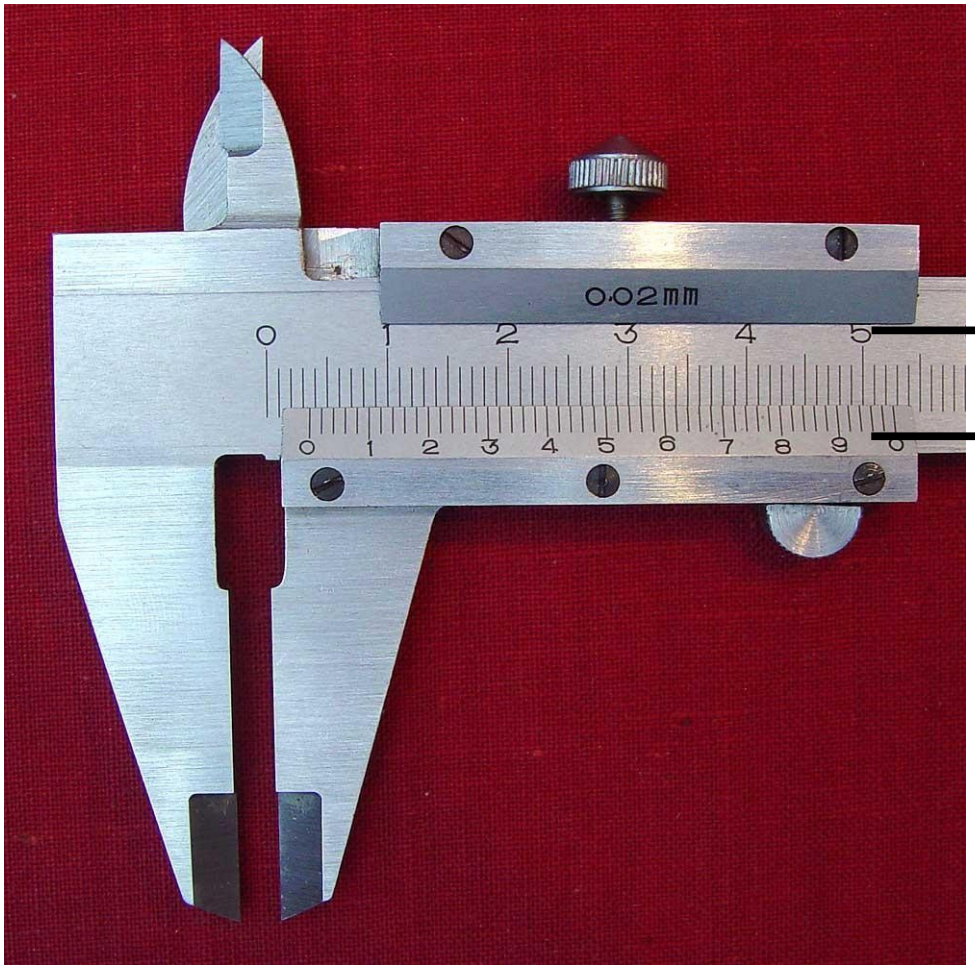
2. mesure fine avec l'interféromètre atomique

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Mesure en deux étapes de type Vernier

Principe:

1. mesure grossière avec l'AM: repérage de la frange sur laquelle opère l'IA à chaque coup
2. mesure fine: lecture de la phase de l'IA au sein de sa zone de réciprocité



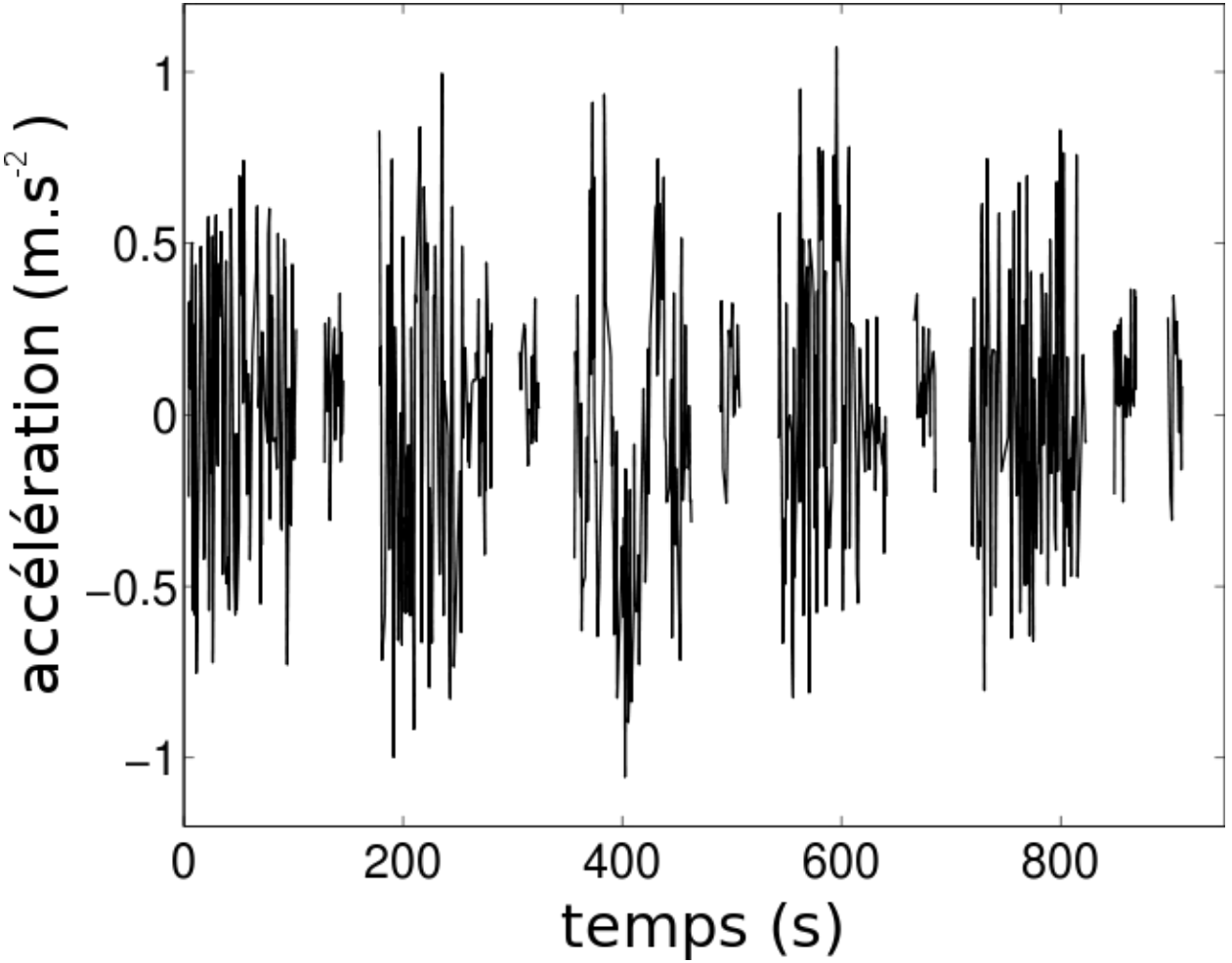
accéléromètre mécanique

interféromètre atomique

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Accéléromètre hybride dans l'avion

Première mesure de l'accélération d'un avion avec un interféromètre atomique



Accélération suivant l'axe des ailes

→ Sensibilité de la mesure?

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Sensibilité de l'accéléromètre hybride

$$\sigma_a = \frac{1}{\mathrm{SNR}} \times \frac{1}{k_{\mathrm{eff}} T^2}$$

→ Les AMs fixent la limite pour le temps d'interrogation maximal

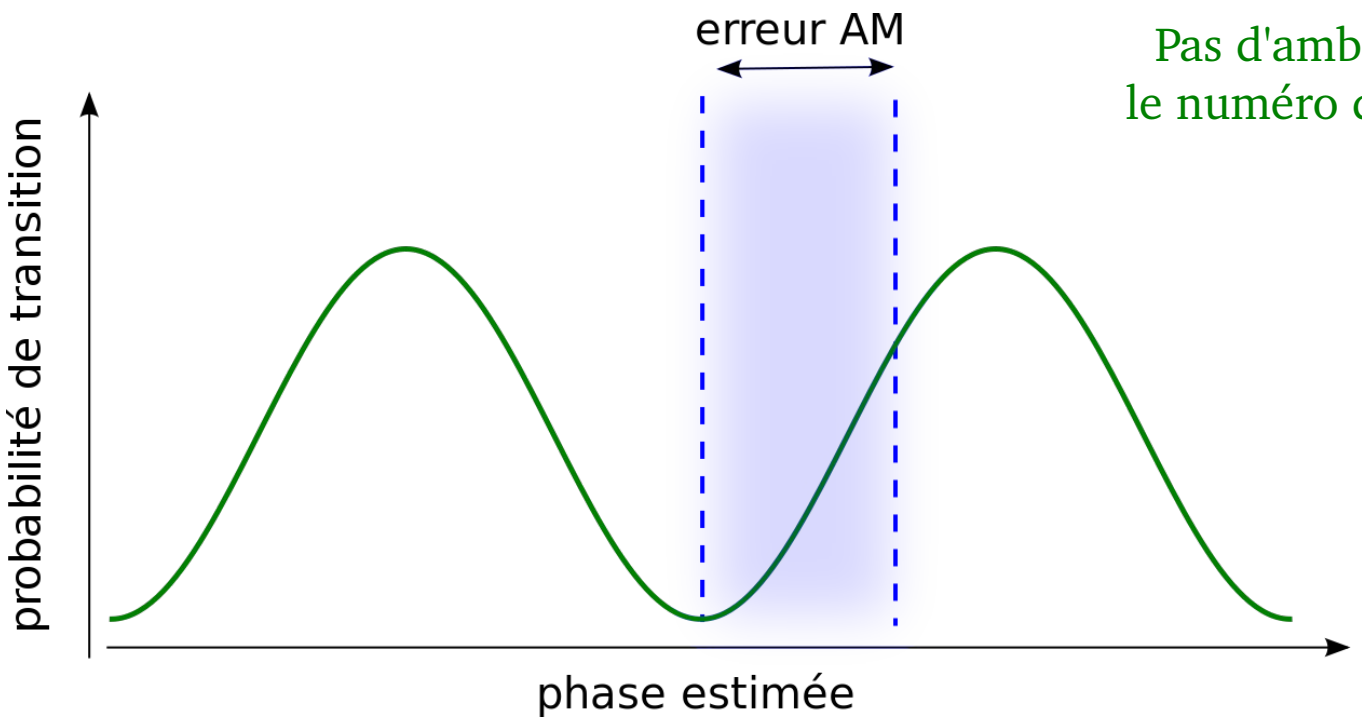
tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Erreurs dues aux imperfections des AMs

$$\sigma_a = \frac{1}{\mathrm{SNR}} \times \frac{1}{k_{\mathrm{eff}} T_{\mathrm{AM}}^2}$$

→ Erreurs sur l'estimation de la phase par les AMs

- **non linéarités**
- couplages d'axes
- bruit propre



Pas d'ambiguïté sur le numéro de la frange

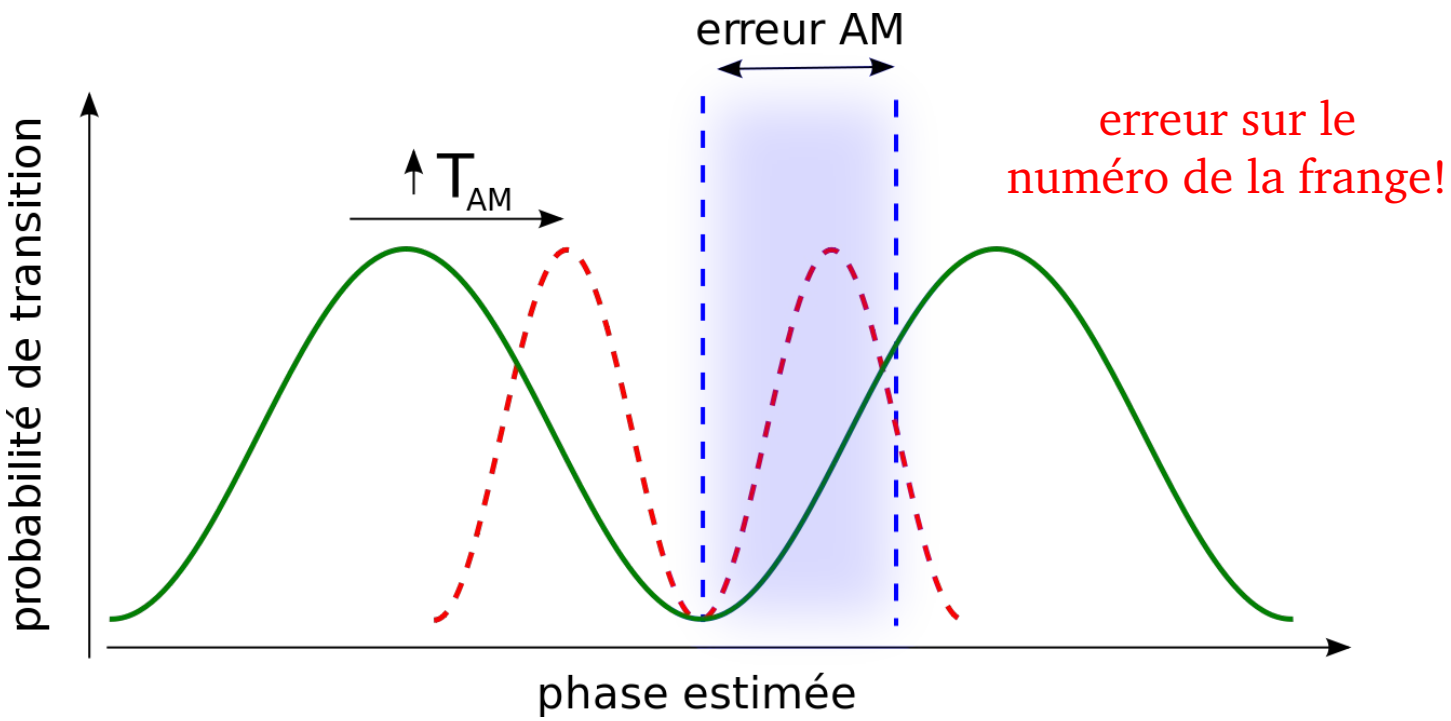
tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Erreurs dues aux imperfections des AMs

$$\sigma_a = \frac{1}{\mathrm{SNR}} \times \frac{1}{k_{\mathrm{eff}} T_{\mathrm{AM}}^2}$$

→ Erreurs sur l'estimation de la phase par les AMs

- **non linéarités**
- couplages d'axes
- bruit propre



tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

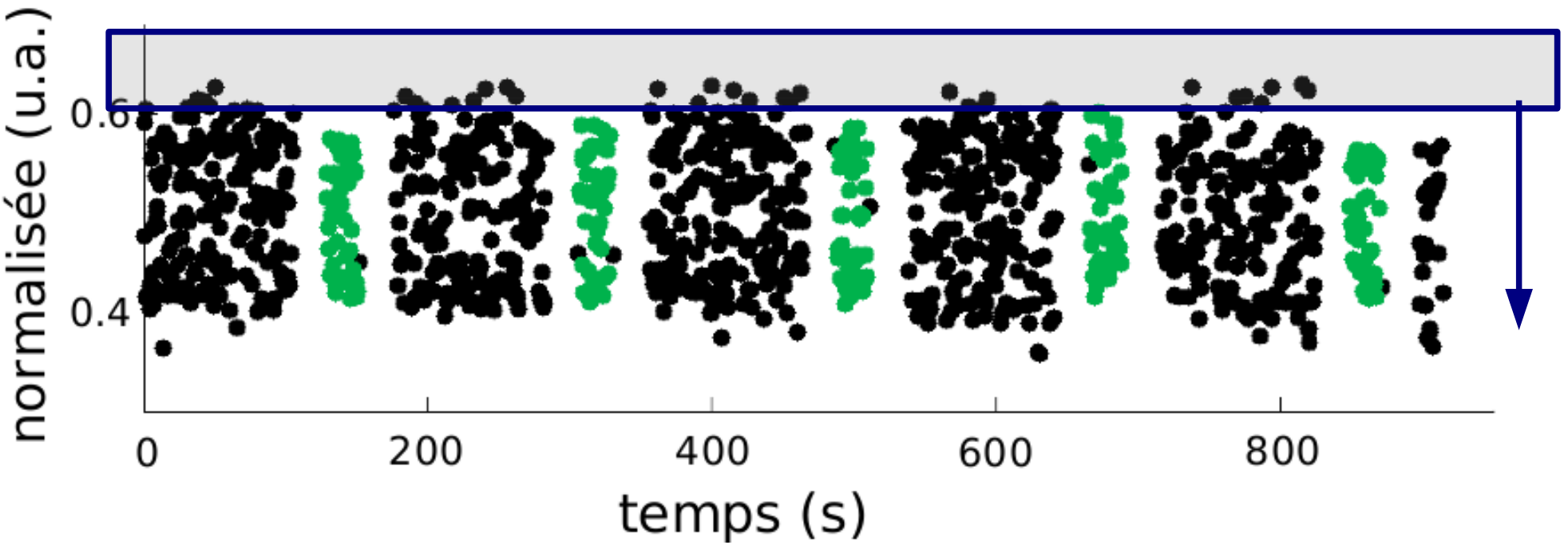
tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Estimation du bruit de l'interféromètre atomique

$$\sigma_a = \frac{1}{\mathrm{SNR}} \times \frac{1}{k_{\mathrm{eff}} T_{\mathrm{AM}}^2}$$

- **contraste**: température des atomes
- **bruit**: détection

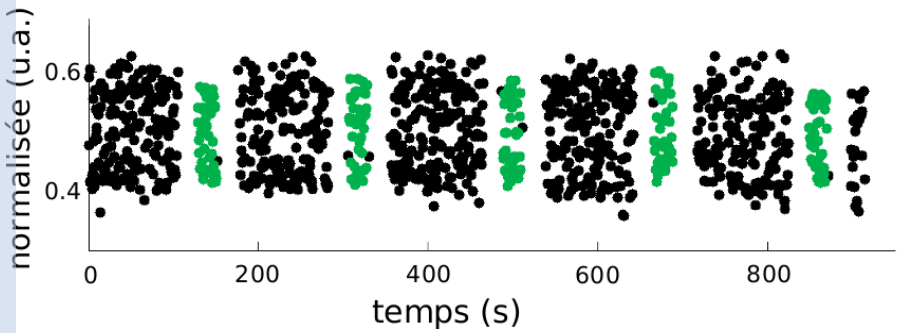
Analyse statistique des données atomiques en sortie d'interféromètre:



Estimation du bruit de l'interféromètre atomique

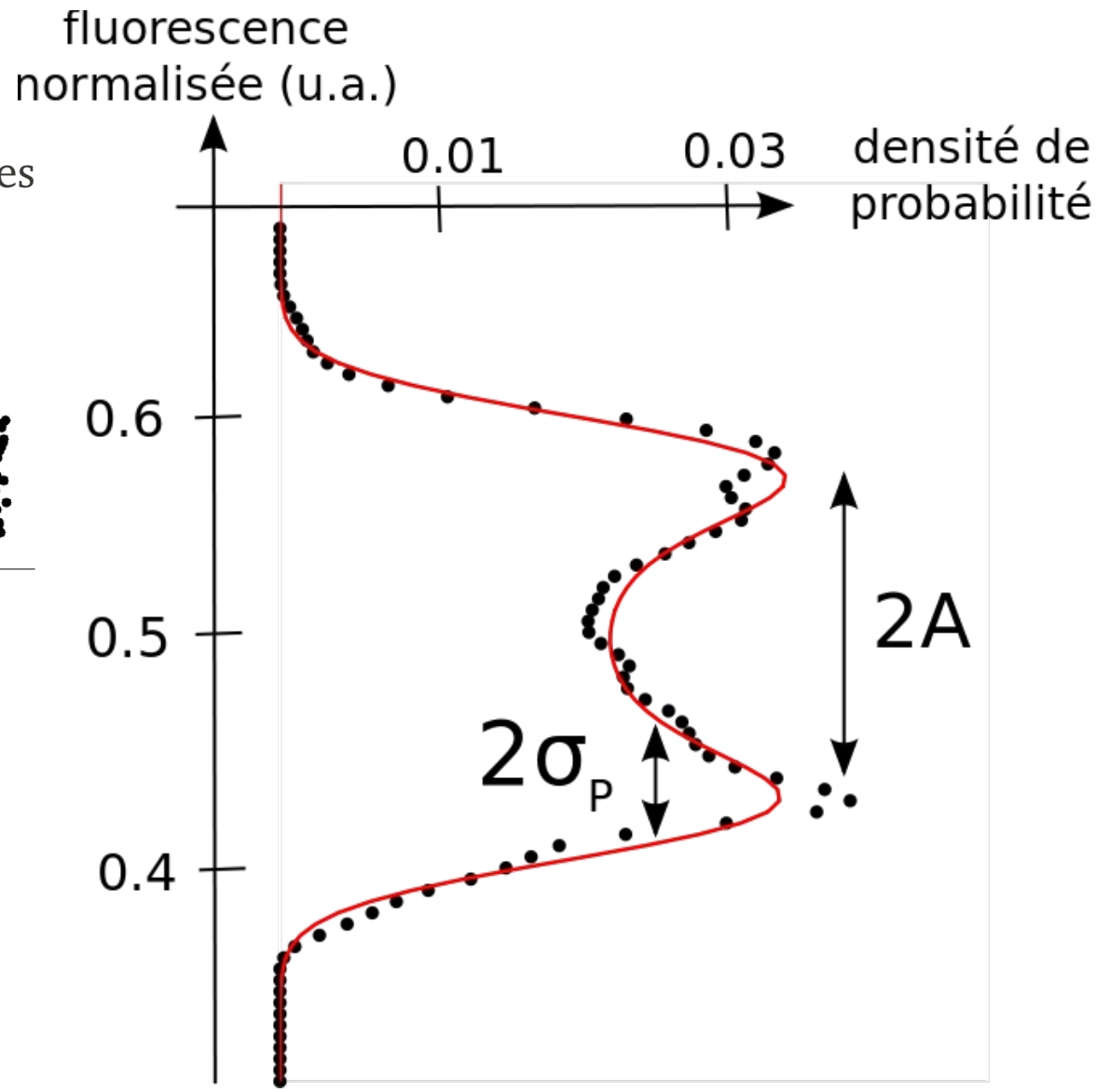
Analyse statistique des données atomiques

en sortie d'interféromètre:



$$\mathrm{SNR} = A/\sigma_P$$

Estimation indépendante des AMs



tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Sensibilité de l'accéléromètre hybride: bilan

$$\sigma_a = \frac{1}{\mathrm{SNR}} \times \frac{1}{k_{\mathrm{eff}} T_{\mathrm{AM}}^2}$$

Pour notre expérience: $T_{AM,\,max}$ = 3 ms & SNR = 3

→ sensibilité de 1.4 x 10^{-3} m.s^{-2} à une seconde (~ 300 fois plus faible que le niveau de vibrations)

Gain en dynamique par rapport au capteur mécanique = SNR de l'interféromètre

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Conclusion sur l'accéléromètre aéroporté

- premier accéléromètre atomique aéroporté (0-g et 1-g)
- méthode pour extraire le signal d'accélération du bruit
- analyse statistique de la sensibilité de l'interféromètre
- dynamique de mesure ~ 300 démontrée

Geiger, Ménoret, Stern *et al.*, *Nature Commun.* 2: 474 (2011)

Perspective d'amélioration réaliste:

T_{AM}=5 ms & SNR=100 → dynamique de mesure ~ 15 000 (sensibilité ~ 10^{-5} m.s^{-2})

incertitude sur les non-linéarités < 0.1%

Gauguet *et al.*, 2009

Application des accéléromètres atomiques à la navigation inertielle

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

3. Vers un test du principe d'équivalence faible par interférométrie atomique

- importance pour la physique fondamentale

- principe de l'expérience

- réjections des vibrations

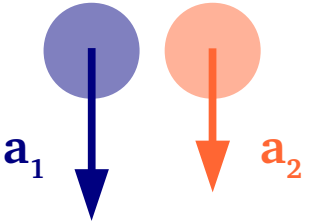
Le principe d'équivalence faible

- équivalence de la masse grave et de la masse d'inertie (Newton, 1726)
- pierre angulaire de la Relativité Générale (Einstein, 1907)

- **jamais** mis en défaut par l'expérience

→ tests actuels: pas de violation détectée au niveau $\eta \sim 2 \times 10^{-13}$ (LLR, 2004 & Eöt-Wash, 2008)

$$\eta = \frac{a_1 - a_2}{(a_1 + a_2)/2}$$



- **violations prévues** par de nombreuses théories d'unification des 4 interactions fondamentales

→ importance de **repousser les limites de précision** (CNES/MICROSCOPE, $\eta \sim 10^{-15}$, 2015)

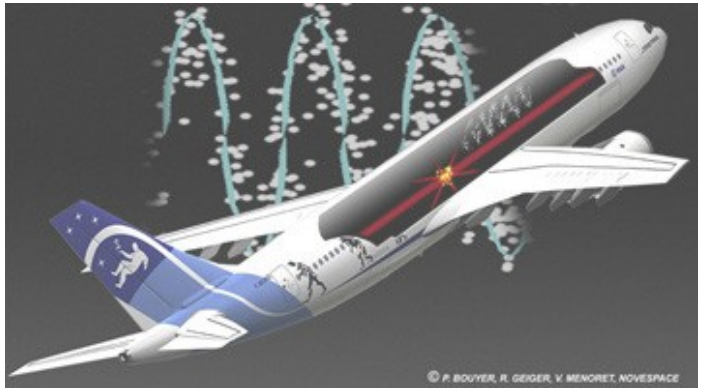
- difficulté du test: **discriminer** les forces gravitationnelles des forces d'inertie parasites

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

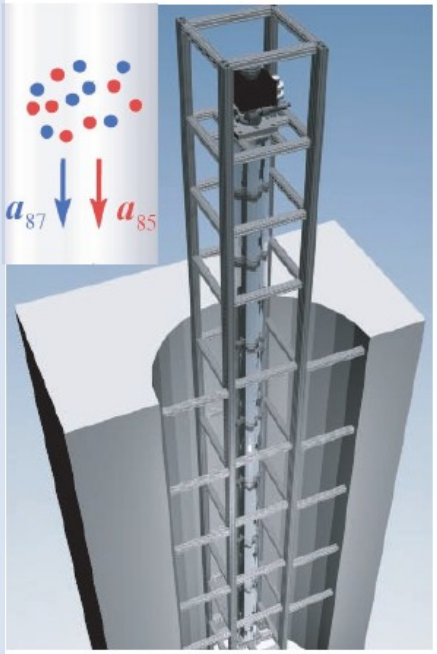
Tests par interférométrie atomique

Fray *et al.*, 2004
^{85}Rb – ^{87}Rb
$\eta \sim 1 \times 10^{-7}$

Groupe d'E. Rasel
DLR/ZARM, Brême
Tour de chute de 110 m



Groupe de P. Bouyer
CNES/Novespace, Bordeaux
Vols paraboliques



Groupe de M. Kasevich
Stanford
Enceinte à vide de 10 m

Choix des deux atomes:

- différence de masse
- même technologie laser
- réjection des vibrations

^{39}K: 767 nm

^{87}Rb: 780 nm

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Principe de l'expérience

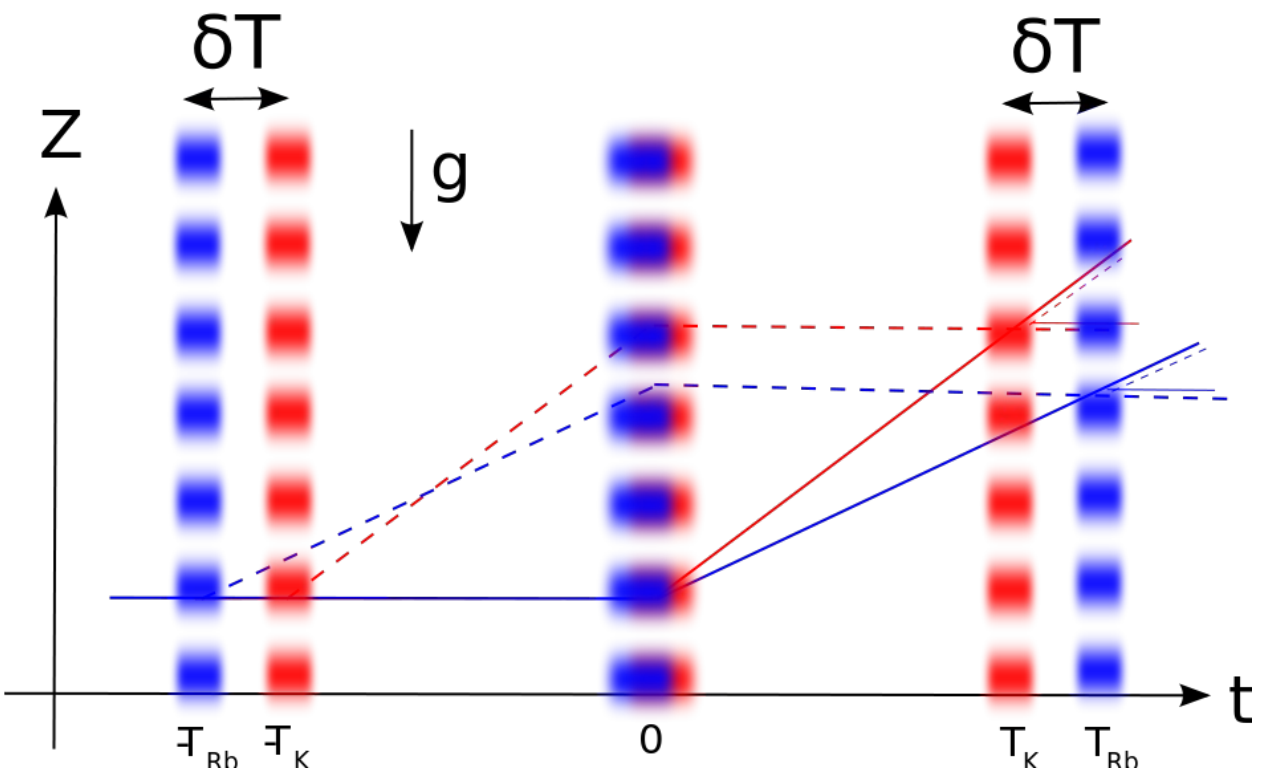
Ajustement du facteur d'échelle des deux accéléromètres:

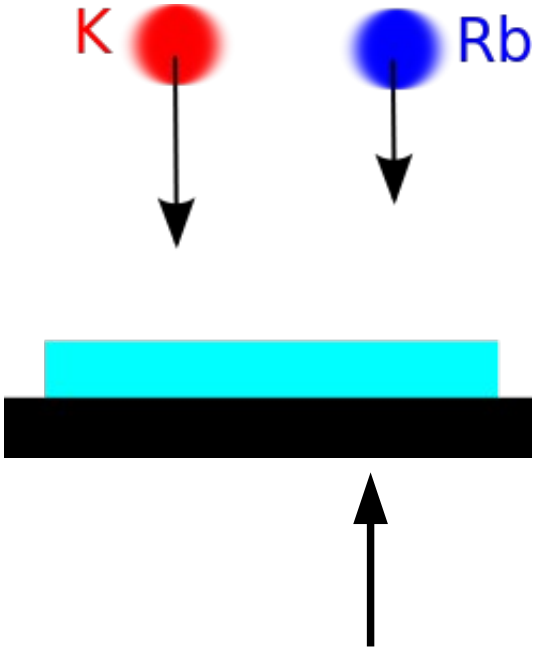
$$k_{\mathrm{K}} T_{\mathrm{K}}^2 = k_{\mathrm{Rb}} T_{\mathrm{Rb}}^2$$

→ réjection totale des accélérations parasites à fréquence nulle

→ temps d'interrogation légèrement différents

Mesure de l'accélération différentielle $\delta a = a_{Rb} - a_K$

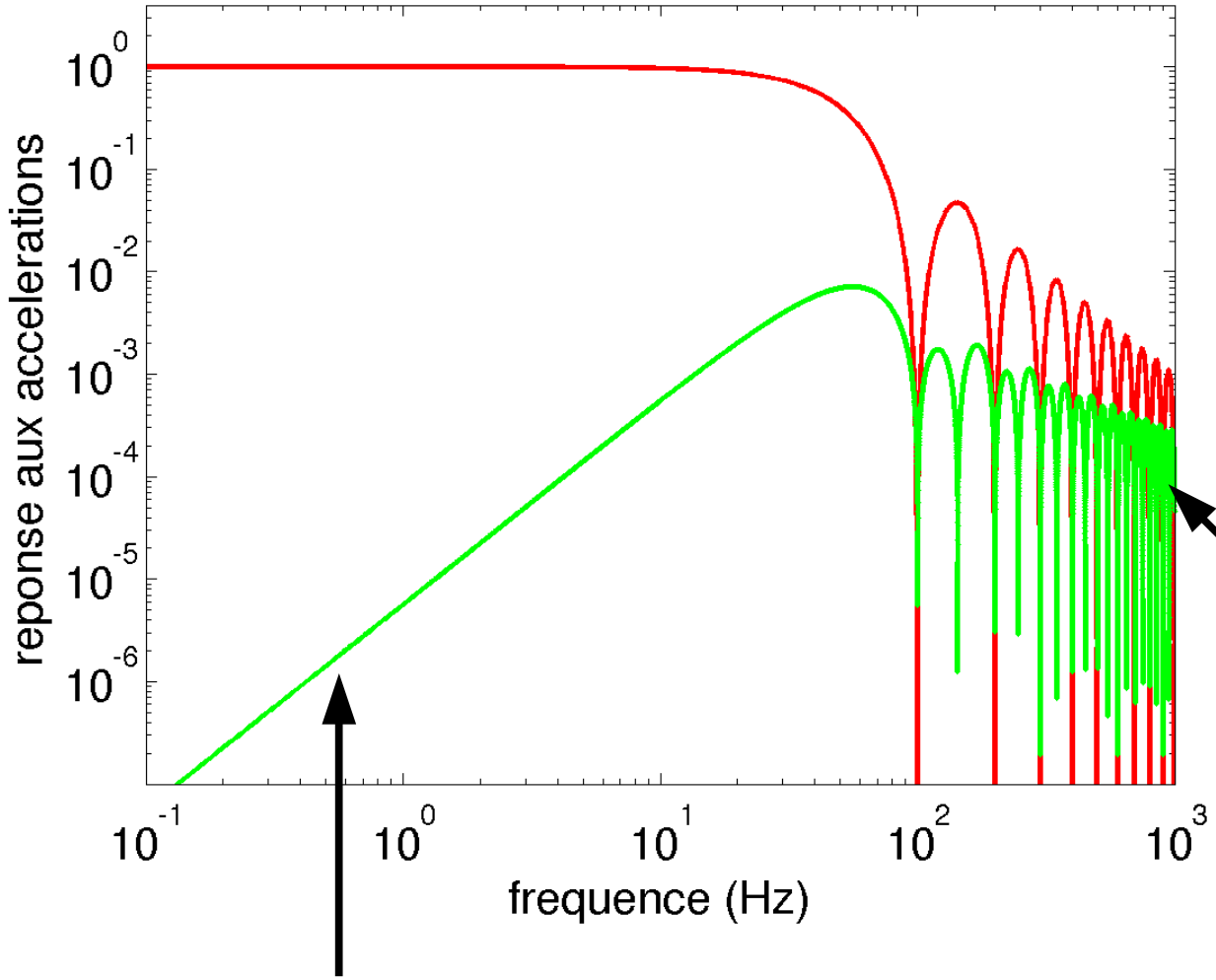




Vibrations de l'avion

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Réjection des vibrations



interféromètre simple (Rb)

double interféromètre (K/Rb)

vibrations rapides non rejetées

($f > 1/\delta T$)

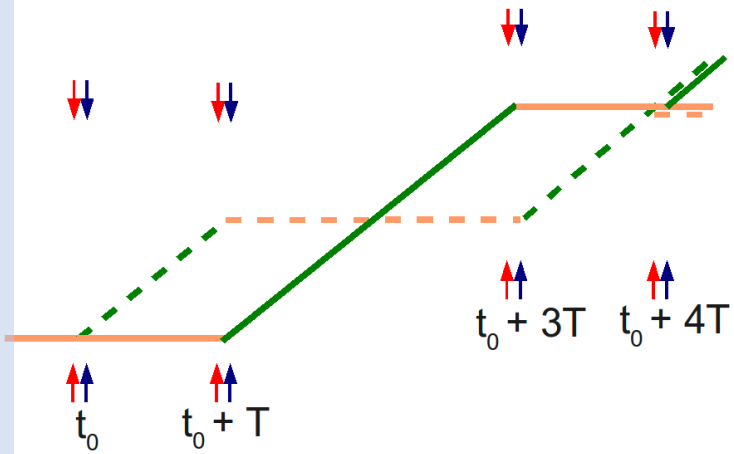
vibrations lentes communes

aux deux interféromètres ($f < 1/\delta T$)

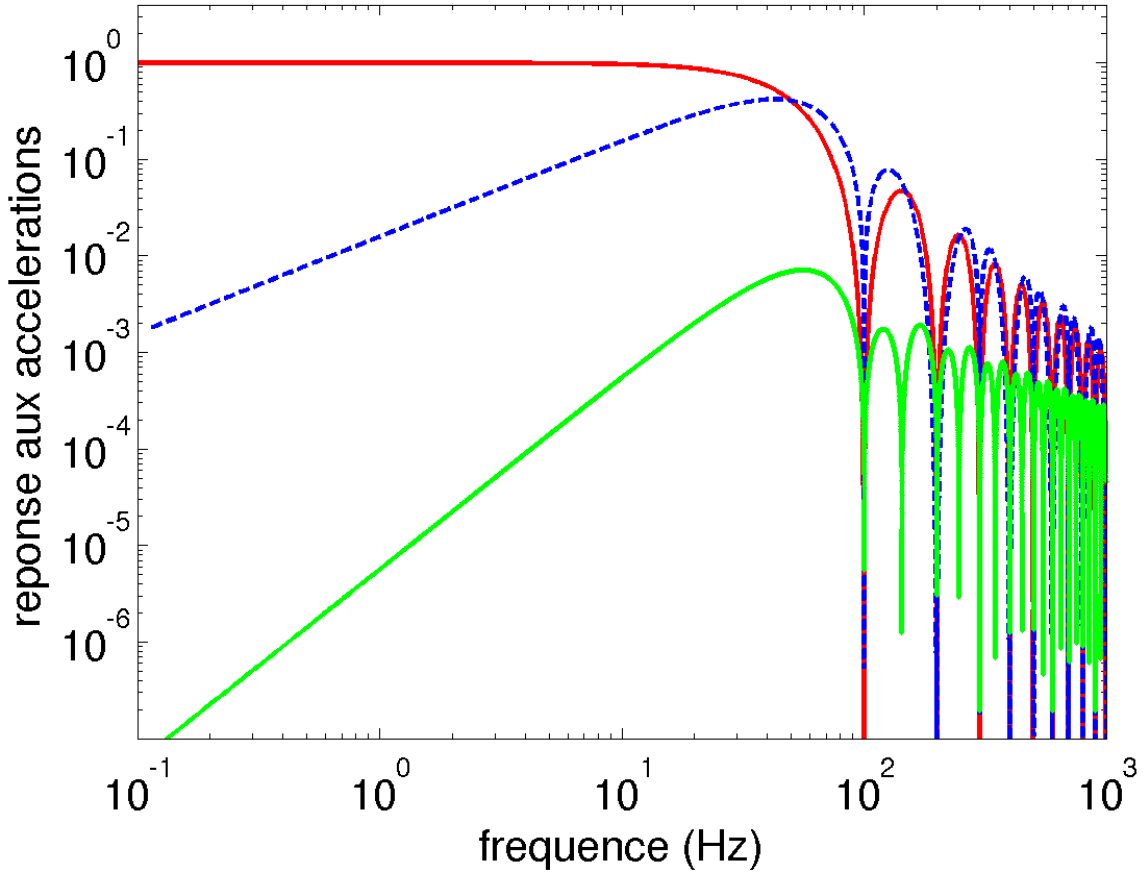
tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Illustration d'une réjection des vibrations en 0-g

interféromètre à 4 impulsions:



McGuirk et al., 2002

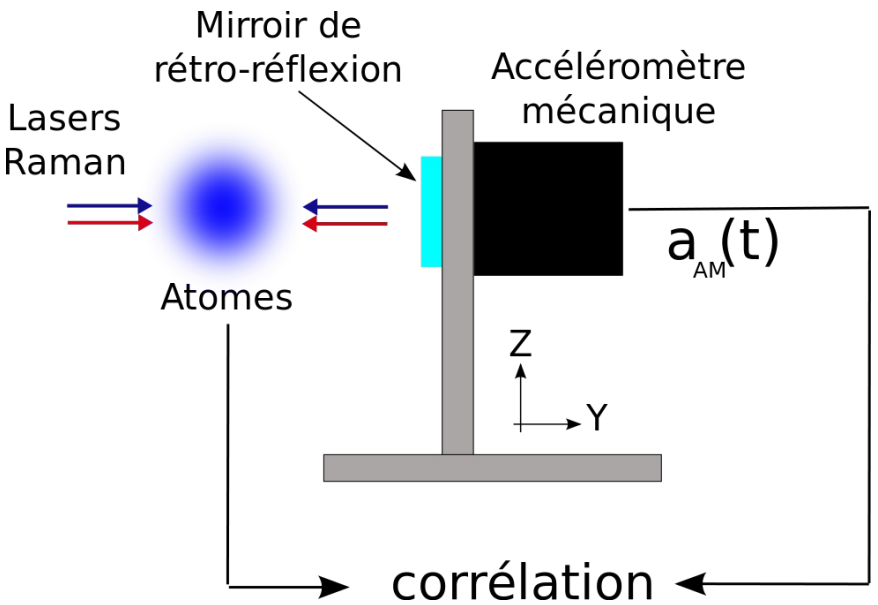


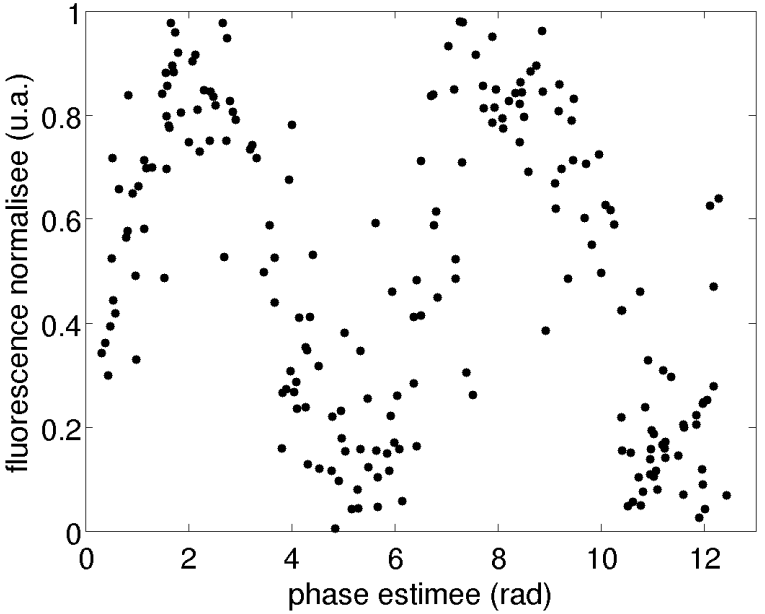
Succession de deux interféromètres élémentaires

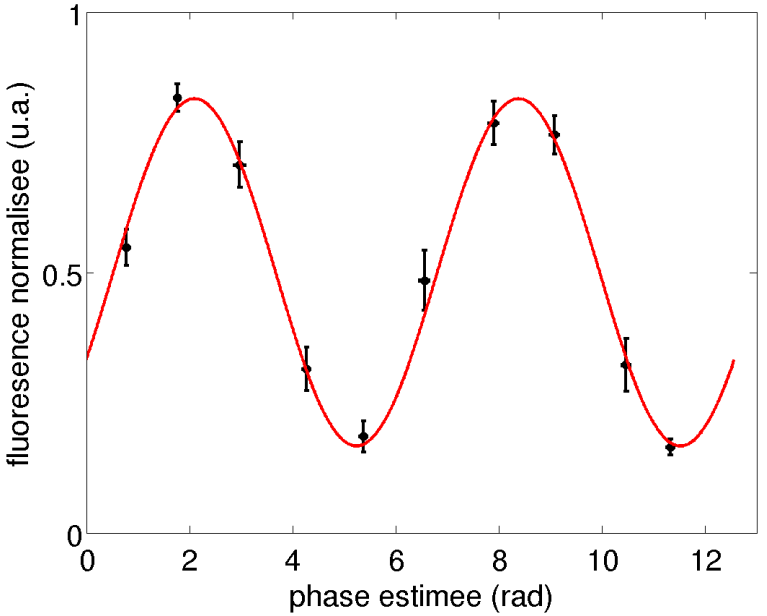
→ réjection des vibrations aux fréquences f < 1/2T

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Utilisation de la méthode de corrélation





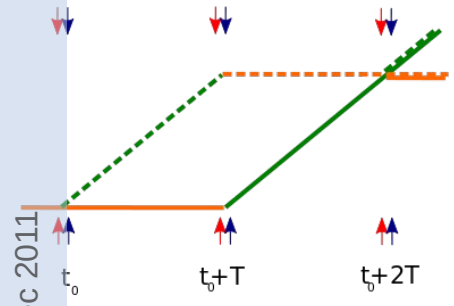


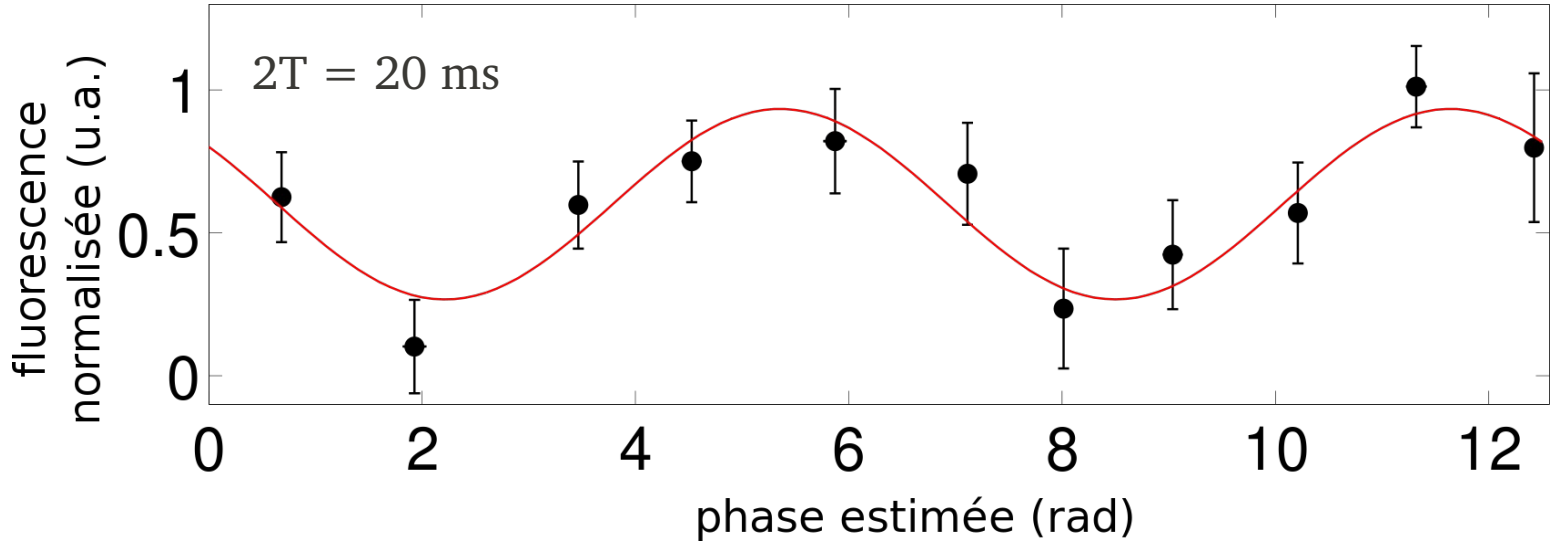
vibrations non mesurées par les AMs

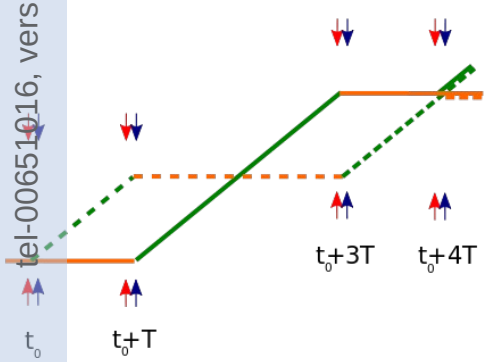
→ bruit sur la fonction de corrélation

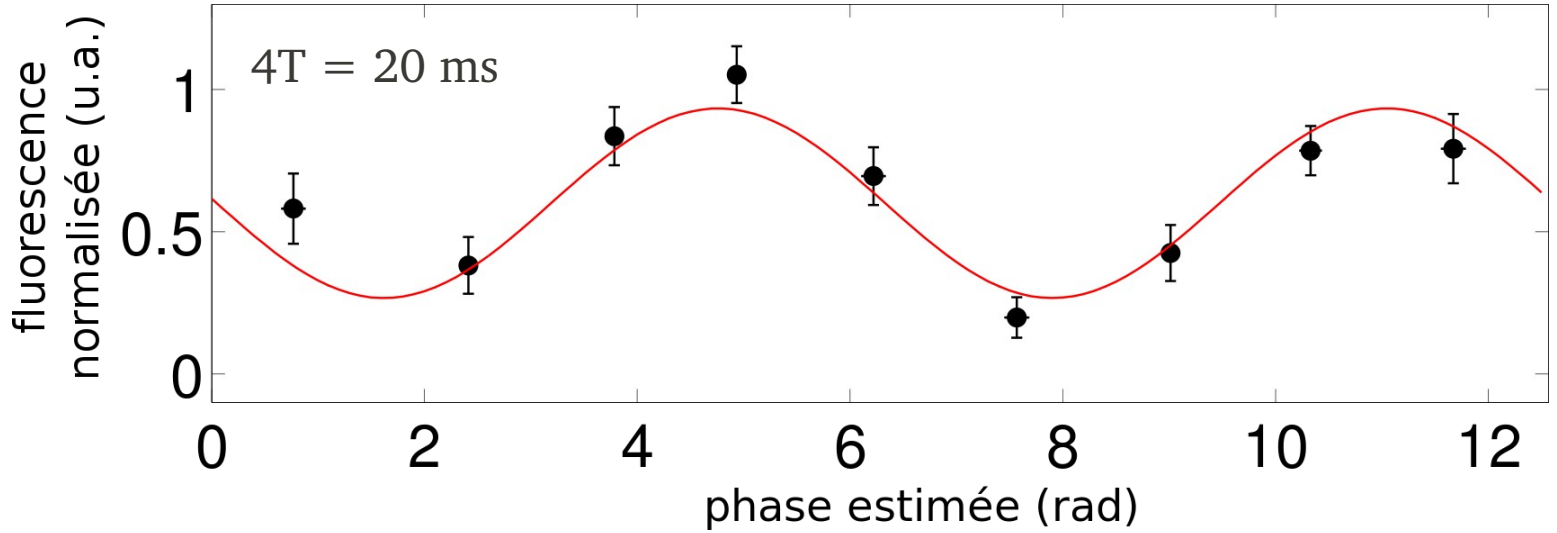
tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Comparaison des deux interféromètres en 0-g





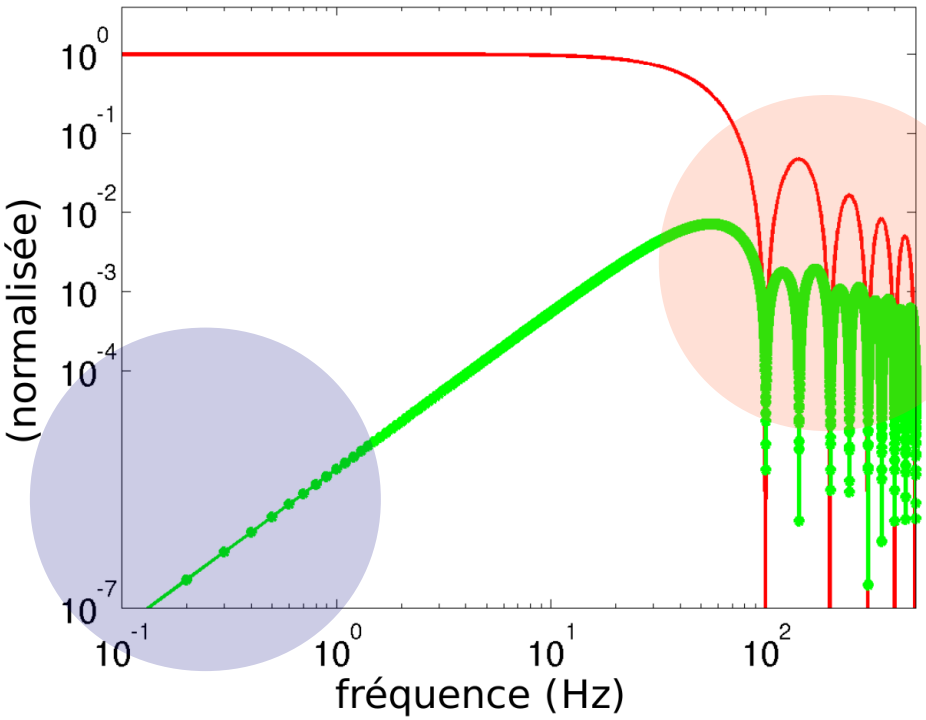


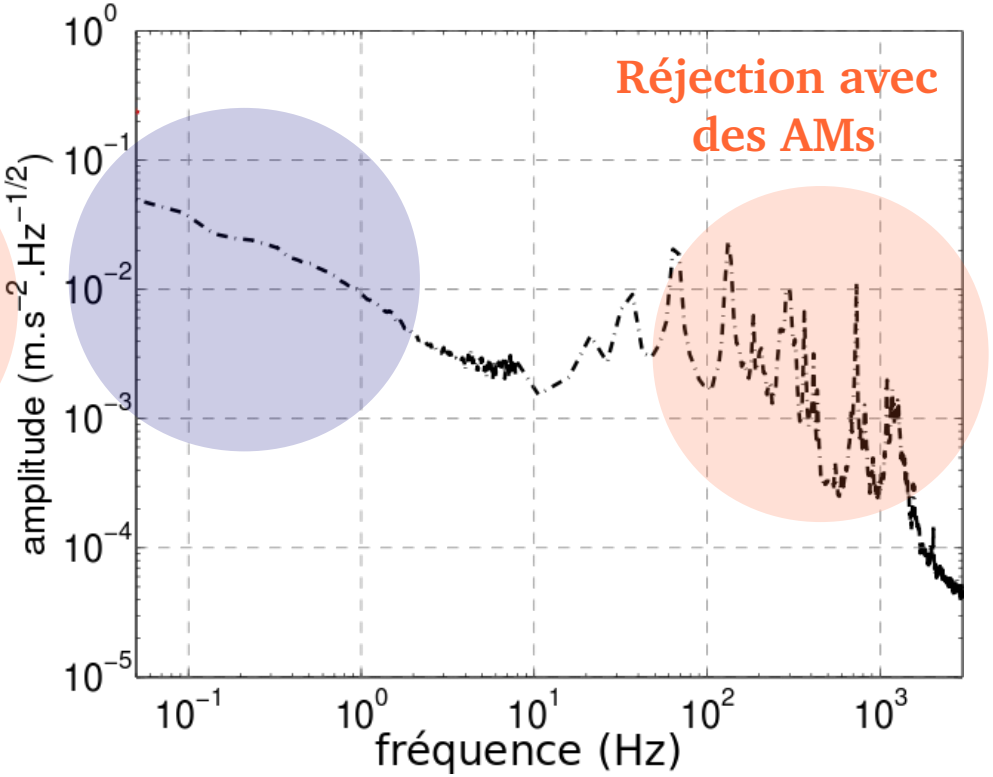


→ Réjection du bruit résiduel dû aux imperfections des AMs à basses fréquences

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Extrapolation au cas du double interféromètre





Réjection par la mesure différentielle K/Rb → calcul: efficacité de réjection de **300** attendue pour 2T = 2 s

Objectif pour le test dans l'avion: $\eta \sim 10^{-11}$

- atténuation à basses fréquences $\sim 10^{-4}$ m.s$^{-2}\sqrt{\text{Hz}}$
- AMs présentant une dynamique $\sim$ 1000

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Résumé des résultats

1. **Premier accéléromètre atomique en 0-g**

- sensibilité ~ 2 x 10^{-4} m.s^{-2}/√Hz (2T = 20 ms)

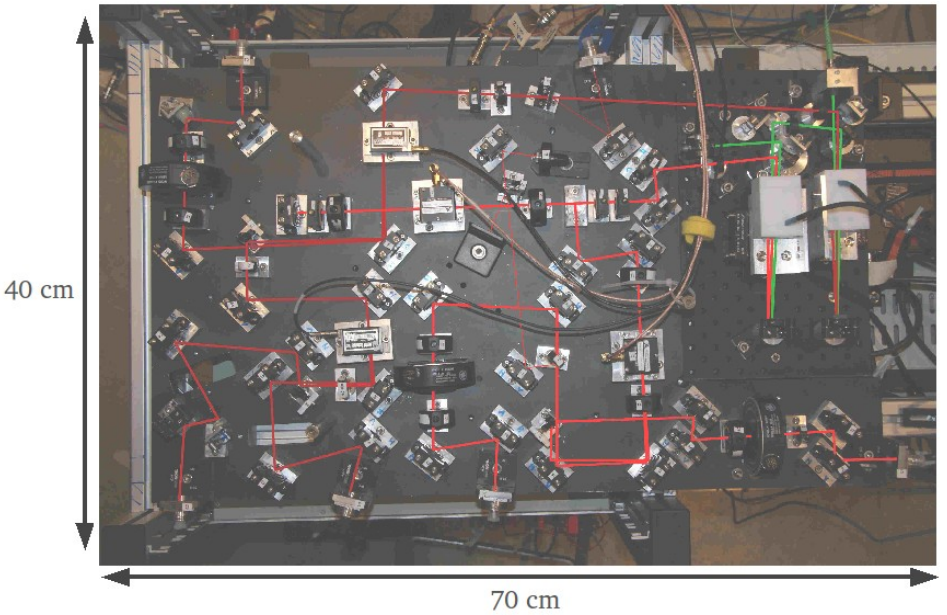
2. **Réjection des vibrations**

- simplification importante d'une mission spatiale

3. **Validation du système laser ^{39}K – ^{87}Rb**

- maturation de la technologie télécom-doublé

(Ménoret *et al.*, Optics Letters, 15/10/2011)



tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Feuille de route pour notre expérience

- refroidissement évaporatif dans un piège optique (Clément *et al.*, 2009)

  → température < 100 nK

- accéléromètre à atomes de ^{39}K

- test du principe d'équivalence faible dans l'avion 0-g au niveau $\eta \sim 10^{-11}$

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

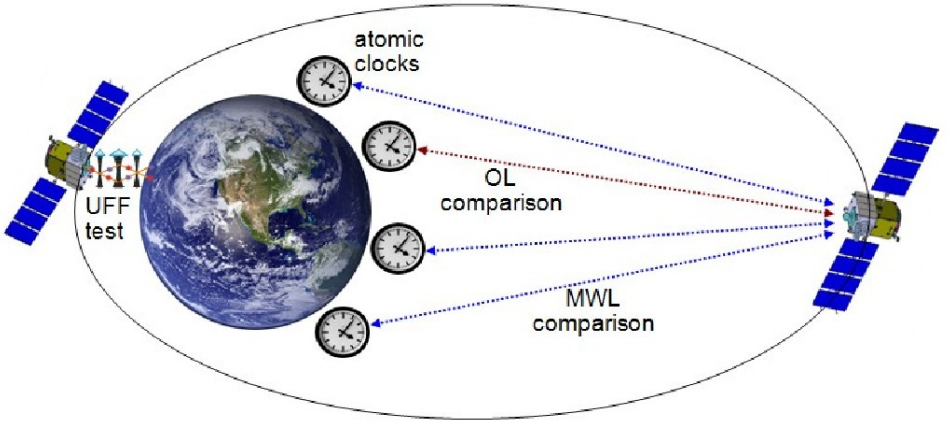
Perspectives

Premier fonctionnement aéroporté d'un senseur inertiel à ondes de matière

Test du Principe d'Equivalence dans l'Espace (ESA/STE-QUEST, 2025)

Nos résultats →

Groupe d'E. Rasel →



Gravimétrie aéroportée

→ objectif: 10^{-9} g (aujourd'hui: ~ 10^{-6} g)

Navigation inertielle

→ objectif: dérive < 5 m/h (aujourd'hui: ~ 100 m/h)

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Merci !

Philippe Bouyer

Arnaud Landragin (SYRTE)

Nassim Zahzam (ONERA)

Baptiste Battelier

Guillaume Stern

Vincent Ménoret

Patrick Cheinet

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

Merci !

Alain Aspect

Gaël Varoquaux
Thomas Hingant
Guillaume Salomon
Pierre-Alain Gominet

Mécanique:
André Guilbaud

Électronique:
Frédéric Moron
André Villing

Missions:
Isabelle Soury
Aziz Aboulahyane

Enseignement:
François Marquier
Jean-Jacques Greffet
Xavier Quélin (Supélec)

Systèmes de Référence Temps Espace

Franck Pereira Dos Santos
Michel Lours

Alexandre Bresson
Renée Charrière
Yannick Bidel

Patrice Rosier

CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

Thomas Lévèque
Linda Mondin

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011

tel-00651016, version 1 - 12 Dec 2011