

Accéléromètre à atomes froids aéroporté pour un test du principe d'équivalence

Vincent Ménoret

Laboratoire Charles Fabry

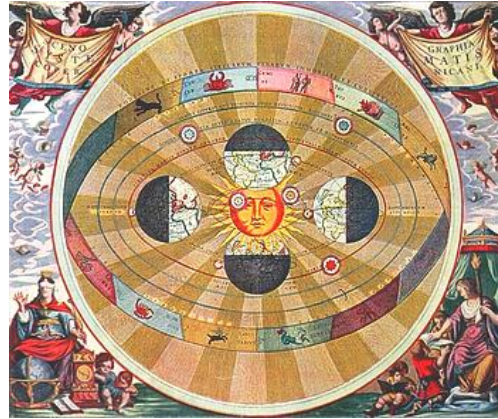
Laboratoire Photonique Numérique et Nanosciences

Directeurs de thèse : C. Westbrook

P. Bouyer

Financement : Direction Générale de l'Armement

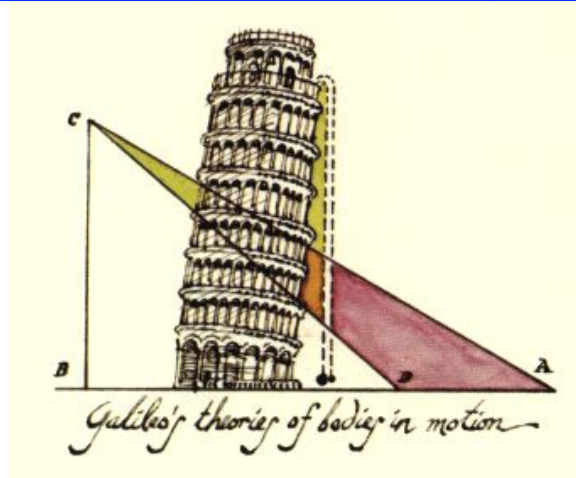
Orbites et chute libre



Trajectoires = ellipses

Système héliocentrique, description des orbites
Copernic, Galilée, Kepler ...

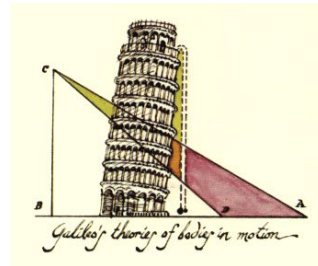
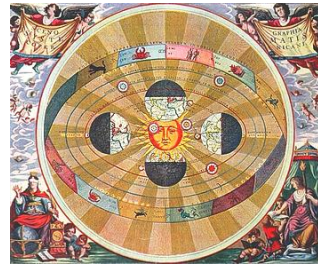
Deux phénomènes physiques différents ?



Trajectoires = paraboles

Trajectoire d'un corps en chute libre
Galilée

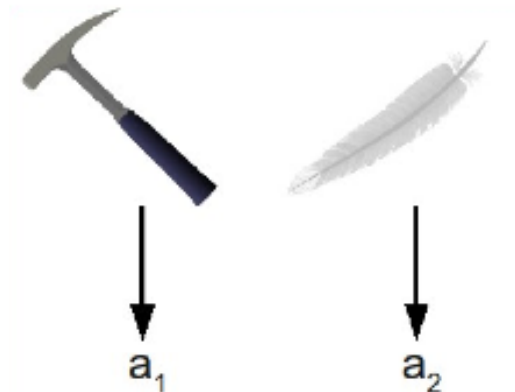
Newton (*Principia*, 1726)



Même phénomène physique :
la gravitation universelle

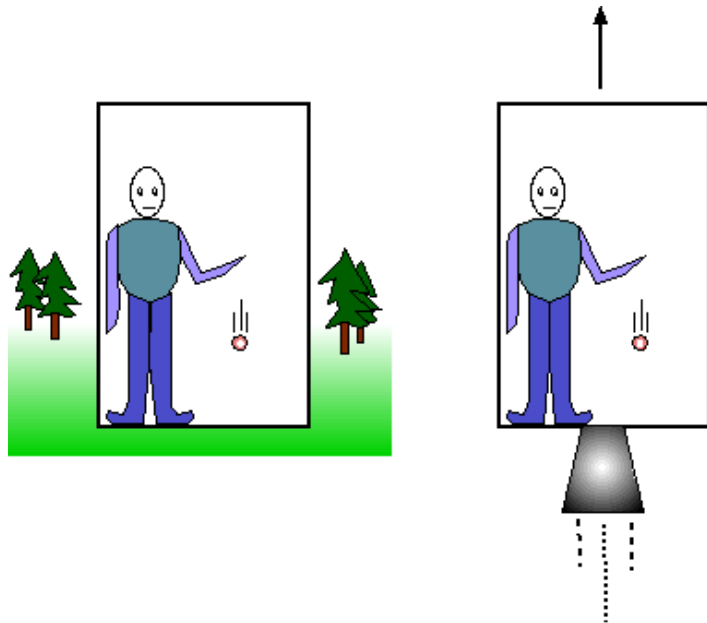
Observation expérimentale : sur Terre, la chute libre des corps ne dépend pas de leur masse

« Universalité de la chute libre »
OU
« Principe d'équivalence (faible) »



Théorie de la Relativité Générale (Einstein, 1907)

Equivalence entre un champ gravitationnel et une accélération du référentiel considéré

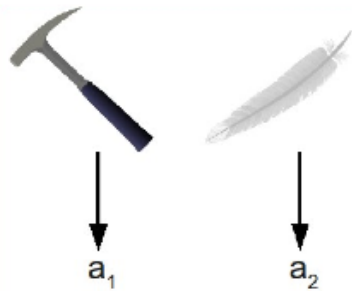


« Principe d'équivalence d'Einstein »

- Universalité de la chute libre (principe d'équivalence faible)
- Invariance de Lorentz locale
- Invariance de position locale

Pierre angulaire de la Relativité Générale et de notre compréhension de la gravitation

- **Postulat** (non démontré)
- **Violations attendues** : Incompatibilité entre la Relativité Générale et la Mécanique Quantique (unification des 4 interactions fondamentales)
→ Nécessité d'effectuer des tests précis

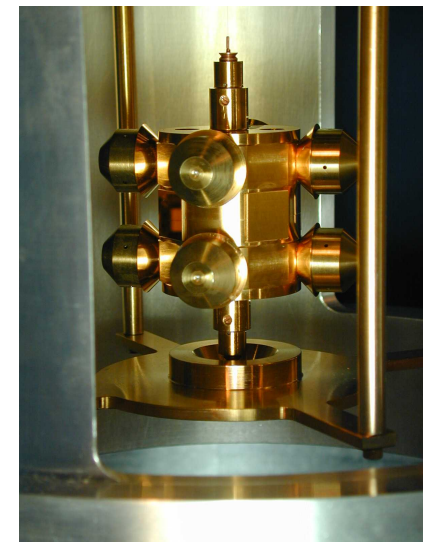


Comparaison des accélérations de 2 corps en chute libre
Paramètre d'Eötvös :

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

Meilleurs tests : $\eta \approx 10^{-13}$

Violations : $\eta \approx 10^{-15}$?





1. Accéléromètre aéroporté
2. Système laser bifréquence
3. Mesures inertielles



1. Accéléromètre aéroporté

- Interférométrie atomique
- Tester le principe d'équivalence avec des atomes froids
- Dispositif expérimental

Une vieille idée... (Davisson et Germer, 1927 : électrons)

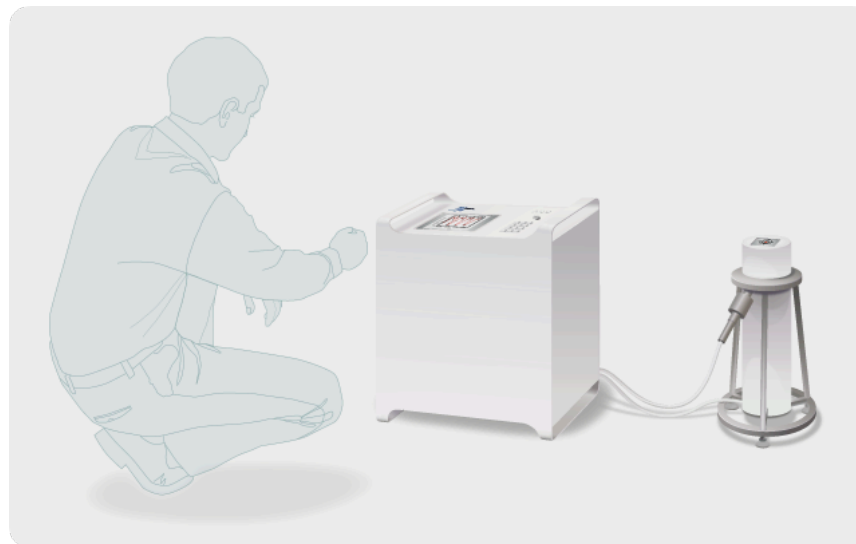
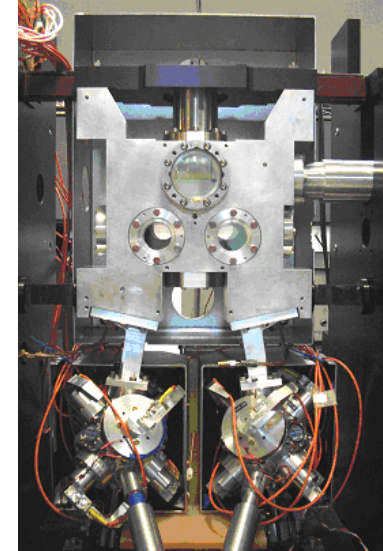
1991 : Gravimètre atomique (Kasevich, Chu)

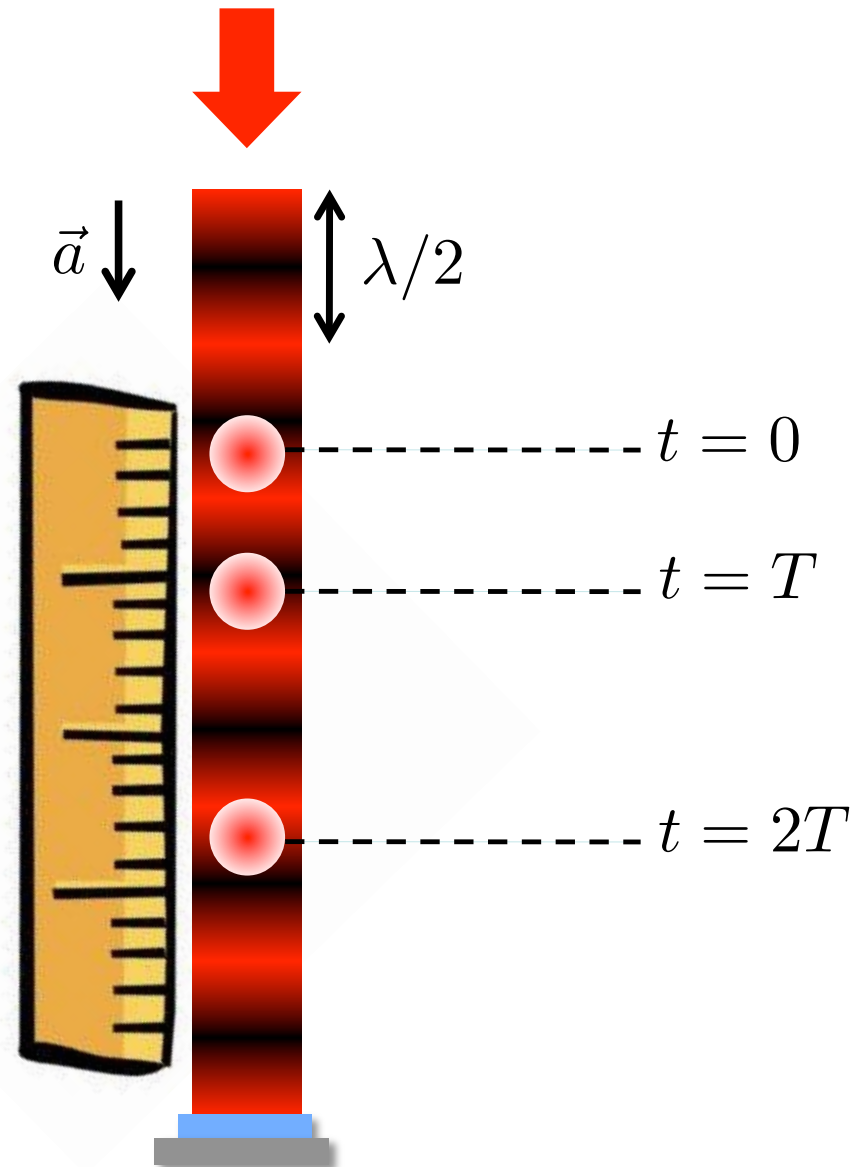
1998 : $\delta g/g \approx 10^{-8}$ (Peters, Chu)

1997-98 : gyromètre, gradiomètre (Bouyer, Kasevich)

2006 : Capteur inertielle 6 axes (Landragin, Bouyer)

Depuis 2006 : de l'expérience de laboratoire au prototype de terrain





Laser rétro-réfléchi = 'règle de phase'

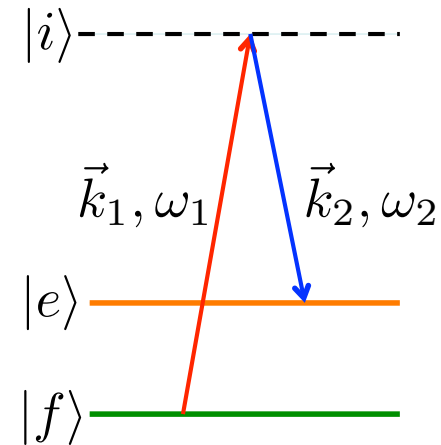
Graduation = $\lambda/2$

Nombre de graduations $\sim \frac{aT^2}{\lambda}$

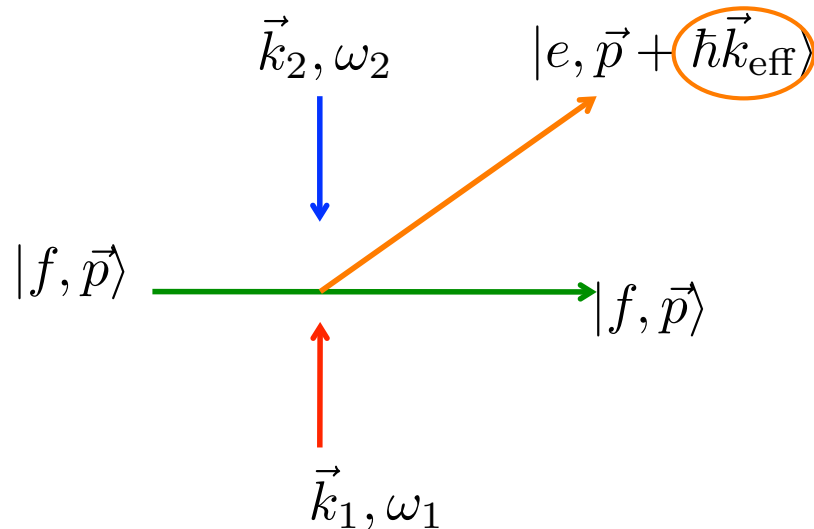
Transitions Raman stimulées

Atome à 3 niveaux en interaction avec 2 lasers

Vecteur d'onde effectif : $\vec{k}_{\text{eff}} = \vec{k}_1 - \vec{k}_2$



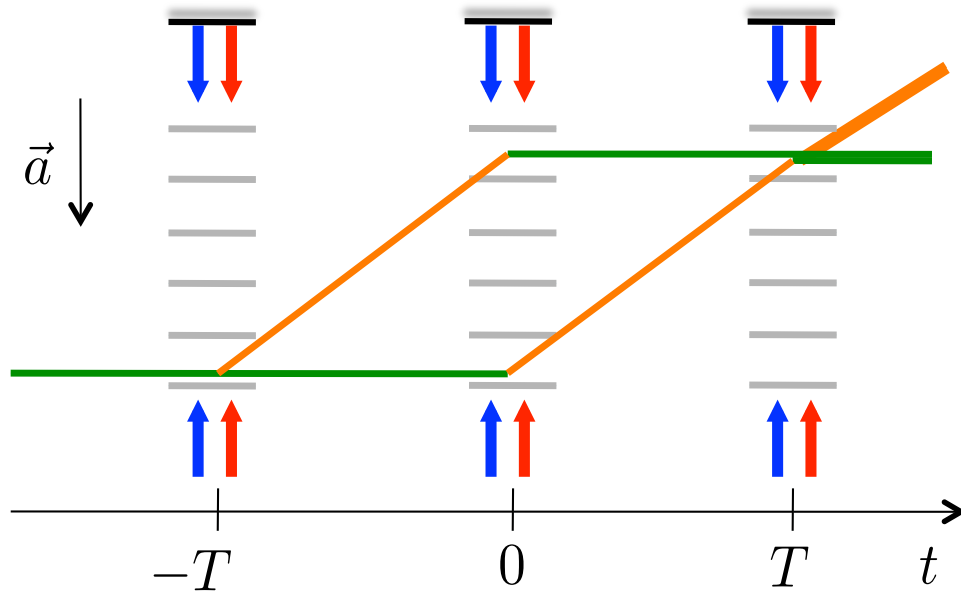
Transfert d'impulsion ($\sim 1 \text{ cm/s}$)



La phase laser est 'copiée' sur l'onde atomique

$$\varphi = \vec{k}_{\text{eff}} \cdot \vec{r}$$





Déphasage dans l'interféromètre :

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

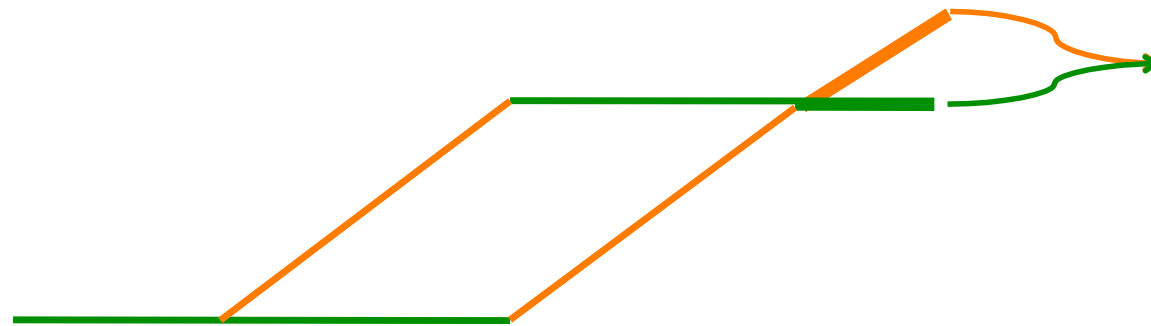
$$\Phi^{bas} = \varphi(0)$$

$$\Delta\Phi = \Phi^{haut} - \Phi^{bas}$$

Cas d'une accélération constante :
$$\Delta\Phi = \vec{k}_{\text{eff}} a T^2$$

$$= 4\pi \frac{a T^2}{\lambda}$$

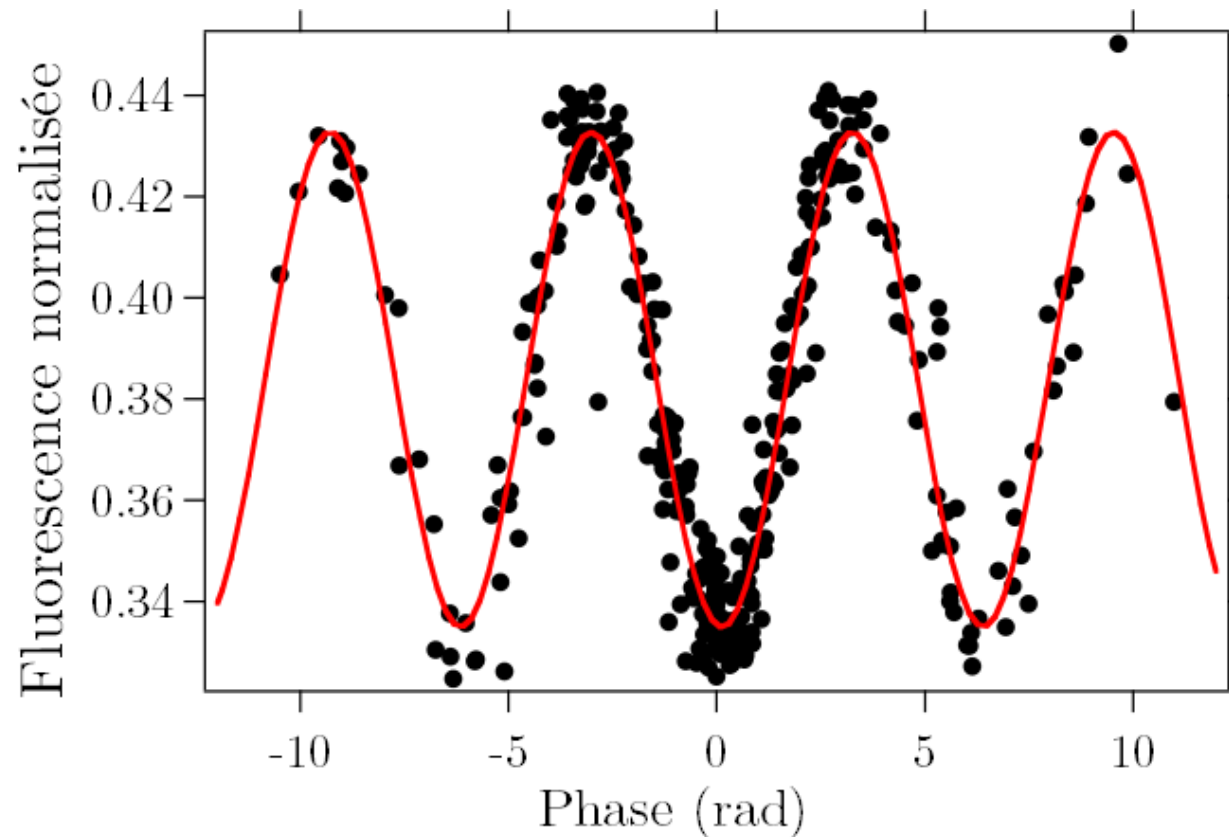
Mesure du déphasage



Fluorescence normalisée
→ Probabilité de transition

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

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



$$\text{Sensibilité} \sim \frac{aT^2}{\lambda}$$

Augmenter la sensibilité aux accélérations



Augmenter T



Augmenter la hauteur de chute

Augmenter la sensibilité



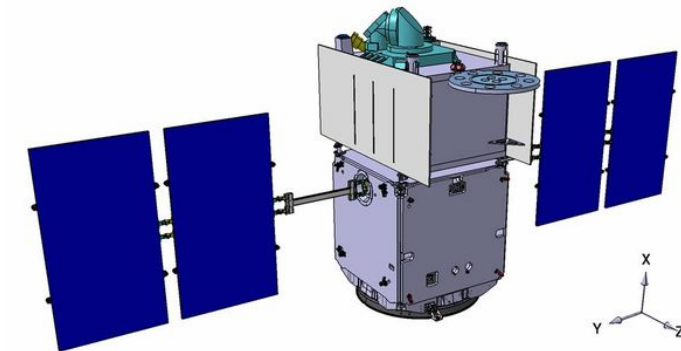
USA, Chine



France



Allemagne

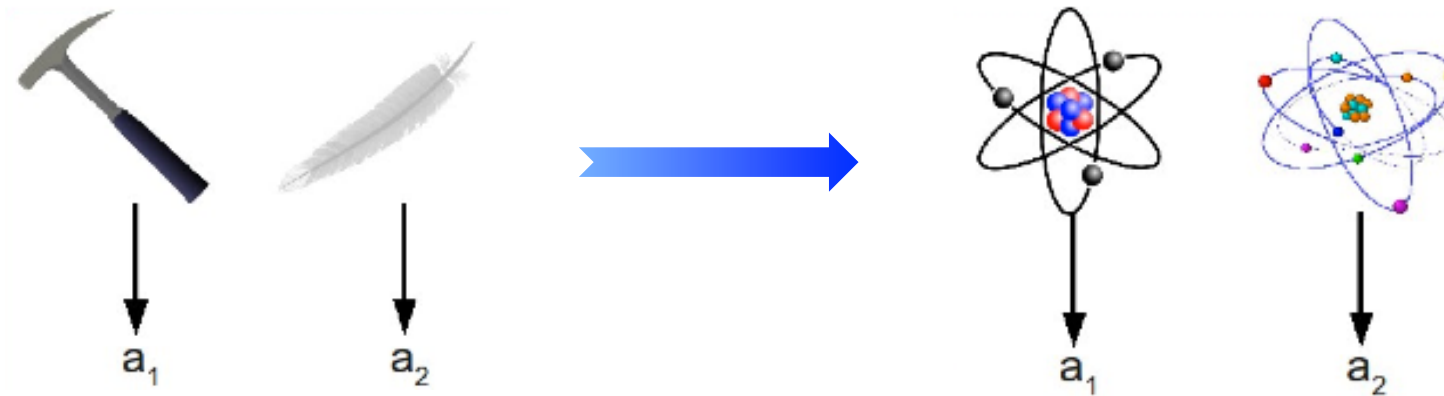


Europe

V. Ménot - Accéléromètre à atomes froids aéroporté

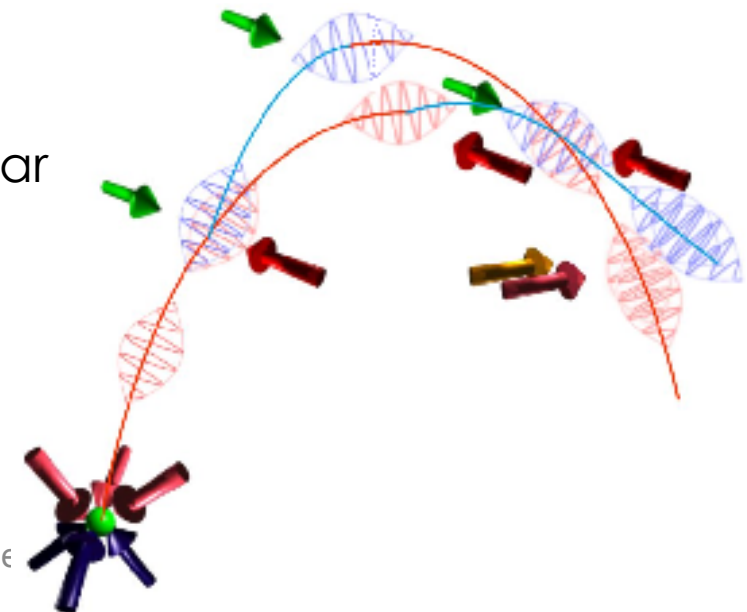
Un test du P.E. avec des atomes ?

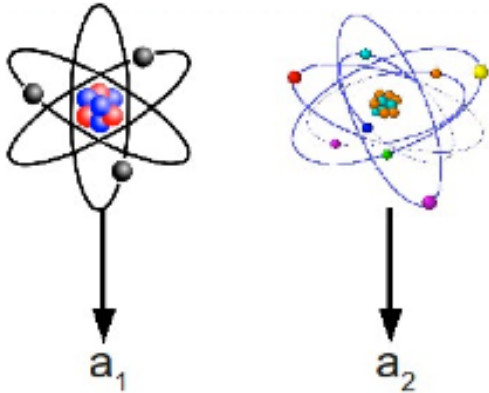
- Objets quantiques, microscopiques
- Nouveaux paramètres : spin, boson / fermion, gaz dégénérés ...



Physique atomique :

- Mesures d'accélération de haute précision par interférométrie atomique
- Bon contrôle des paramètres expérimentaux
- Lecture directe de l'accélération
- ...





Principaux paramètres :

- Différence de masse et de composition
- Longueur d'onde (système laser)
- Sensibilité de l'interféromètre différentiel aux vibrations
- ...

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

$^{85}\text{Rb} / ^{87}\text{Rb}$: M. Kasevich, STE-QUEST ...

K / Rb : Quantus, ICE ...

K : 767 nm
Rb : 780 nm

Un environnement particulier

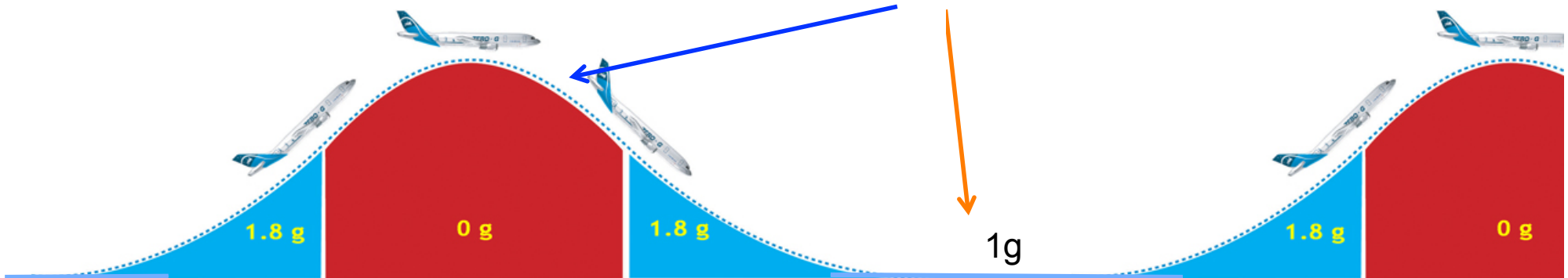
L'Airbus A300 Zéro G de Novespace



Vols paraboliques

1 campagne = 93 paraboles
= 30 minutes de microgravité

Mesures





Microgravité ('0g')

$T \sim 1s$

Sensibilité $\sim 10^{-9} \text{ m.s}^{-2}$

Test du principe d'équivalence

Vol en palier ('1g')

$T \sim 5 \text{ ms}$

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

Application à la navigation inertielle

Transportabilité

Laboratoire → avion

Environnement thermique

5°C → 30°C

Temps de stabilisation

<3h

Vibrations

0,5 m.s⁻² en vol + chocs (transport, décollage, atterrissage)

Expérience modulaire

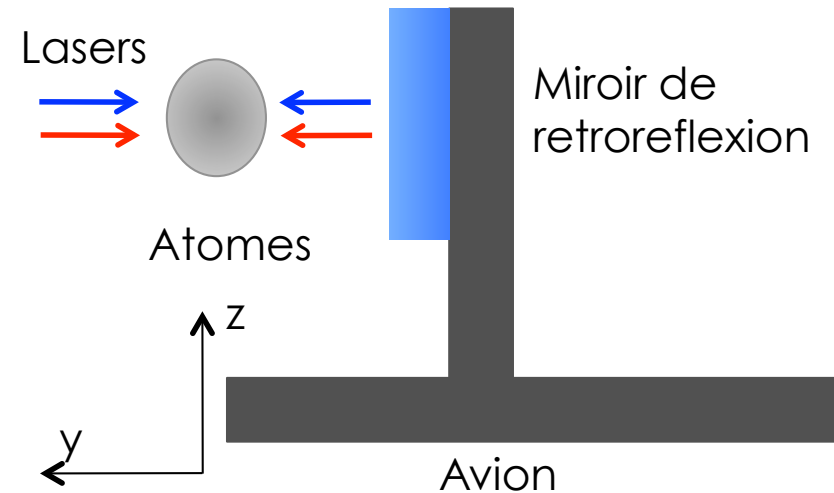
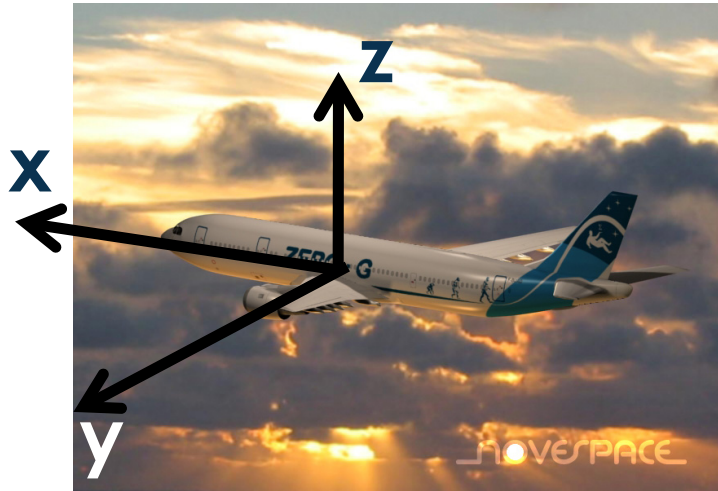
Système de pompage passif

Système laser télécom doublé

fibré, robuste

...





Mesures suivant l'axe Y :

- Moins de vibrations
- Même comportement 1g / 0g (accélération moyenne nulle)
- Faible influence des rotations



2. Système laser bifréquence

- Architecture de la source
- Validation en vol
- Sources atomiques

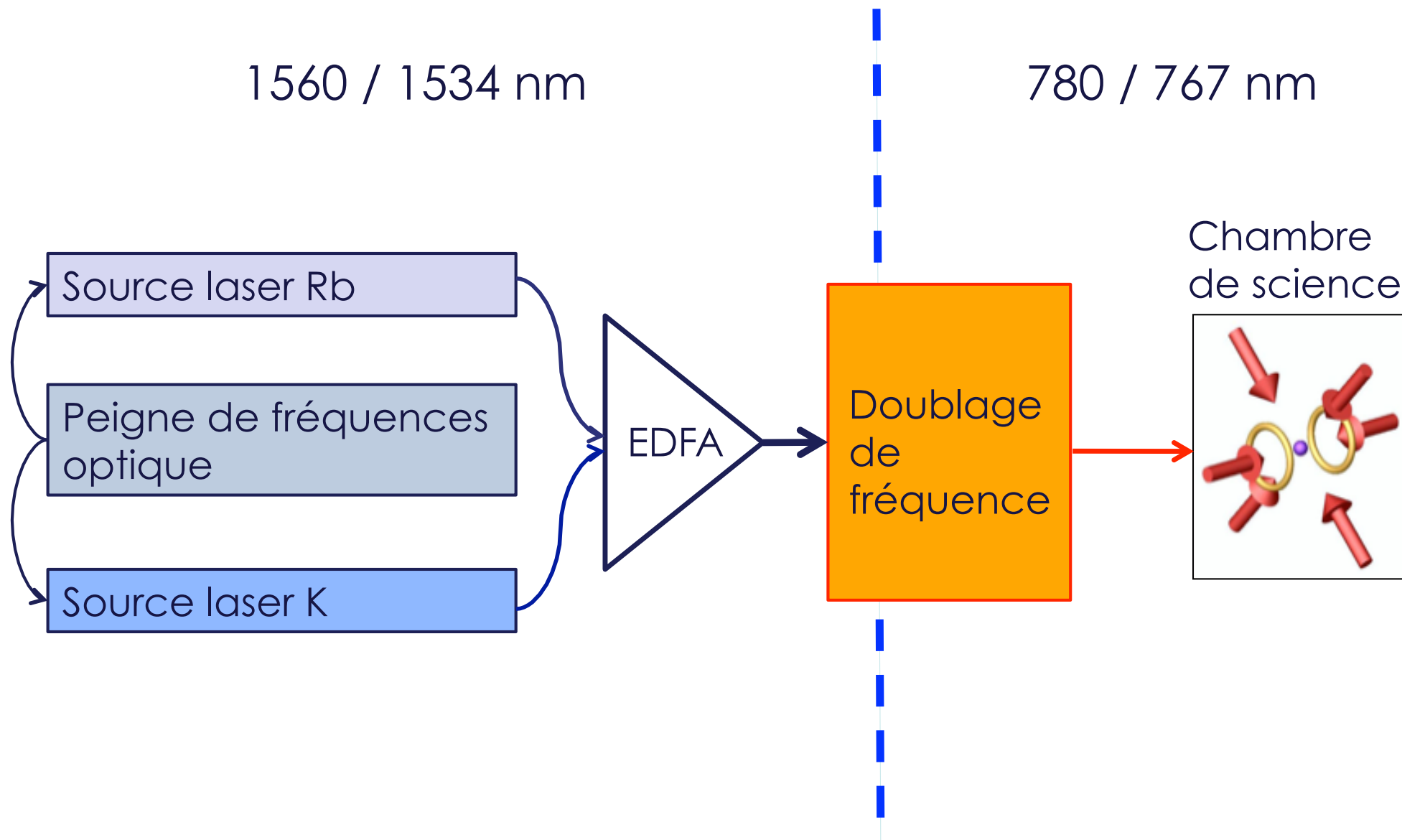
^{87}Rb : 780 nm

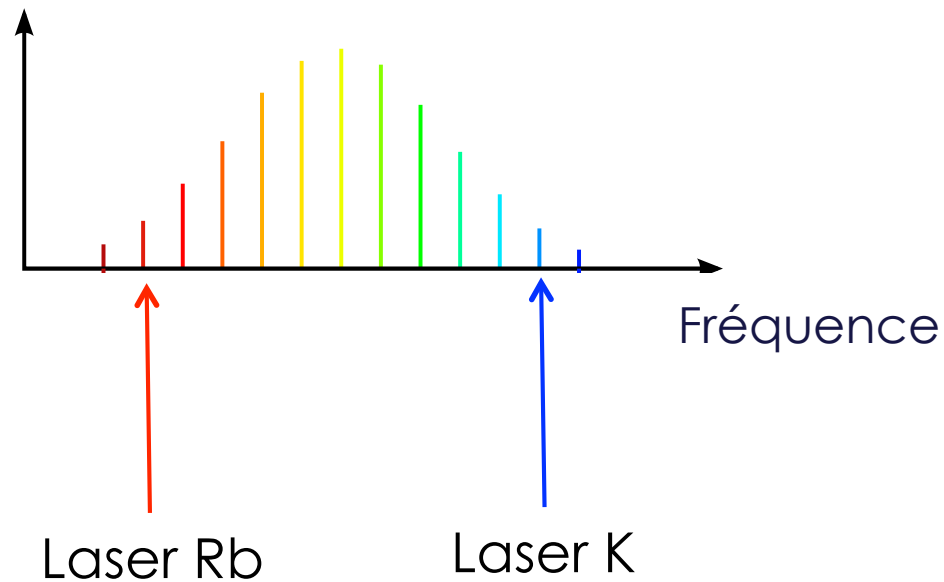
^{39}K : 767 nm

Génération des longueurs d'onde utiles par doublage de fréquence

- Utilisation de composants fibrés télécom à 1560 et 1534 nm
- Doublage de fréquence en espace libre pour atteindre 780 et 767 nm
- Asservissement sur un peigne de fréquences optique

→ Système compact et robuste, compatible avec les vols paraboliques

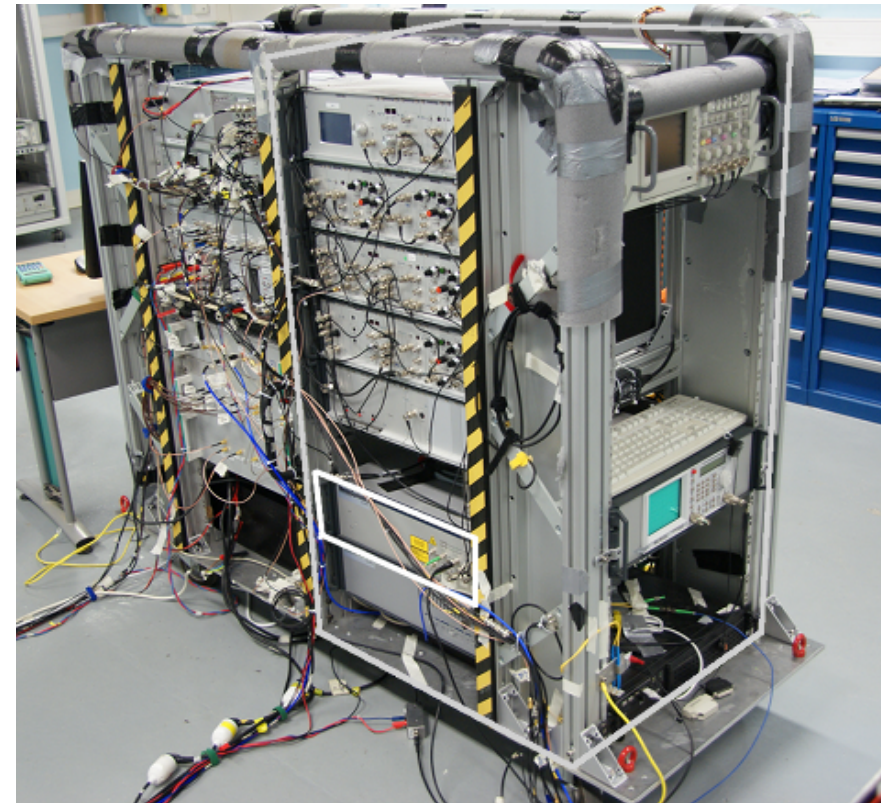




Détermination directe des fréquences optiques :

$$f_p = f_0 + p f_{\text{rep}}$$

Laser fs fibré à 1,5 μm compatible avec le télécom doublé

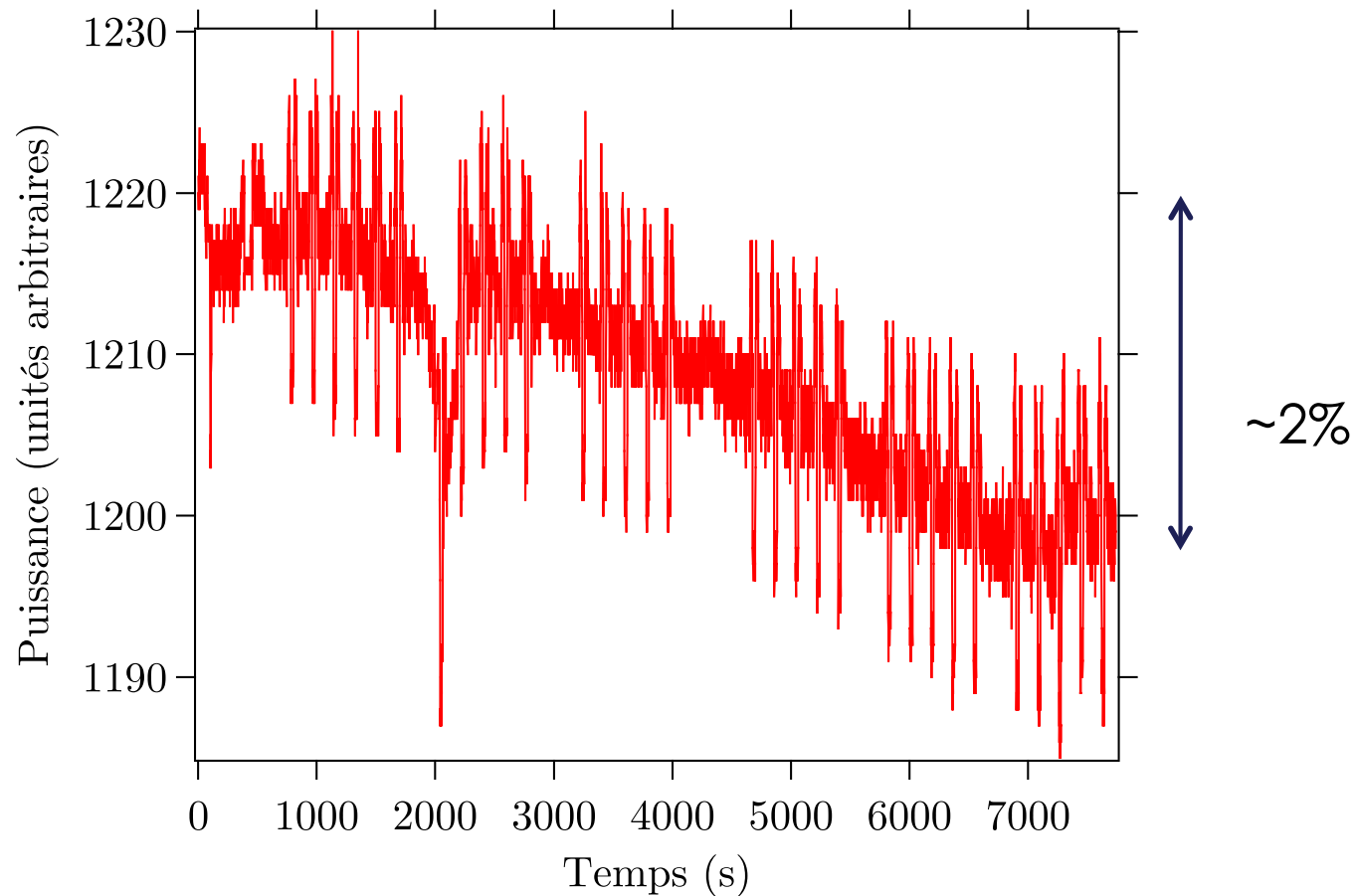


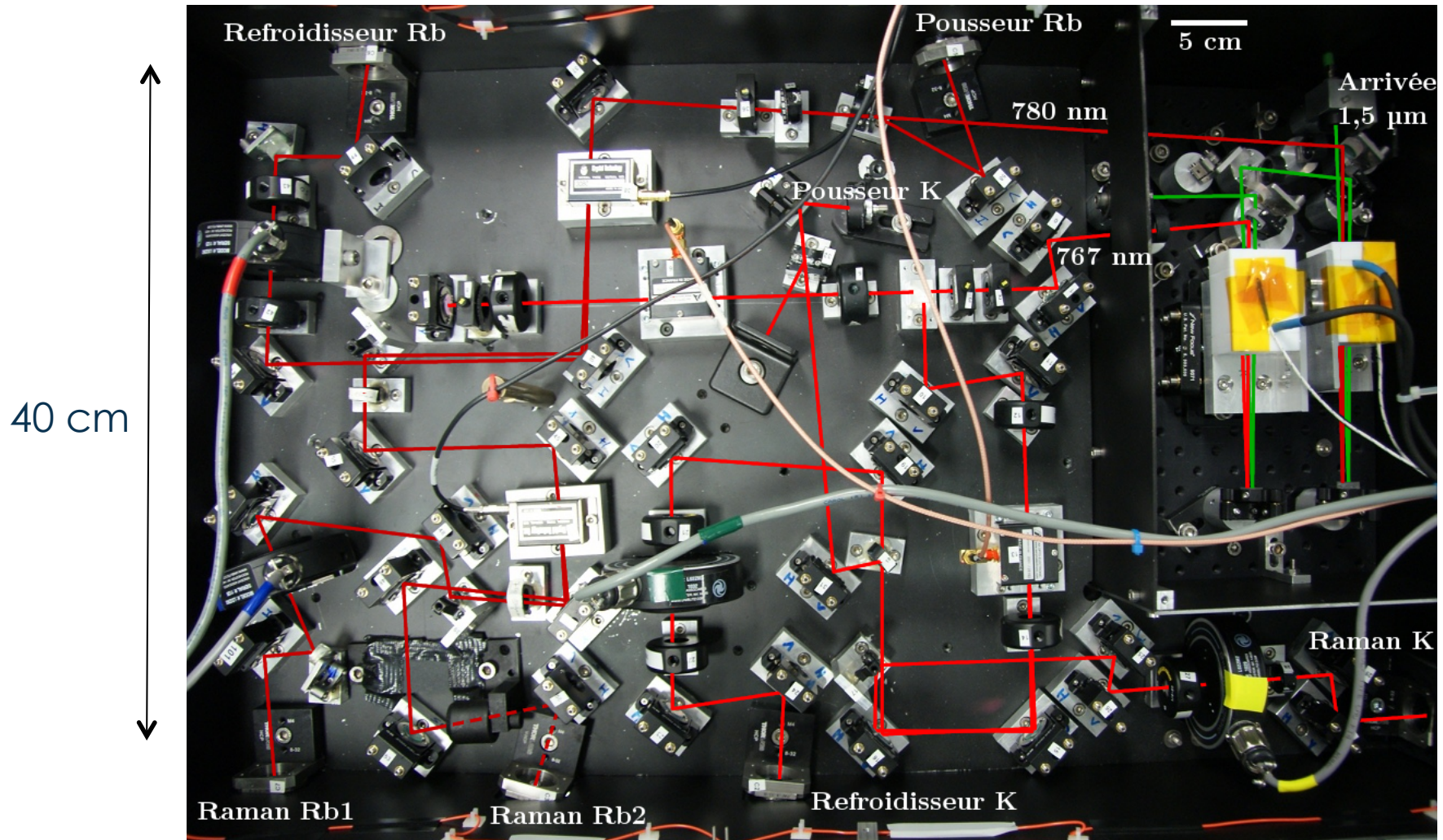
Verrouillage de modes ✓

Asservissement de la fréquence de répétition ✓

Asservissement de la fréquence d'offset ✓

Asservissement des lasers sur le peigne ✓



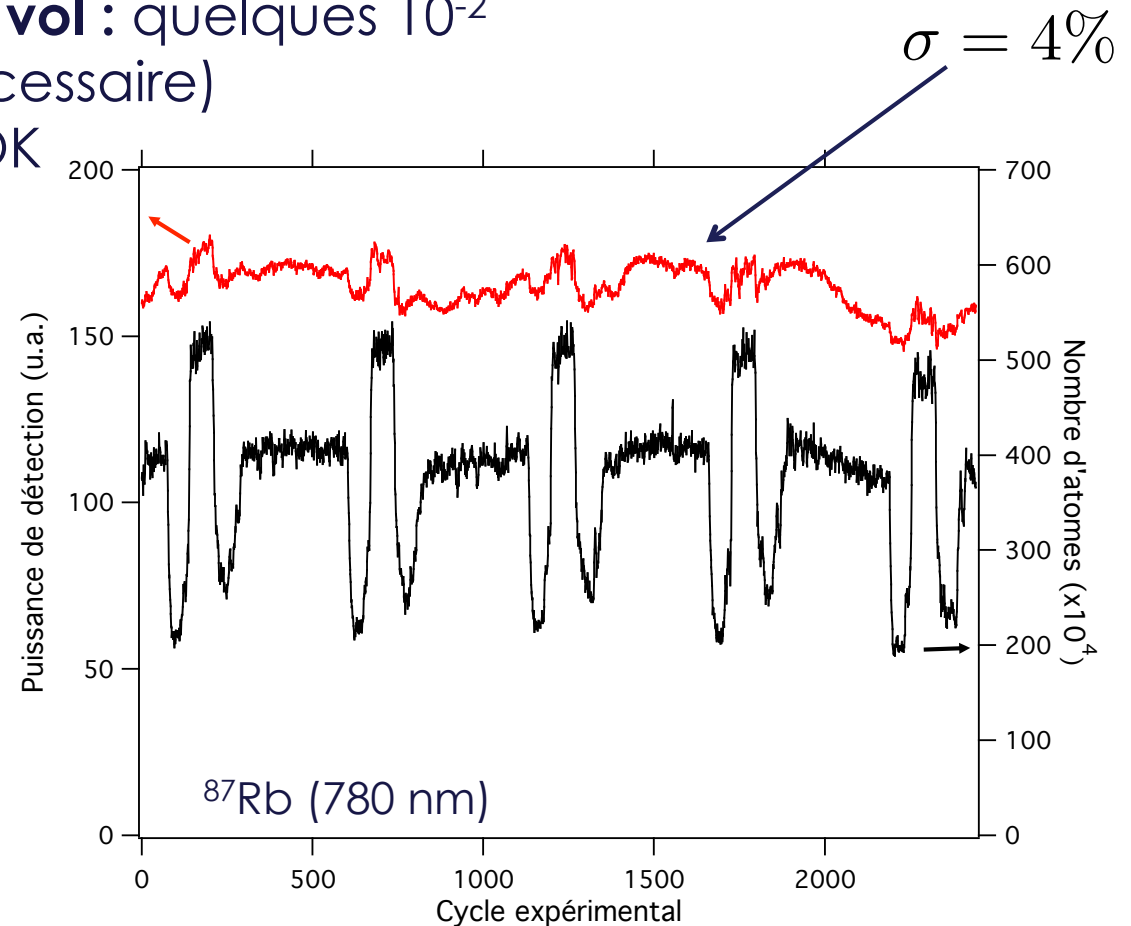


Efficacité de doublage $\sim 3\%.W^{-1}$ (double passage, 5W)
→ ~ 750 mW à 780 et 767 nm

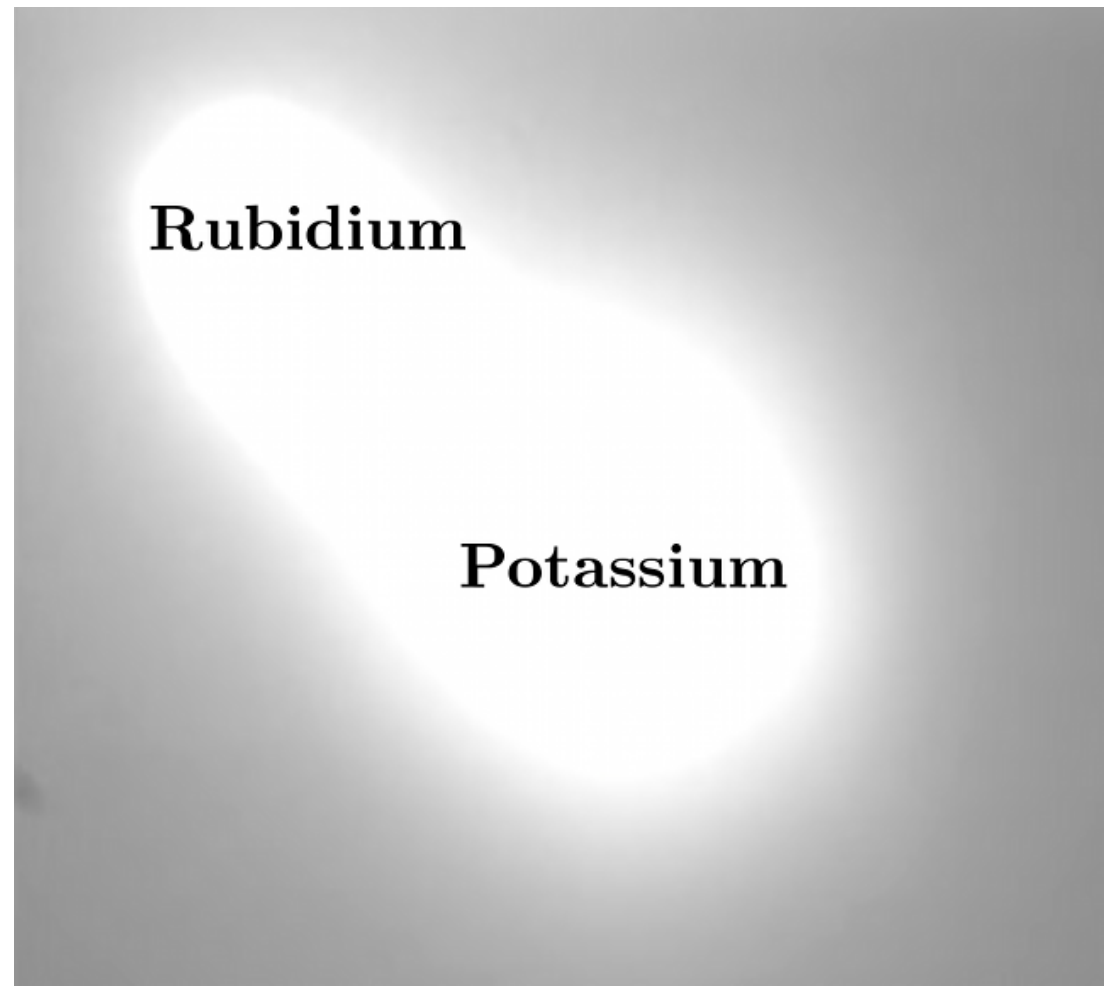
Puissance en sortie de fibre ~ 150 mW (PMO et Raman)

Stabilité de puissance en vol : quelques 10^{-2}
(Pas de réalignement nécessaire)

Stabilité de polarisation OK



Piège magnéto-optique double espèce en vol



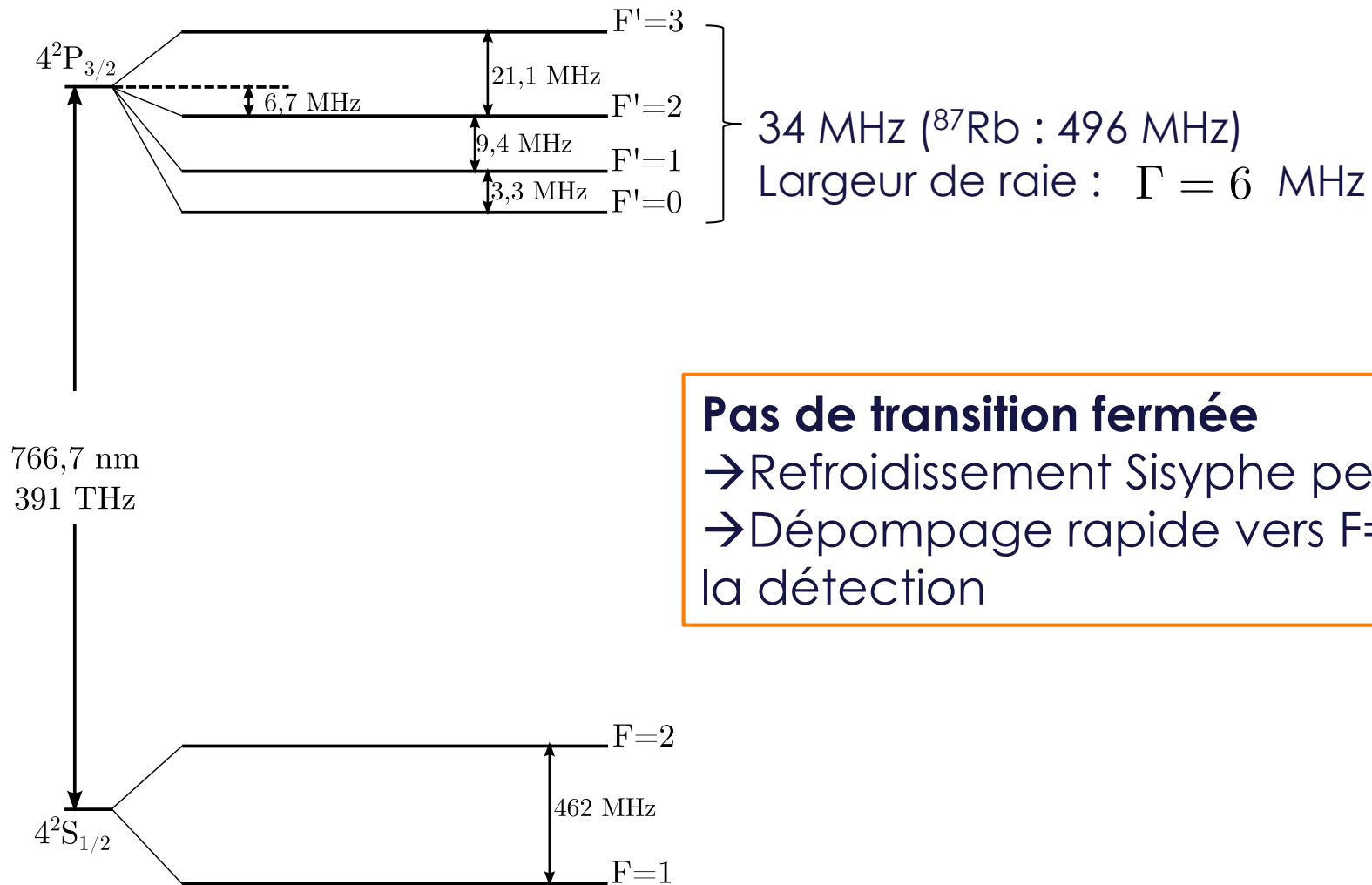
^{87}Rb

Refroidissement en mélasse
Température $\sim 10 \mu\text{K}$
→ Interférométrie atomique

^{39}K

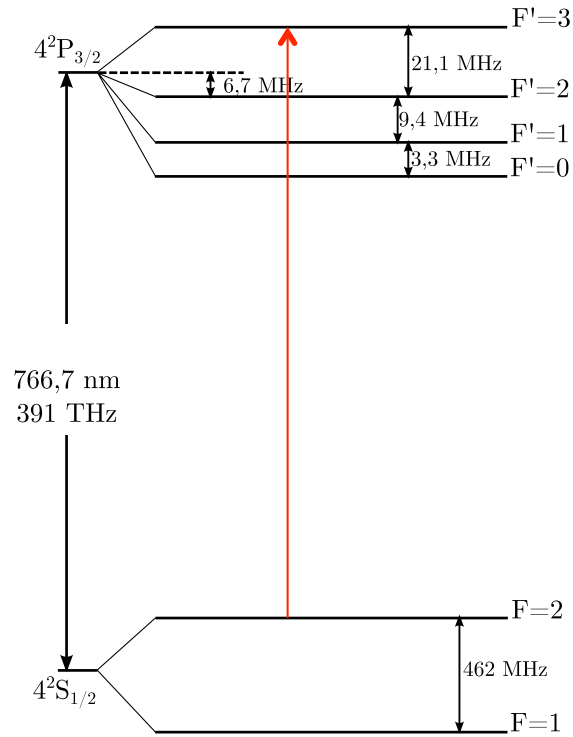
Refroidissement moins efficace ($\sim 150 \mu\text{K}$)
Etat de l'art : 25 à 30 μK
Détection complexe (dépompage)
→ Signaux préliminaires, améliorations en cours

39K : structure atomique

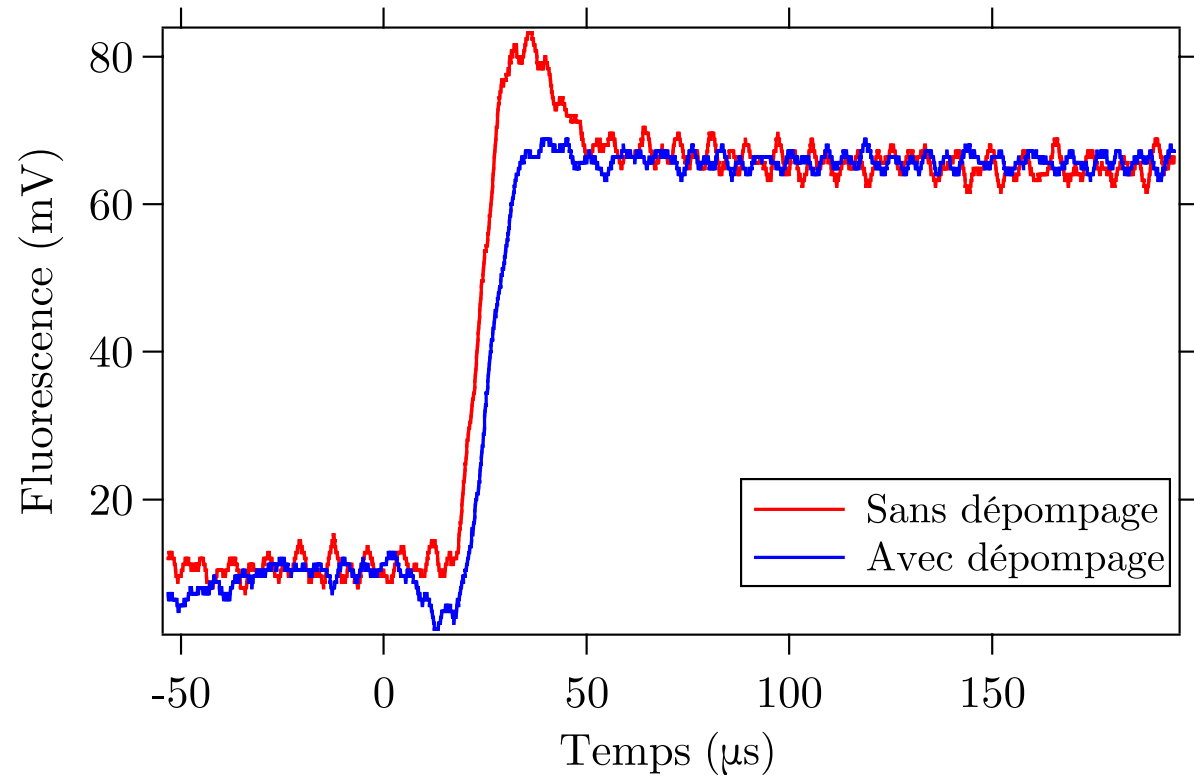


Pas de transition fermée

- Refroidissement Sisyphé peu efficace
- Dépompement rapide vers $F=1$ pendant la détection

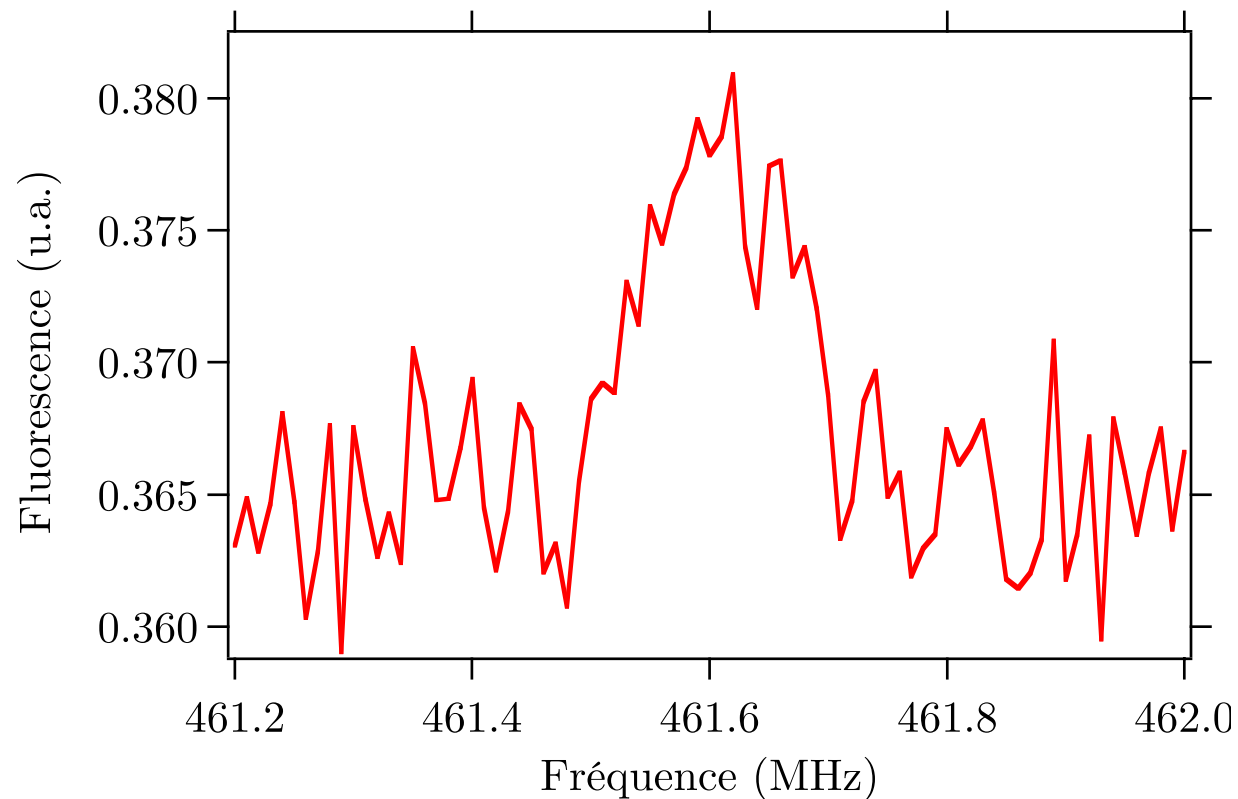


Typiquement :
 ~ 1 photon par atome avant dépompage
 Temps de dépompage < 10 μ s



Lasers copropageants (pas de sélection de vitesse)

Rapport signal à bruit ~ 1



Diodes laser affinées

DFB
Largeur ~ 1 MHz



RIO (cavité étendue)
Largeur ~ 10 kHz

Mesure de température

Imagerie de fluorescence

Système de détection

- Photodiode à avalanche (rapide, efficacité élevée)
- Electronique d'acquisition 62 kHz / 12 bit → 1 MHz / 16 bit



3. Mesures inertielles

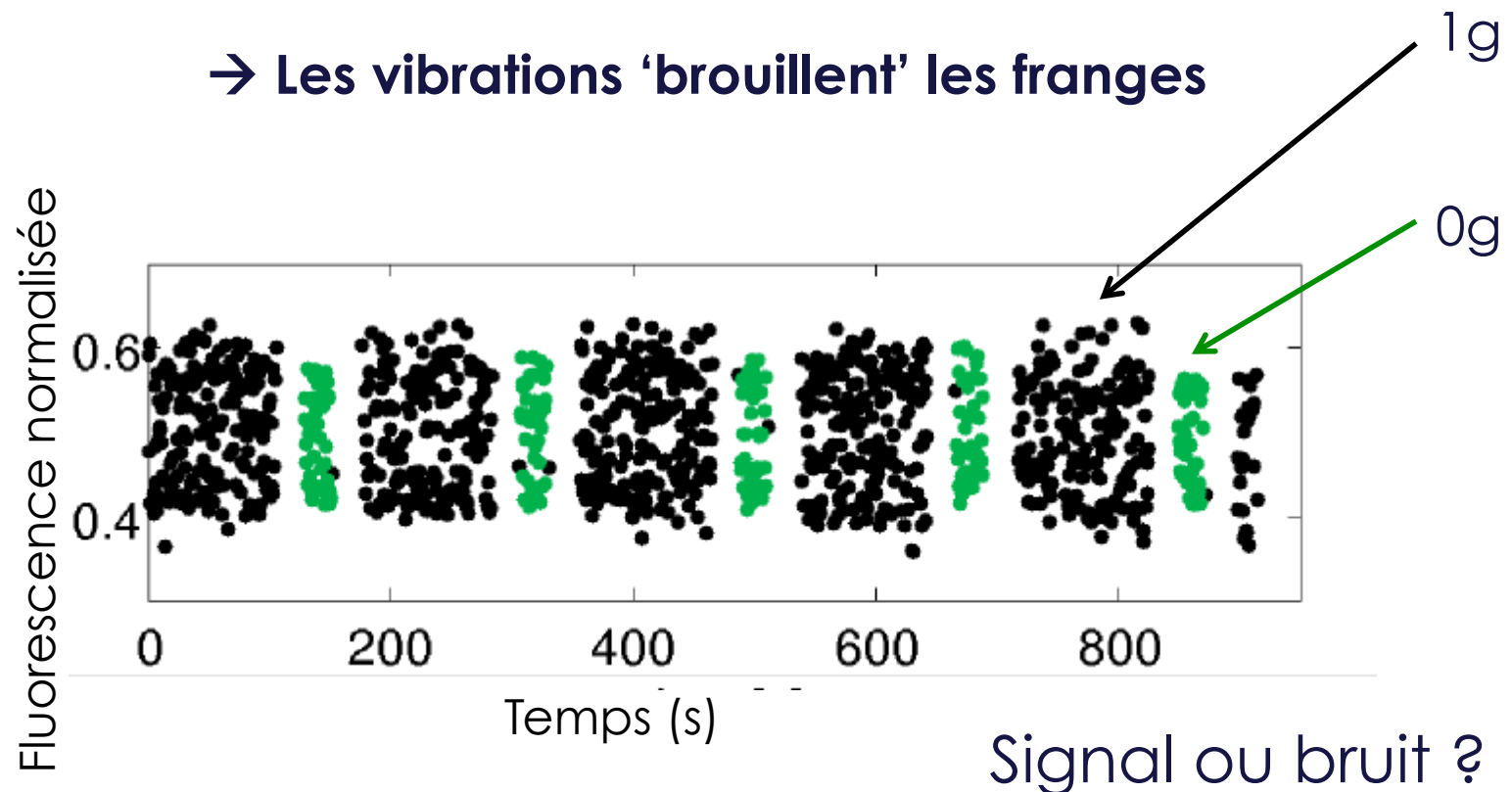
- Rapport signal à bruit
- Senseur hybride
- Application à la navigation inertielle

Signal en sortie d'interféromètre : $P = P_0 - A \cos(k_{\text{eff}} a T^2)$

Niveau de vibrations dans l'avion : $\delta_a \approx 0,5 \text{ m.s}^{-2}$
(>1000 fois plus élevé qu'au laboratoire)

Bruit de phase correspondant pour $T = 1 \text{ ms}$:
 $\delta_{\Phi} = k_{\text{eff}} \delta_a T^2 \approx 8 \text{ rad}$

→ Les vibrations 'brouillent' les franges

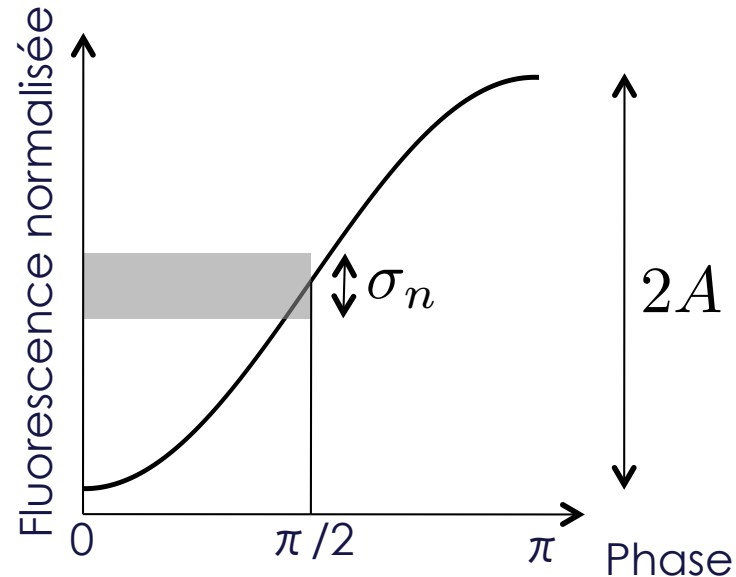


Sensibilité à l'accélération : $\sigma_a = \frac{1}{\text{SNR}} \times \frac{1}{k_{\text{eff}} T^2}$

Rapport signal à bruit de l'Interféromètre Atomique

Facteur d'échelle

Expériences de laboratoire : mesures à flanc de frange

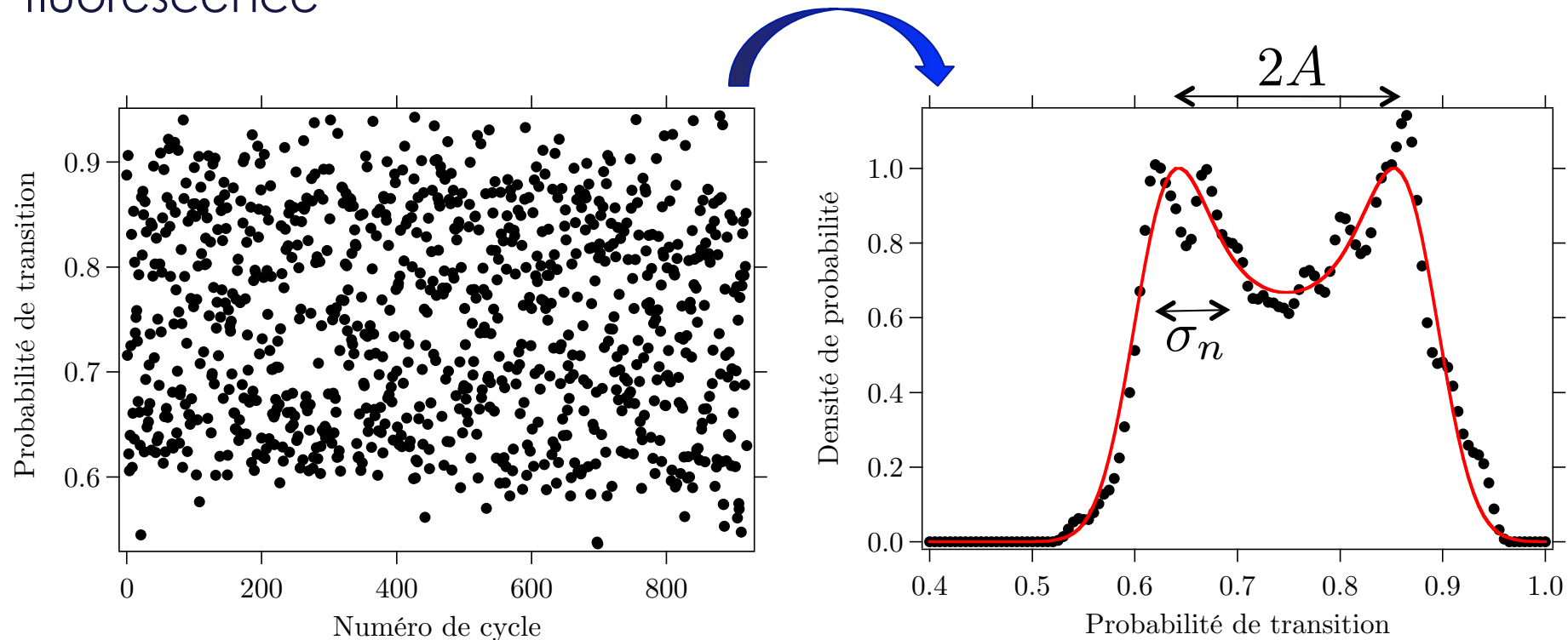


Rapport signal à bruit :
$$\text{SNR} = \frac{A}{\sigma_n}$$

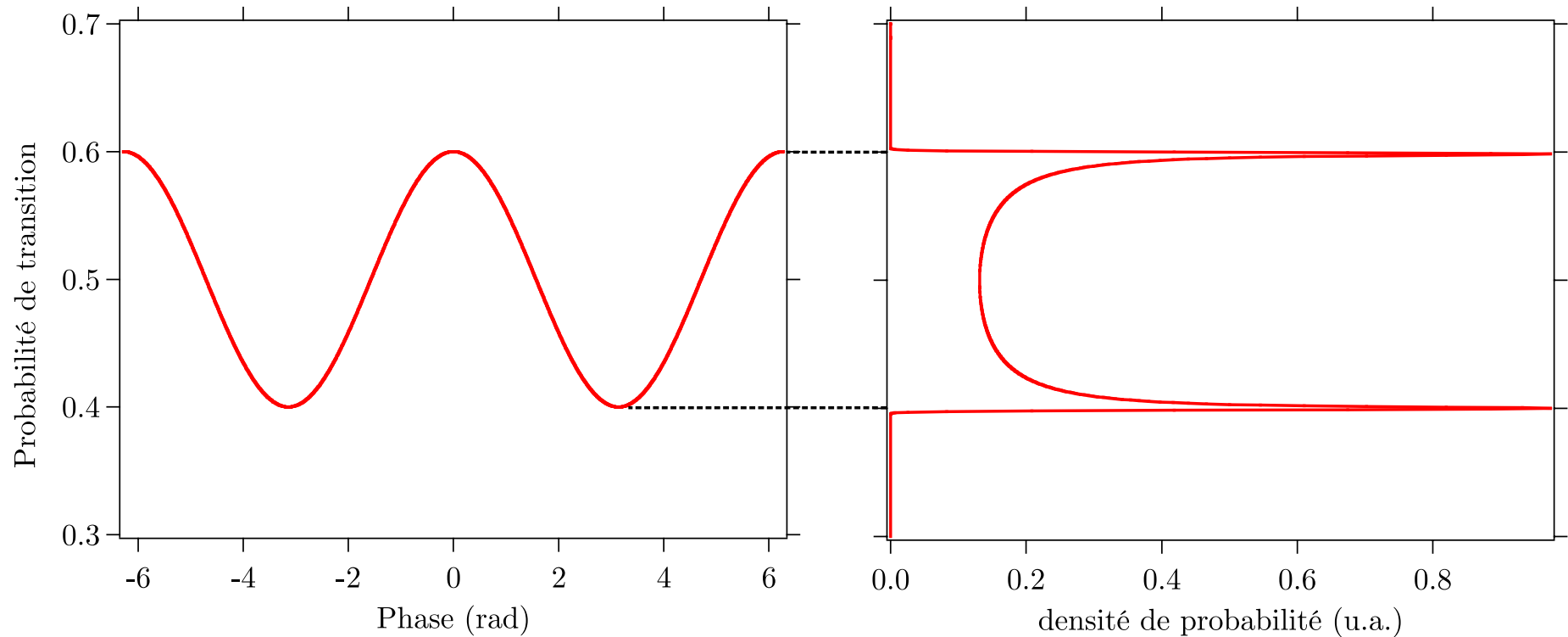
Mesure impossible dans l'avion !

A partir des mesures brutes, comment déterminer le SNR en vol ?

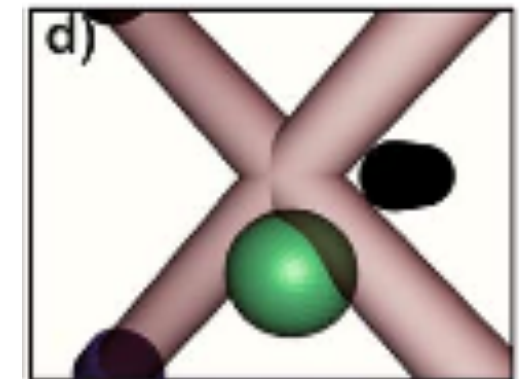
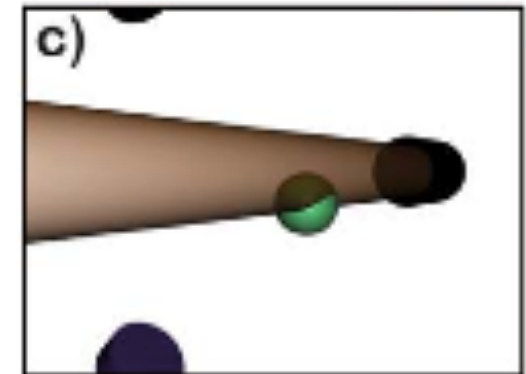
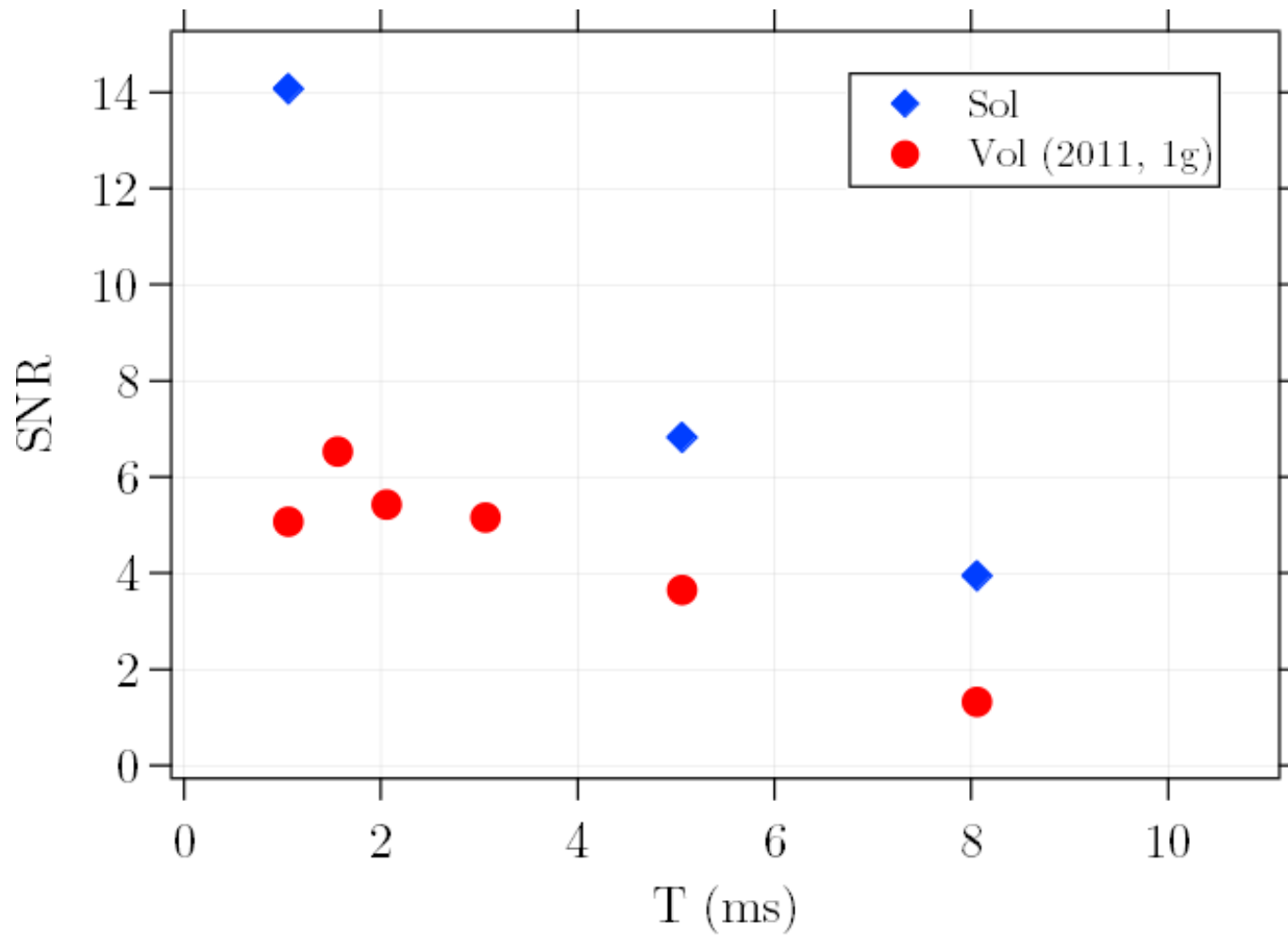
Analyse statistique des données : histogramme des valeurs de fluorescence



$$\text{Rapport signal à bruit : } \text{SNR} = \frac{A}{\sigma_n}$$



→ Même si la phase est brouillée, on retrouve toutes les informations sur l'interféromètre atomique



Cause probable : désaccord Doppler causé par les fluctuations d'accélération

$$\delta_a \approx 0,5 \text{ m.s}^{-2}, 10 \text{ ms de chute} \rightarrow \vec{k}_{\text{eff}} \cdot \vec{v} \approx \Omega_{\text{eff}}$$

→ Condition de résonance non satisfaite, perte de contraste

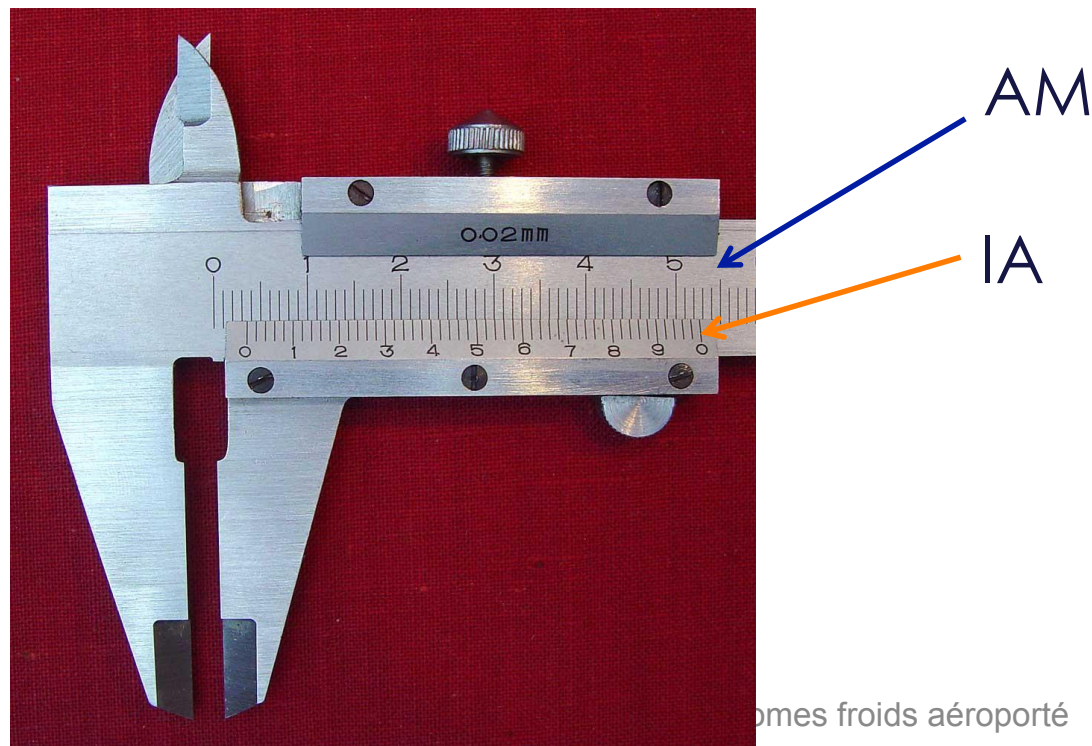
Solution : Correction en temps réel de la fréquence des DDS à partir d'une mesure externe de l'accélération

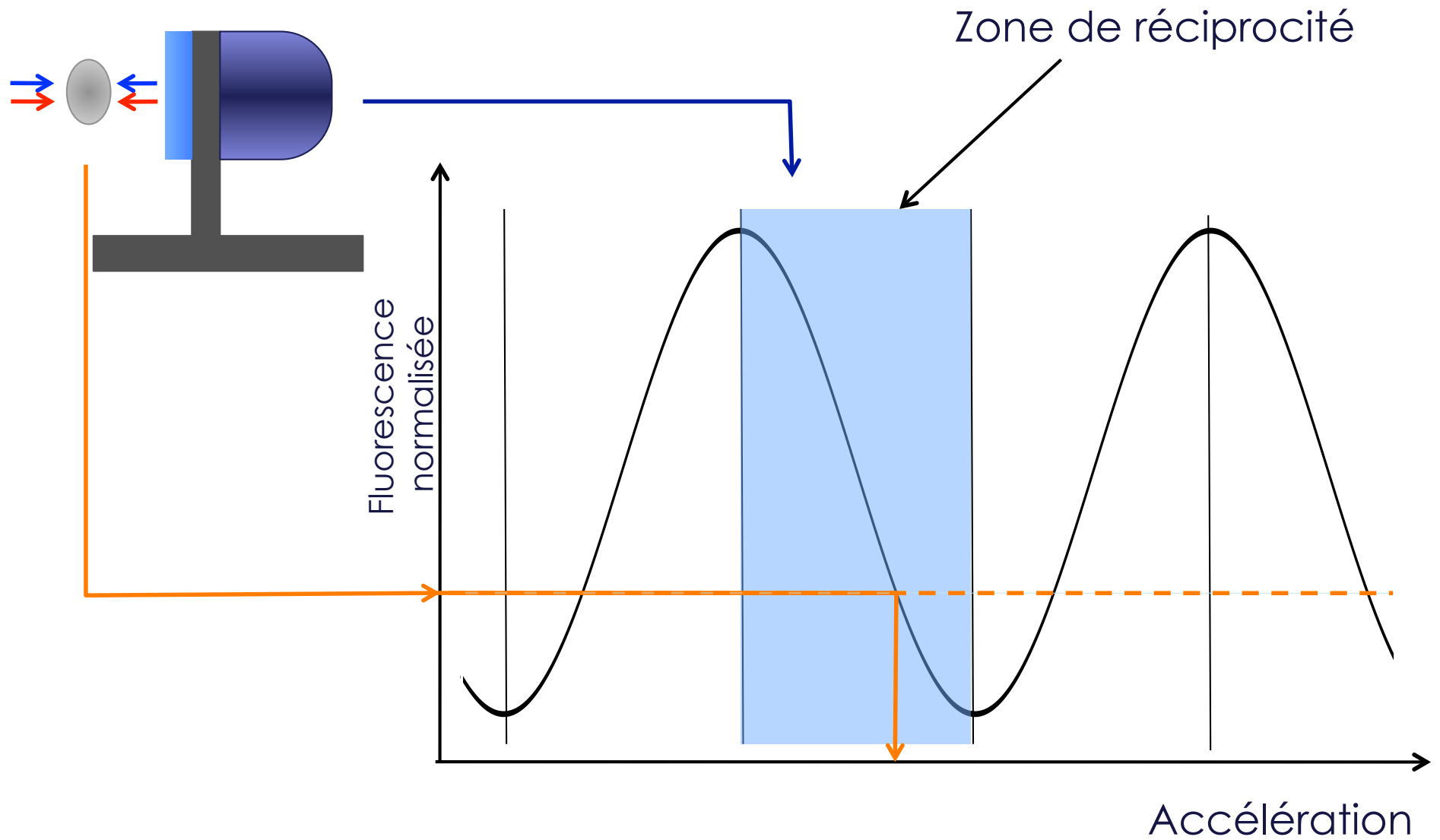
Objectifs :

- Accélération en fonction du temps
- Améliorer les performances des accéléromètres mécaniques

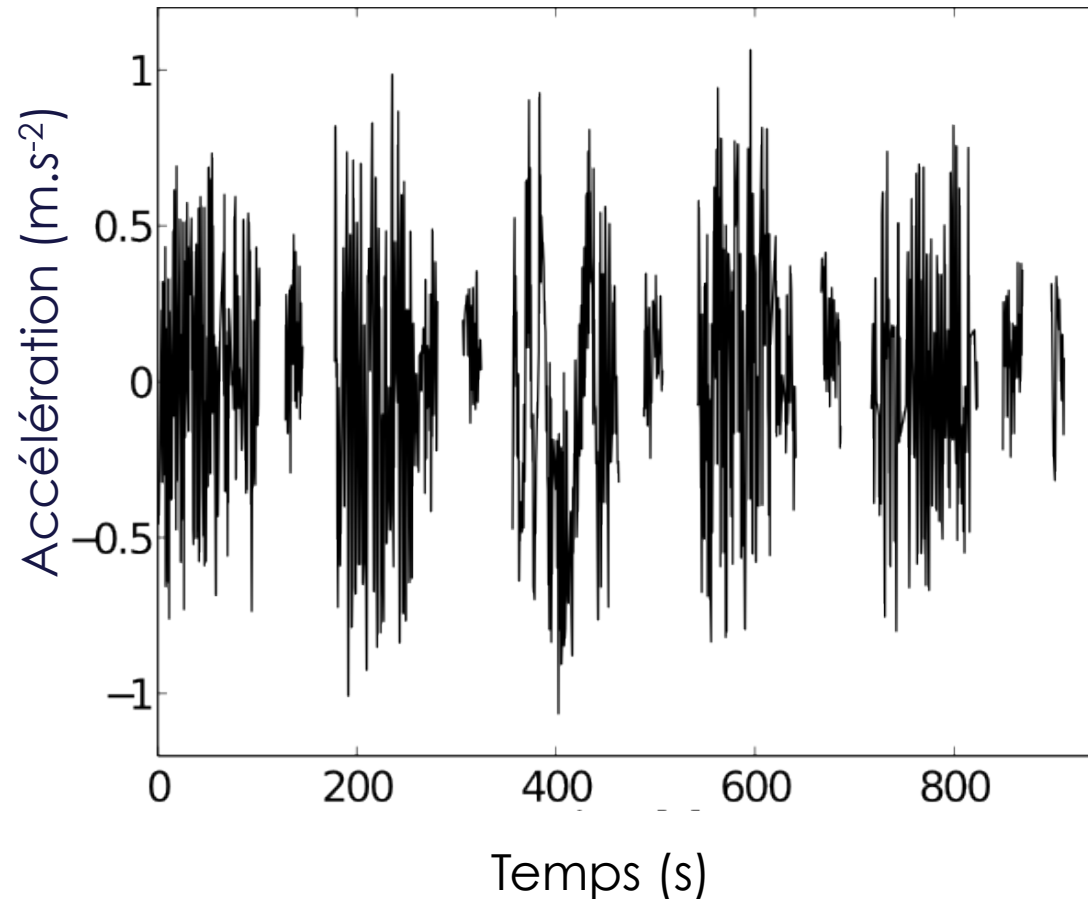
Senseur hybride :

- Accéléromètre Mécanique : mesure grossière
- Interféromètre atomique : mesure fine





Mesure en deux étapes : reconstruction du signal temporel



Sensibilité de la mesure d'accélération ?
 $T = 1,5\text{ms}, \text{SNR} \approx 5 \longrightarrow \sigma_a = 5,5 \times 10^{-3} \text{m.s}^{-2} \text{ par coup}$

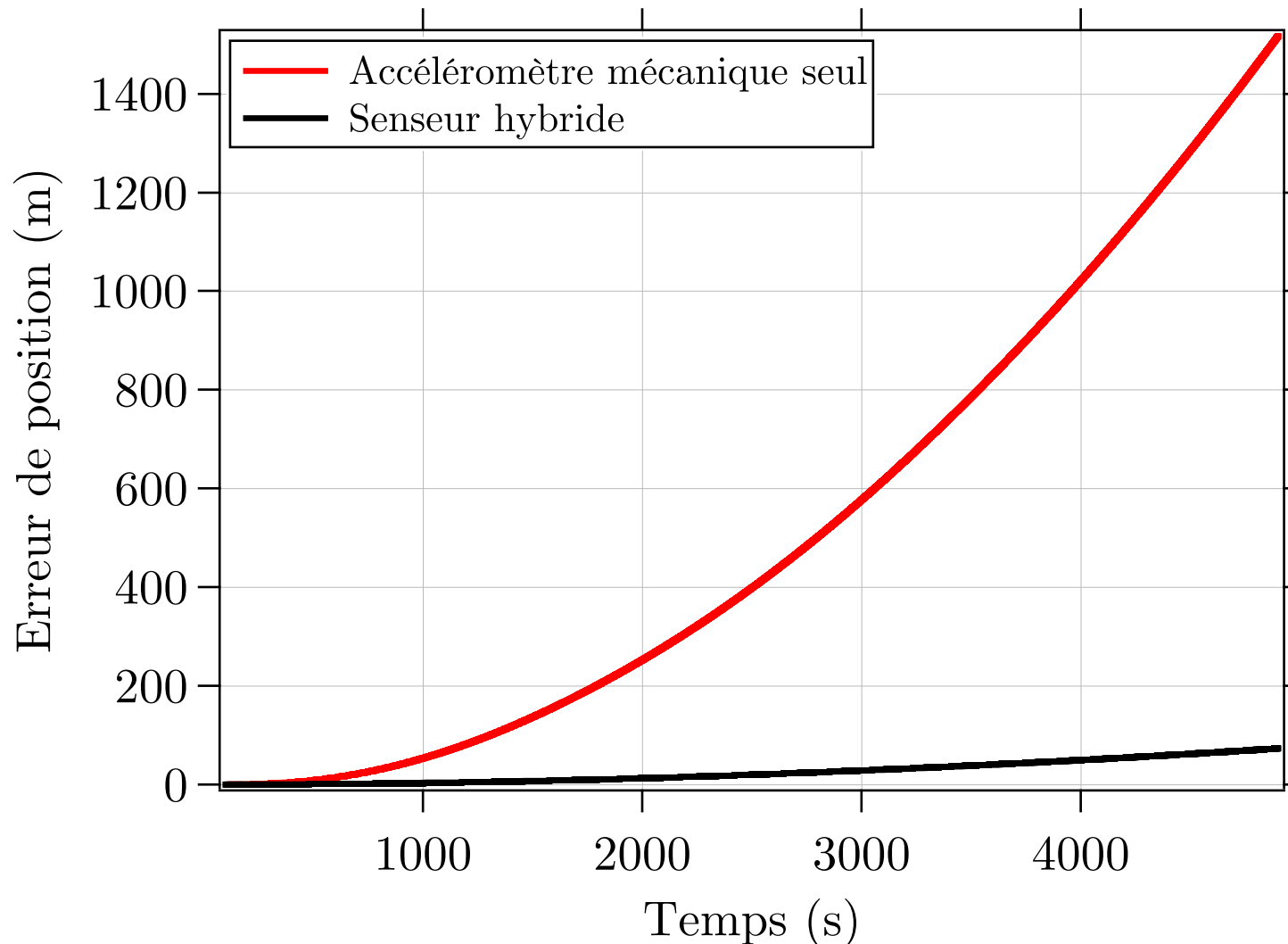
Intérêt des accéléromètres atomiques : exactitude élevée

Accéléromètres aéroportés classiques : dérive du biais

$$\sigma_b \approx 2 \times 10^{-5} \text{ m.s}^{-2}$$

→ Utilisation de l'interféromètre atomique pour corriger ces dérives

Simulation numérique avec $T=4,5$ ms

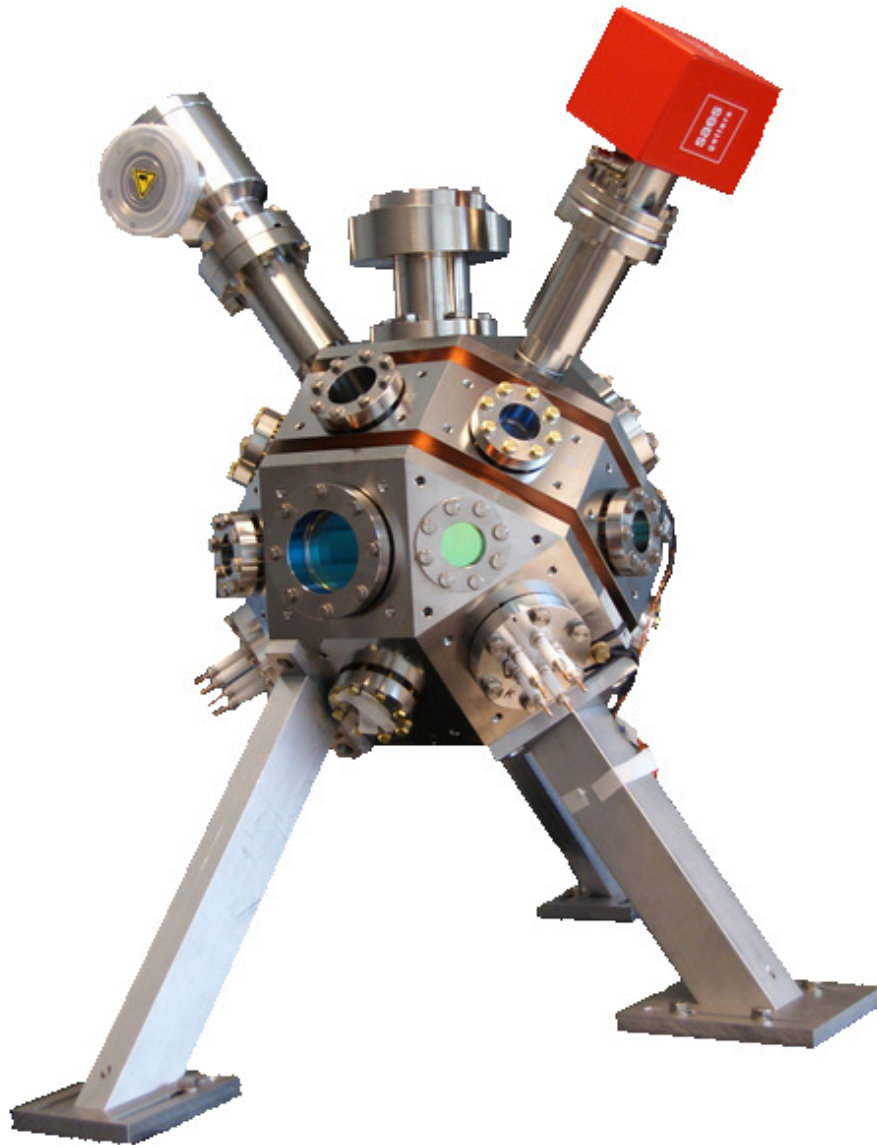


Expérience bi-espèce

- Système laser embarquable
- Piège magneto-optique Rb-K en vol

Accéléromètre atomique aéroporté

- Augmentation de la dynamique : senseur hybride
- Application : navigation inertielle



Nouvelle enceinte à vide

Meilleur refroidissement K et Rb

- Enceinte amagnétique
- Diodes laser affinées

Amélioration de la détection K

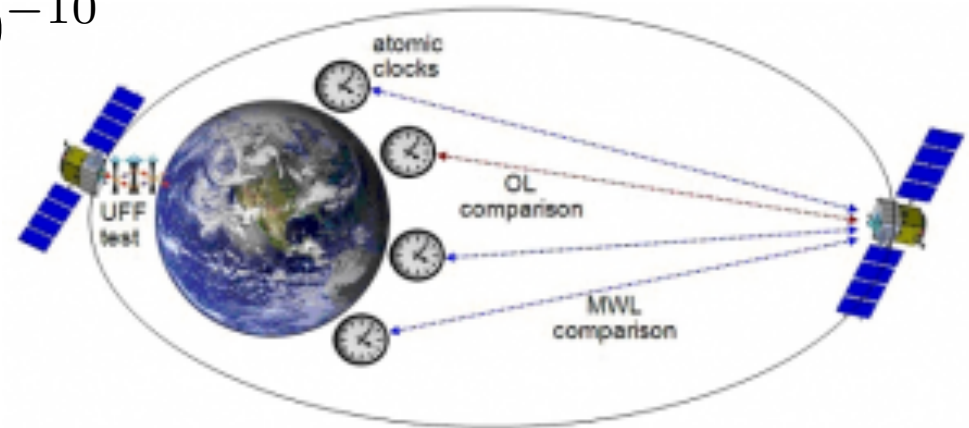
Piège dipolaire

- Atomes ultra-froids
- $T \sim 1$ s

Accéléromètre 3 axes

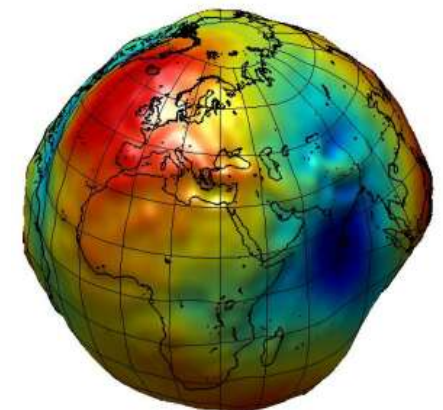
Test du principe d'équivalence

- Dans l'avion : $\eta \sim 10^{-10}$
- Satellite (STE-QUEST)
 $\eta \sim 10^{-15}$



Senseur aéroporté

- Navigation : évaluation de l'erreur de position (comparaison avec un GPS)
- Gravimétrie / gradiométrie



Remerciements



Chris
Westbrook



Philippe
Bouyer



Arnaud
Landragin

Gael Varoquaux
Patrick Cheinet
Thomas Hingant
Guillaume Salomon
Brynle Barrett



Guillaume
Stern



Remi Geiger



Baptiste
Battelier



Pierre – Alain
Gominet



Nassim
Zahzam

28 Septembre 2012

V. Ménot - Accéléromètre à atomes froids aéroporté

