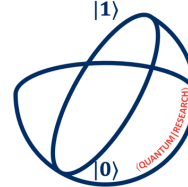


STRATEGIE  
NATIONALE  
QUANTIQUE



PROGRAMME ET  
EQUIPEMENTS  
PRIORITAIRES  
DE RECHERCHE  
QUANTIQUE

**anr**®



# PEPR quantique QAFCA - 2.2

## capteurs Quantiques à Atomes Froids : mesure du Champ de pesanteur A toutes les échelles

Sébastien Merlet

SYRTE l'Observatoire de Paris | PSL

Systèmes de Référence Temps-Espace

## Contexte – Forces en présence / Etat de l'art

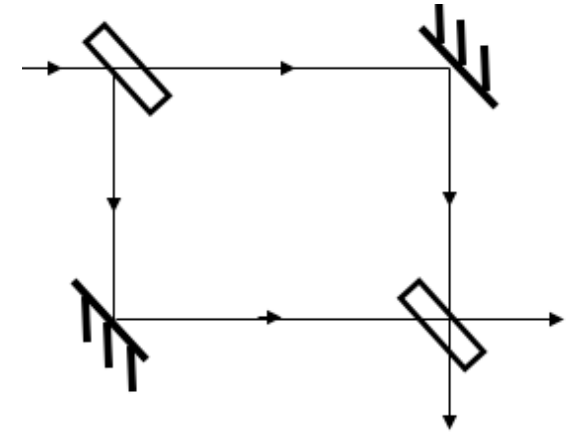
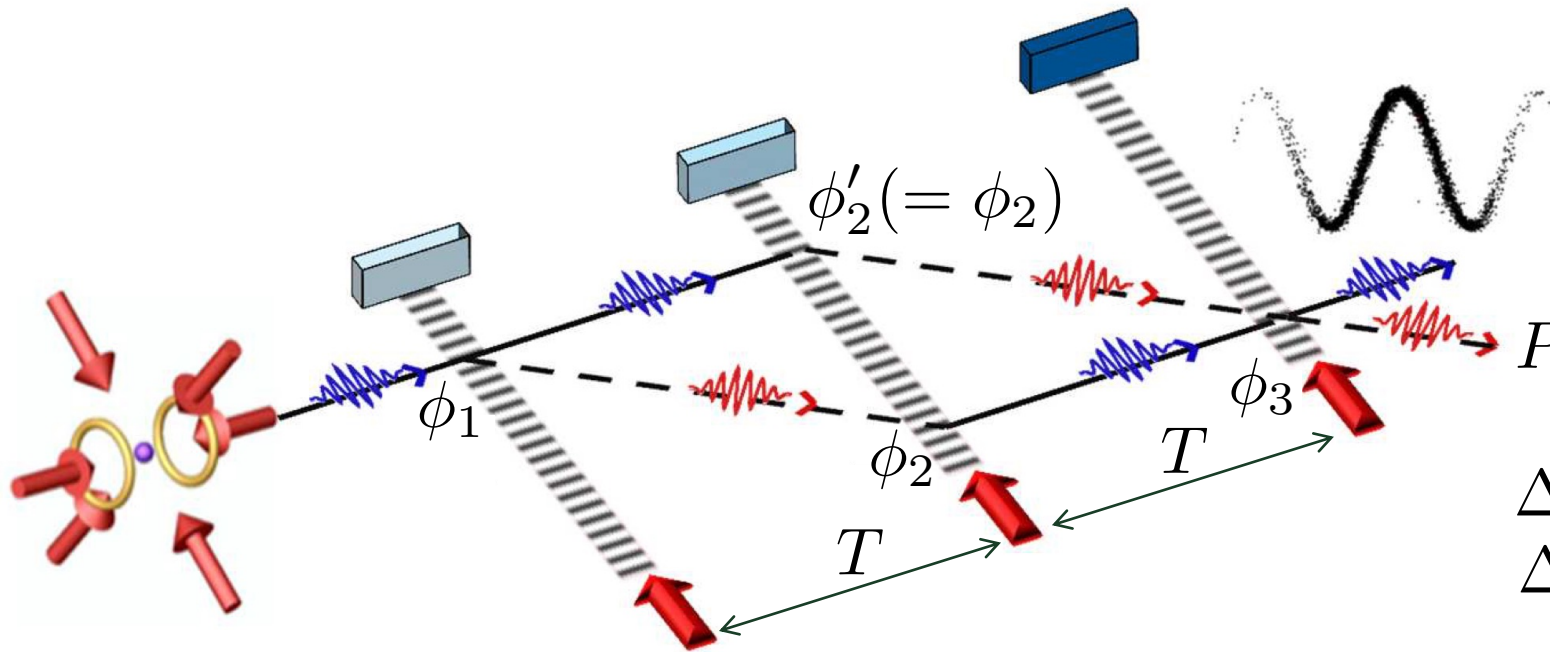
- Capteurs quantiques à atomes froids → **exactitude, stabilité long terme**
- Mesures de l'espace et du temps :
  - Navigation inertielle, échelles de temps
  - Physique fondamentale
  - **Géodésie et Géophysique** : champs de pesanteur à toutes les échelles spatiales
- Laboratoires français leader en interférométrie atomique
  - **Etat de l'art** en gravimétrie, gyrométrie, mesures embarquées, tests de phys fond, horloges
  - Pionniers pour les capteurs à visée applicative, **les capteurs transportables et mobiles**
  - Pionniers pour les applications spatiales (PHARAO)
- **Transfert industriel** du Gravimètre quantique : Exail (ex-Muquans, ex-iXblue)
- Pôle-Hub quantiques avec forts accents sur les capteurs
  - **USA, Chine, Singapour, Israël, Australie, Allemagne (Hanovre), UK (Birmingham)**

## Enjeux & verrous

- Champ de pesanteur à toutes les échelles spatiales
  - **Gradiométrie sol** : dérivée du champ → très petites échelles
  - **Horloges optiques** au sol (**géodésie chronométrique**) : potentiel gravitationnel → échelle intermédiaire
  - **Accélérométrie** et **gradiométrie embarquée** : large couverture sol → échelles intermédiaires
  - Accélérométrie atomique spatiale (très grandes échelles)
- **Performances sur sites d'intérêt** pour la gradiométrie et la géodésie chronométrique
- Accéléromètres atomique en **mode « strapdown »**
- Démonstration de **protocoles quantiques avancés**

# Un Interféromètre Atomique c'est quoi ?

Paquets d'ondes atomiques diffractés par des impulsions lasers



$$P = \frac{1}{2}(1 - C \cos \Delta\Phi)$$

$$\Delta\Phi = \Phi_I - \Phi_{II}$$

$$\Delta\Phi = \phi_1 - 2\phi_2 + \phi_3$$

$$\phi(t) \sim \vec{k}_{\text{eff}} \vec{r}(t)$$

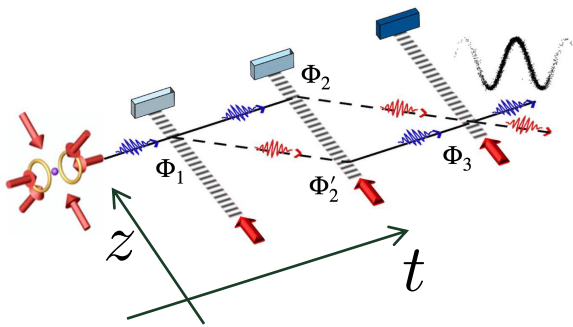
$$\Delta\Phi = \vec{a} \cdot \vec{k}_{\text{eff}} T^2 - 2\vec{k}_{\text{eff}} (\vec{\Omega} \times \vec{v}) T^2$$

accélération

rotation

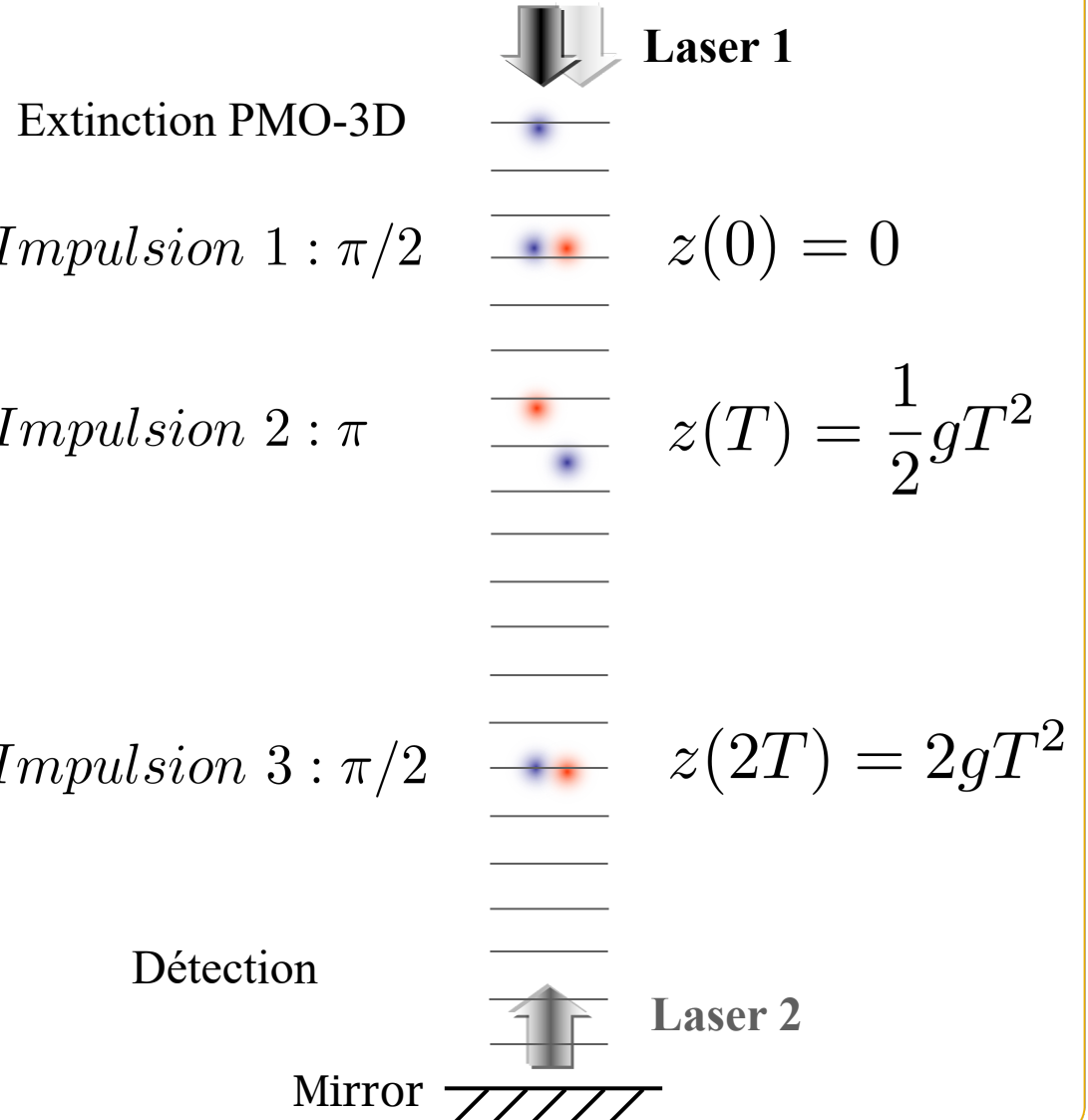
# ex d'IA : un gravimètre

Faisceau laser aligné sur la chute libre des atomes



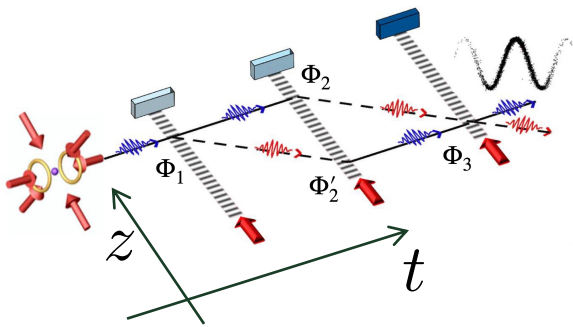
$$\phi(t) \sim \vec{k}_{\text{eff}} \vec{r}(t)$$

$$\Delta\Phi = \vec{a} \cdot \vec{k}_{\text{eff}} T^2 - 2\vec{k}_{\text{eff}} (\vec{\Omega} \times \vec{v}) T^2$$



# ex d'IA : un gravimètre

Faisceau laser aligné sur la chute libre des atomes



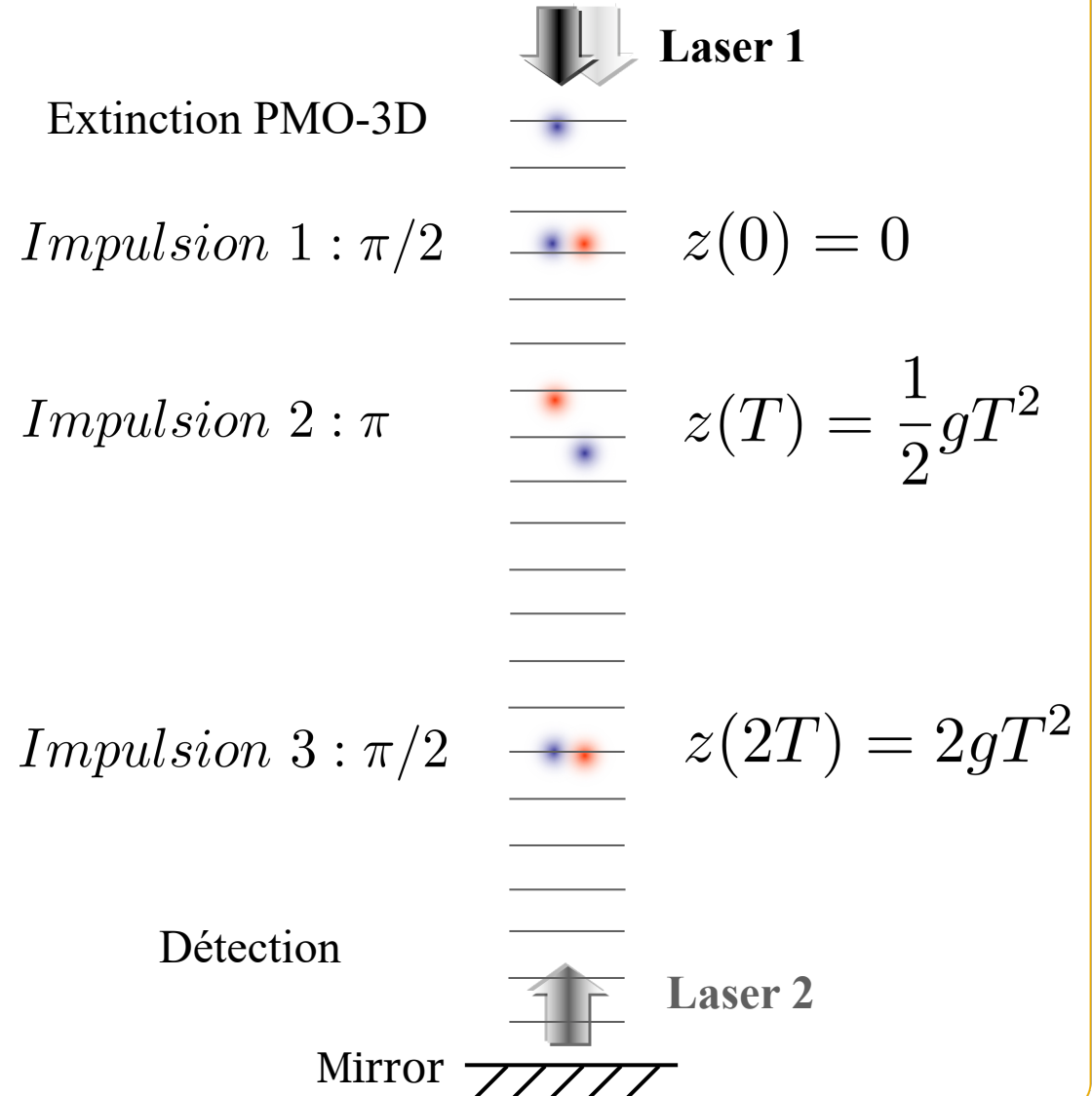
$$\phi(t) \sim \vec{k}_{\text{eff}} \vec{r}(t)$$

$$r(t) = z(t) = \frac{1}{2}gt^2$$

$$\Delta\Phi = \vec{a} \cdot \vec{k}_{\text{eff}} T^2 - 2\vec{k}_{\text{eff}} (\vec{\Omega} \times \vec{v}) T^2$$

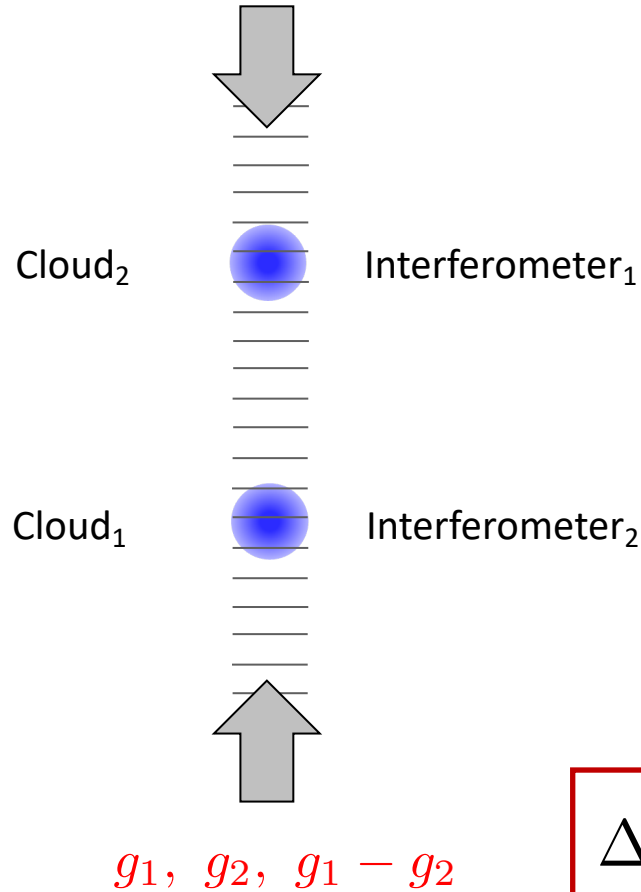
$$\vec{a} = \vec{g}$$

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



# ex d'IA : un gravimètre, mieux : deux gravimètres

Même faisceau laser aligné sur la chute libre de **deux** nuages d'atomes

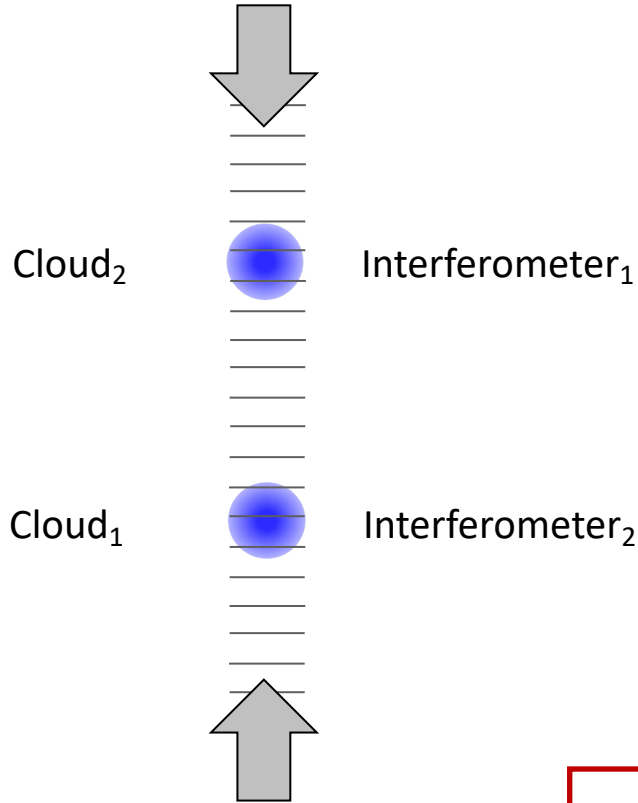


- Differential measurement allows for extracting the **acceleration difference** (and thus the Earth gravity gradient)
- **Suppression of common mode noise**, and in particular of the vibration noise
- Adapted for onboard measurements
- $g$  and  $\Delta g$ : **resolve ambiguities** in determination of mass and position

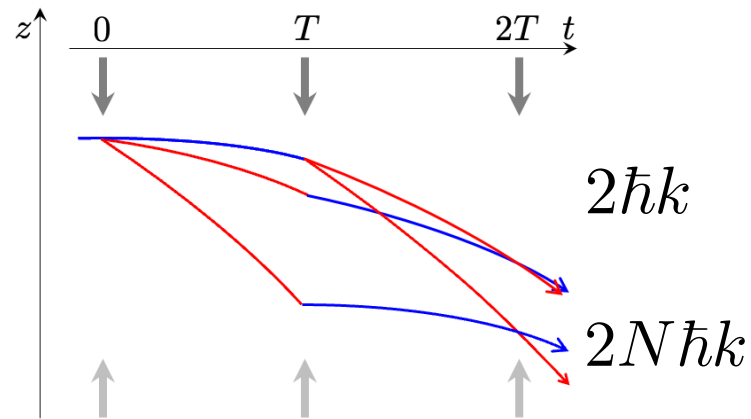
$$\Delta\Phi = \vec{k}_{\text{eff}}\vec{g}T^2$$

# Nouveaux outils

Augmenter le facteur d'échelle et donc la sensibilité de mesure, en augmentant  $k$ ,  $T$  et  $T_c$



$g_1, g_2, g_1 - g_2$

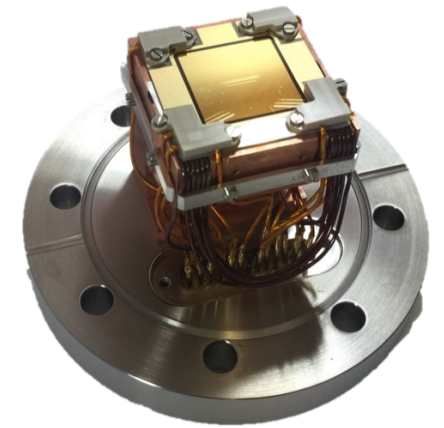


de 2 à  $2 \times N$  transitions : LMT, Bragg  
Nouvelles optiques

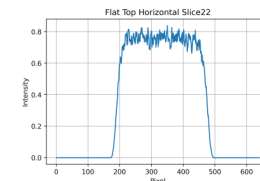
Nouvelles techniques, contrôle optimal, mesures non destructives

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

Puce atomique



des atomes froids ( $\mu\text{K}$ )  
à ultra-froids ( $\text{nK}$ )

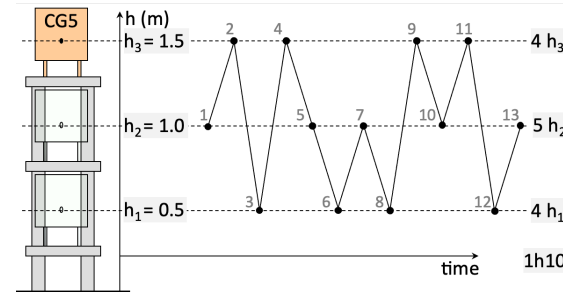




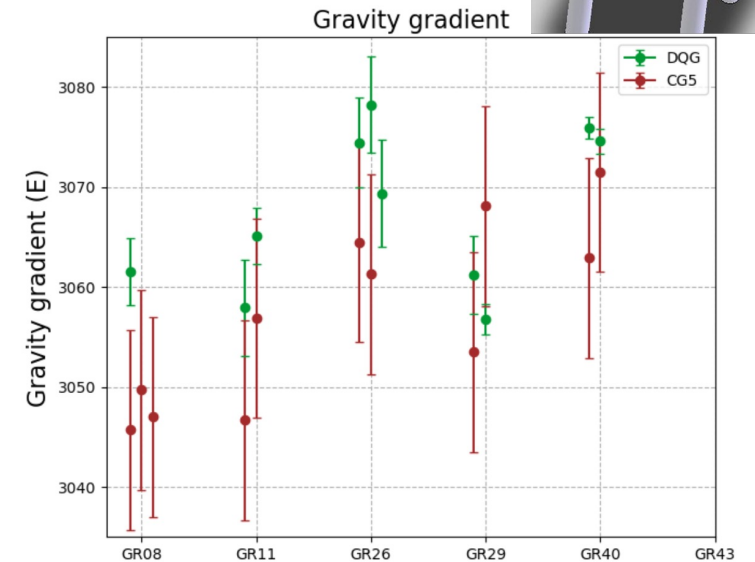
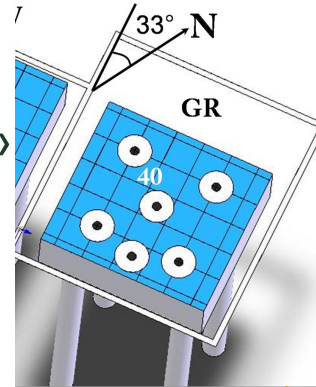
# WP1 : Développer les cas d'usage des capteurs pour les géosciences

Mesures avec un prototype de capteur de gravité dual industriel

Cartographie sur site de référence (labo gravi, RPG LNE Trappes) + sur sites « démonstratifs »



Rejeter la dérive :  
boucles.  
Bruit au RG à chaque hauteur, non rejeté.



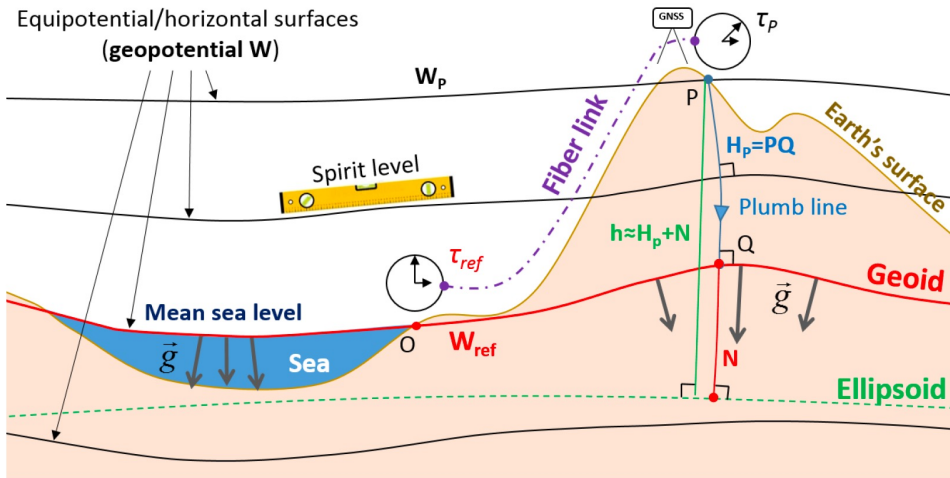
**Synergie avec le projet Horizon Europe FIQUgS** (développement d'un DQG 2<sup>e</sup> génération, déploiement sur le terrain)

# Partenaires

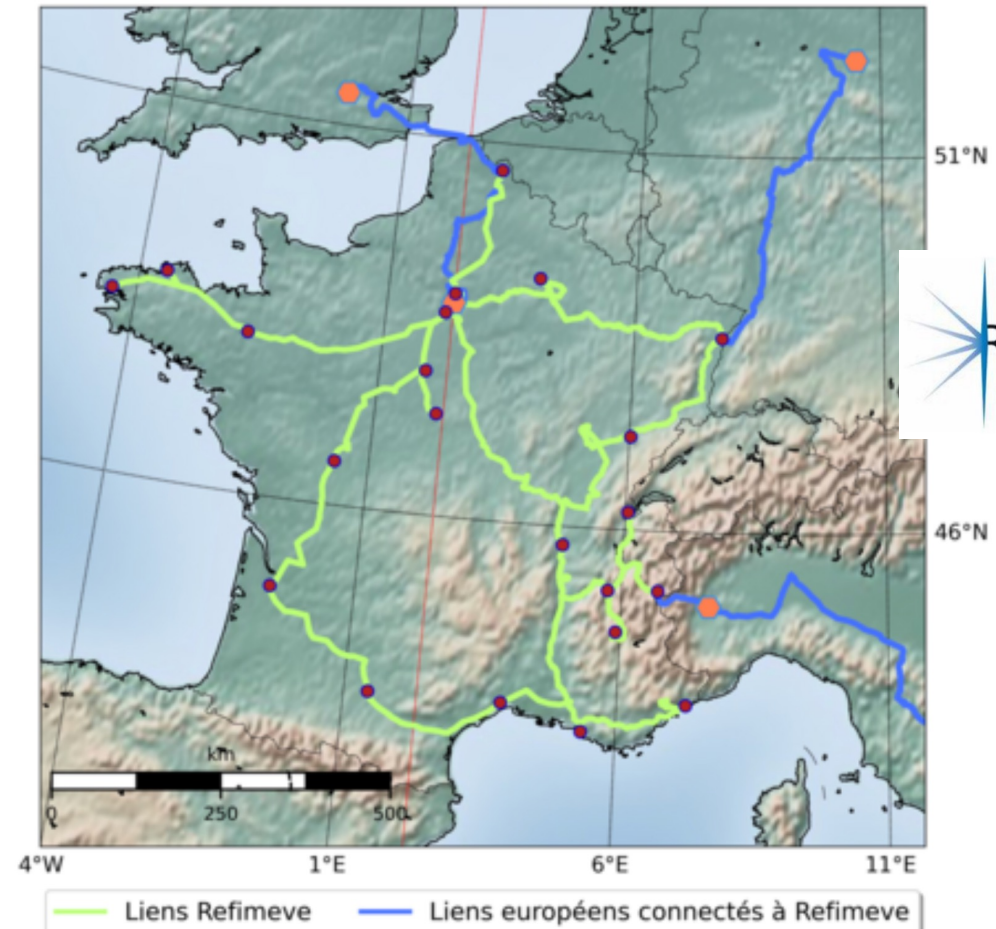
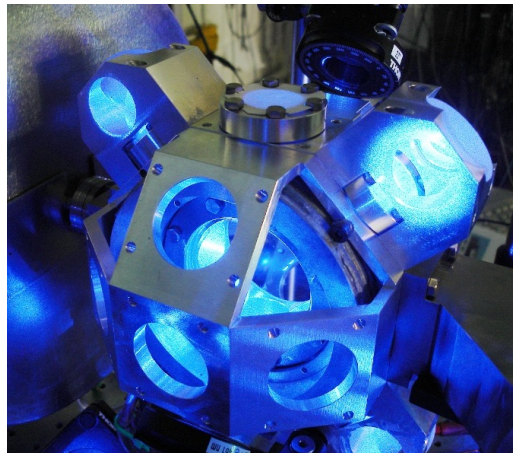
- Observatoire de Paris – PSL (laboratoire **SYRTE**), Arnaud Landragin, **capteurs pour les géosciences**, capteurs multi-axes, mesures sous la limite standard
- CNRS (laboratoires SYRTE, LP2N et LKB, *LCAR*), Franck Pereira Dos Santos, tous les aspects
- Sorbonne Université, SU (laboratoires SYRTE et LKB), Remi Geiger, gyro-sismologie, séparatrices atomiques à grande separation
- Laboratoire National de métrologie et d'Essais, LNE (laboratoire SYRTE), Sébastien Merlet, capteur de gravité gravi-gradimètre, déploiement sur le terrain
- Institut d'Optique Graduate School (Laboratoire **LP2N**), Philippe Bouyer, Miniaturisation et **embarquabilité des capteurs** quantiques, sources d'atomes ultra-froids, géodésie spatiale
- Conservatoire National des Arts et Métiers (**LKB**), Saïda Guellati, **séparatrices atomiques à grande separation**, sources atomiques
- Université Paul Sabatier (laboratoire **LCAR**), Alexandre Gauguet, séparatrices atomiques à grande séparation, **miniaturisation du capteur**



# Horloges



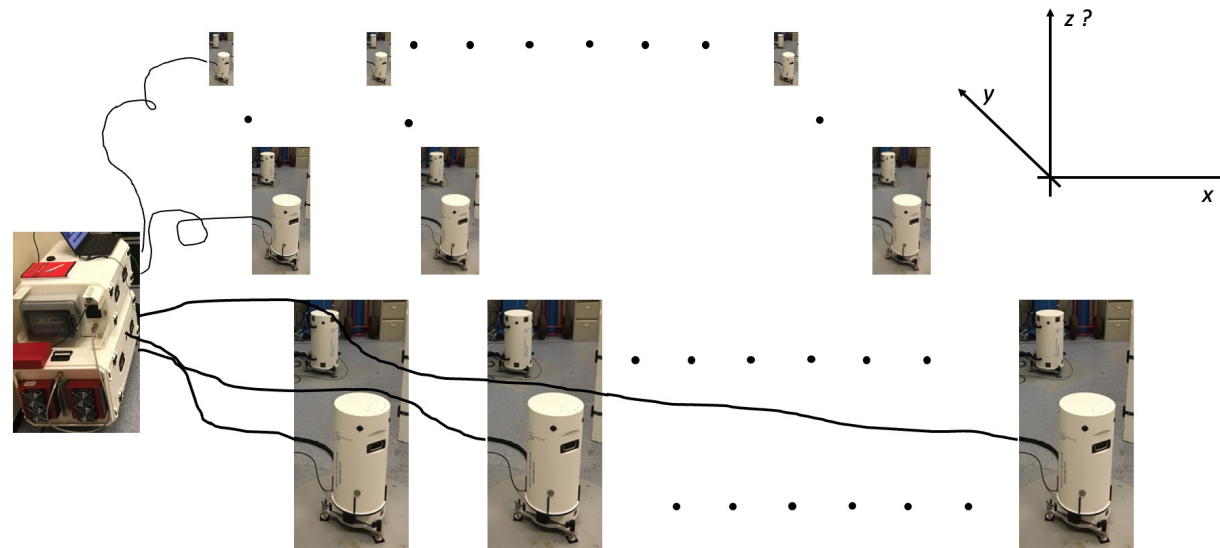
$$1\text{cm} \rightarrow 10^{-18}$$

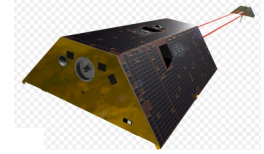


**Refimeve+**  
Réseau fibré métrologique à vocation européenne

Why not using this network to, not only connect clocks, but also gravi-gradi-meters ? Altogether.

# Réseaux d'Interféromètres Atomiques





# Réseaux d'Interféromètres Atomiques

