

Quelques résultats de la campagne de vols paraboliques de l'expérience RubiClock



David Holleville

L'équipe projet :

Luigi de Sarlo (SYRTE)

Simon Bernon (LP2N)

Mehdi Langlois (SYRTE)

Jean-François Schaff (MuQuans)

Le projet RubiClock en quelques mots



RubiClock = projet d'horloge compacte de haute performance, à atomes froids de rubidium, à vocation industrielle et spatiale

- Démarré début 2011 au SYRTE
- Perfo visées : $\sim 10^{-13} \tau^{-1/2}$ et 10^{-15} à la journée
- Objectifs :
 - Transfert industriel vers MuQuanS pour une horloge « sol » : MClock



- Valider un démonstrateur en 0g pour une future horloge spatiale



Issu du concept HORACE, initié par N. Dimarcq en 1998, poursuivi au SYRTE par S. Guérandel, et financé par le CNES depuis 15 ans

Etroite collaboration avec MuQuanS depuis le début du projet et à la fois pour les aspects « sol » et « 0g »

Plan de l'exposé :

- 1. Principe de fonctionnement du concept HORACE**
- 2. Description du dispositif expérimental**
- 3. Résultats expérimentaux au sol**
- 4. Résultats expérimentaux dans l'avion**

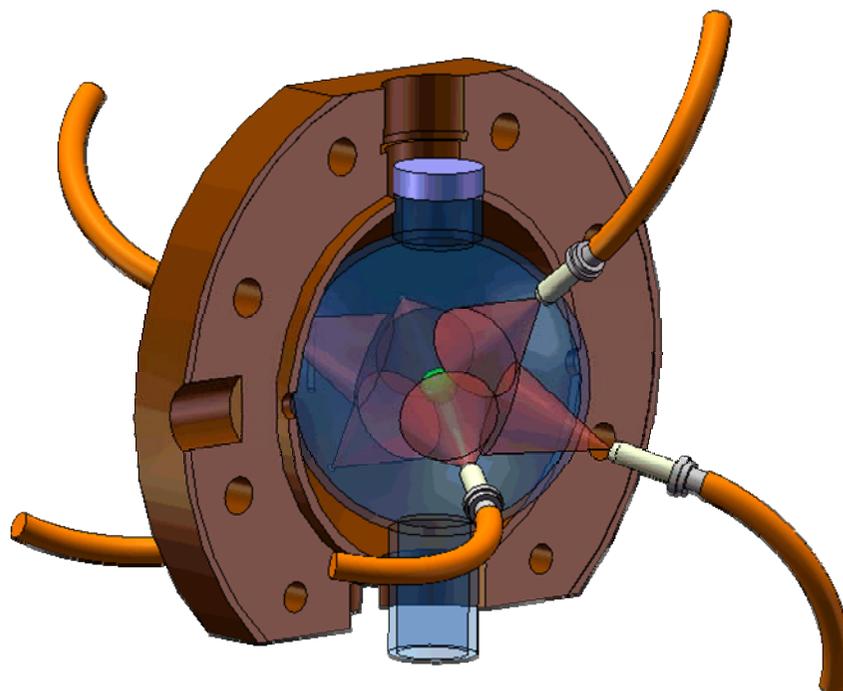
1. Principe de fonctionnement du concept HORACE

Principe de fonctionnement d'HORACE



Toutes les étapes du cycle d'horloge se passent au même endroit

Etape 1 : refroidissement en lumière isotrope. La cavité micro-onde joue le rôle de sphère intégrante



Mise en œuvre simplifiée : 6 fibres optiques, pas de mise en forme du faisceau, pas de contrôle de polarisation, pas d'équilibrage des faisceaux, fonctionne à faible puissance (20 mW)

Refroidissement performant : possibilité de faire du refroidissement Doppler et sub Doppler. Typiquement qq 10^7 atomes en 100 ms

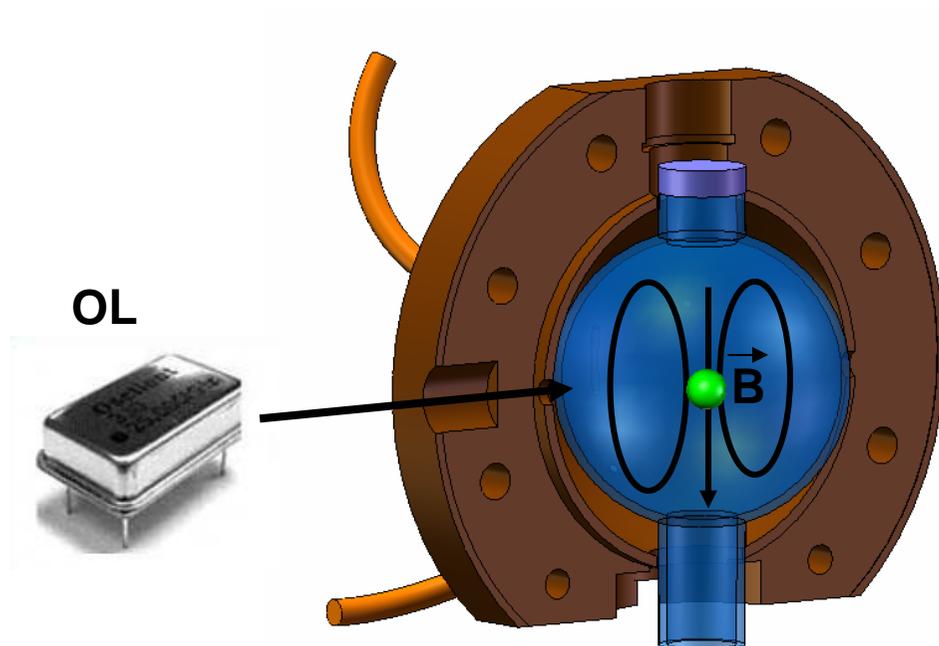
Principe de fonctionnement d'HORACE



Toutes les étapes du cycle d'horloge se passent au même endroit

Etape 1 : refroidissement en lumière isotrope. La cavité micro-onde joue le rôle de sphère intégrante

Etape 2 : interrogation micro-onde pendant la chute des atomes dans la cavité



Temps d'interrogation limité à environ 50 ms sur terre, par le temps de chute des atomes dans la cavité, et non pas par leur température

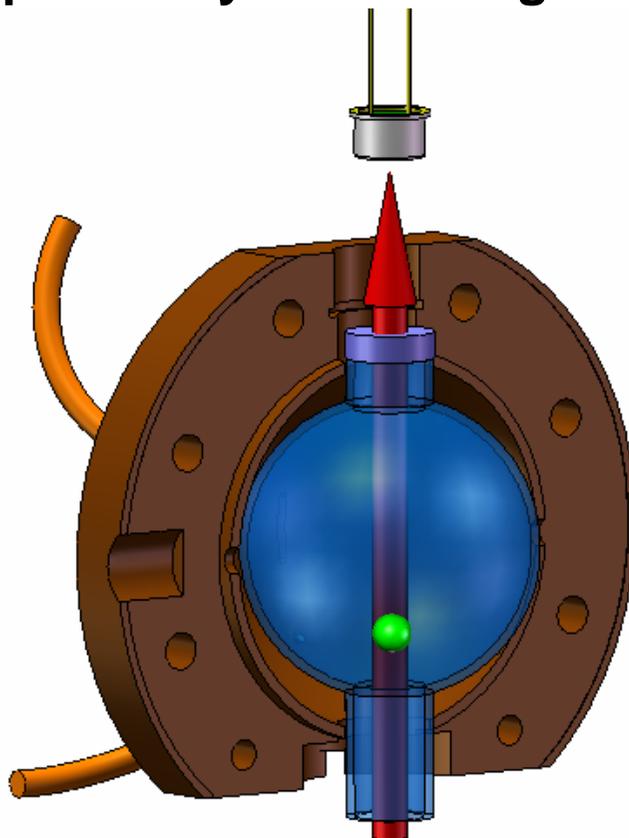
→ intérêt du fonctionnement en microgravité

- accès à des temps d'interrogation plus longs**
- besoin de refroidir d'avantage les atomes**

Principe de fonctionnement d'HORACE



Toutes les étapes du cycle d'horloge se passent au même endroit



Etape 1 : refroidissement en lumière isotrope. La cavité micro-onde joue le rôle de sphère intégrante

Etape 2 : interrogation micro-onde pendant la chute des atomes dans la cavité

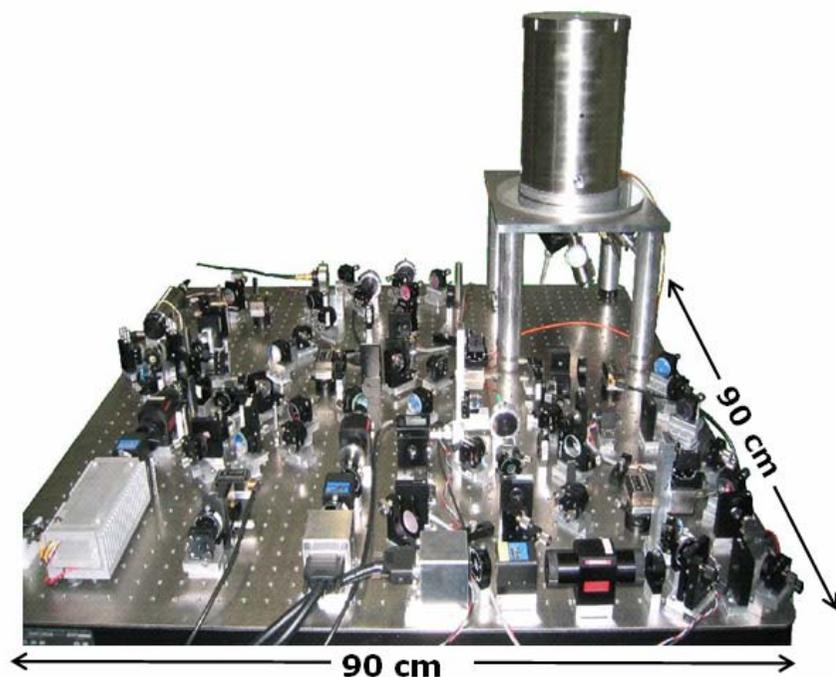
Etape 3 : détection par absorption des atomes qui ont fait la transition atomique

Systeme de réjection des fluctuations d'intensité 10^5
Fluctuation du nombre d'atomes coup à coup limité par le shot noise atomique. Seule une population atomique est détectée → possibilité de recapturer des atomes déjà froids lors du cycle suivant

Résultats métrologiques d'HORACE (2009)

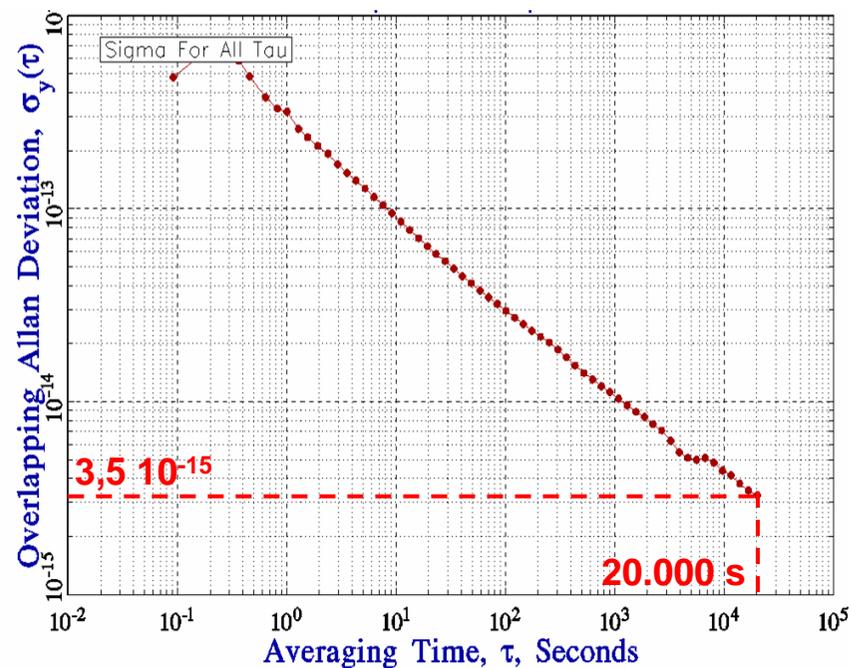


Horloge au césium



$$\sigma_{\tau} = 2,2 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$$

$$\sigma_{\tau}(t) = 3,5 \cdot 10^{-15} \text{ à } 20.000 \text{ secondes}$$



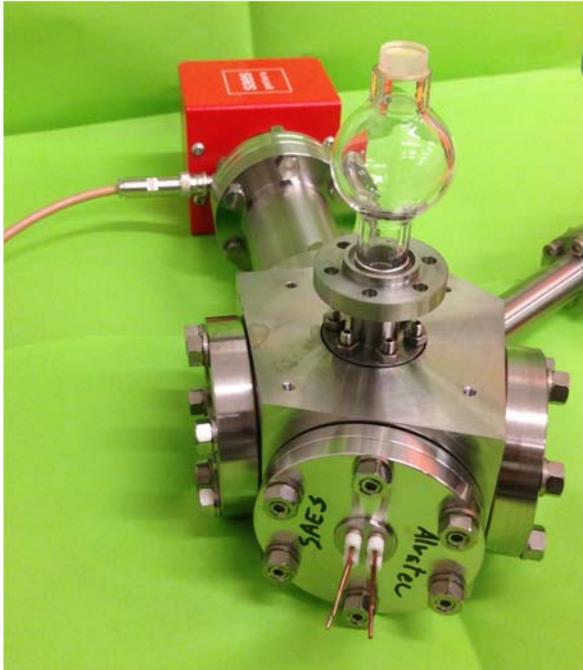
Travail de thèse de F.-X. Esnault
et de N. Rossetto

Stabilité long terme limitée par le déplacement collisionnel et les effets liés à la densité atomique

Plusieurs collaborations industrielles (Thalès, Sodern) à travers le cofinancement de bourses de thèse.

2. Description du dispositif expérimental des vols 0g

Le démonstrateur RubiClock – Enceinte UHV



Enceinte UHV



Dispenser de Rb sur passage électrique amagnétique

Ballon de quartz brasé sur tube titane

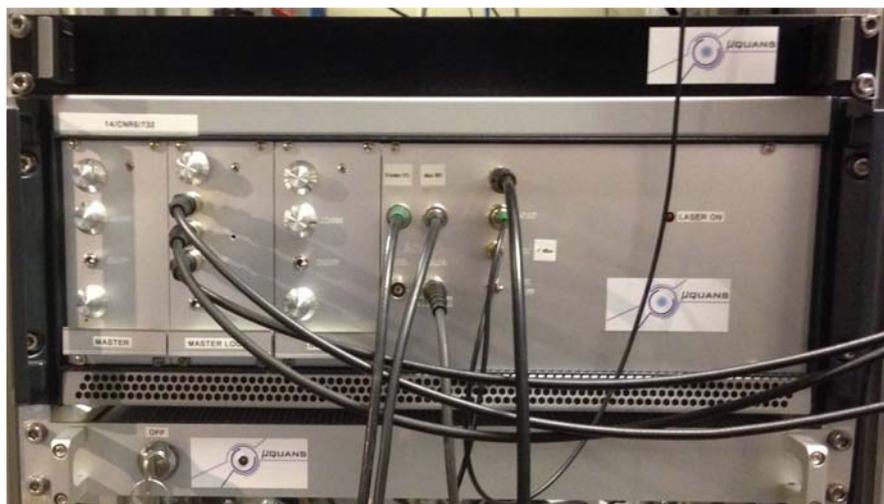


Cavité en cuivre avec bague d'accord en fréquence

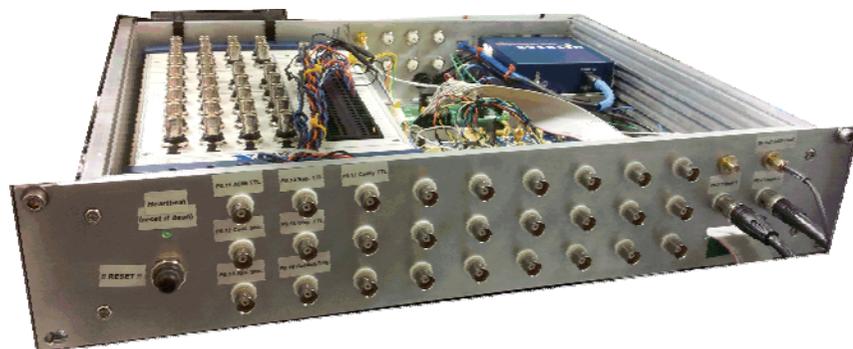


Le choix des solutions technologiques s'est fait en étroite collaboration avec MuQuans

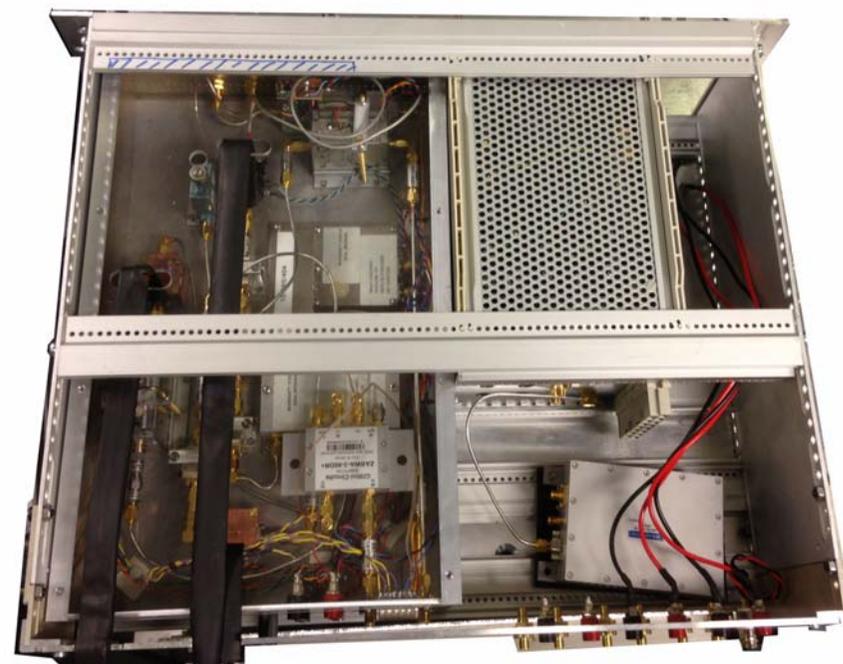
Le démonstrateur RubiClock



**Banc optique développé par MuQuans
(rack 6U) – 200 mW @ 780 nm**

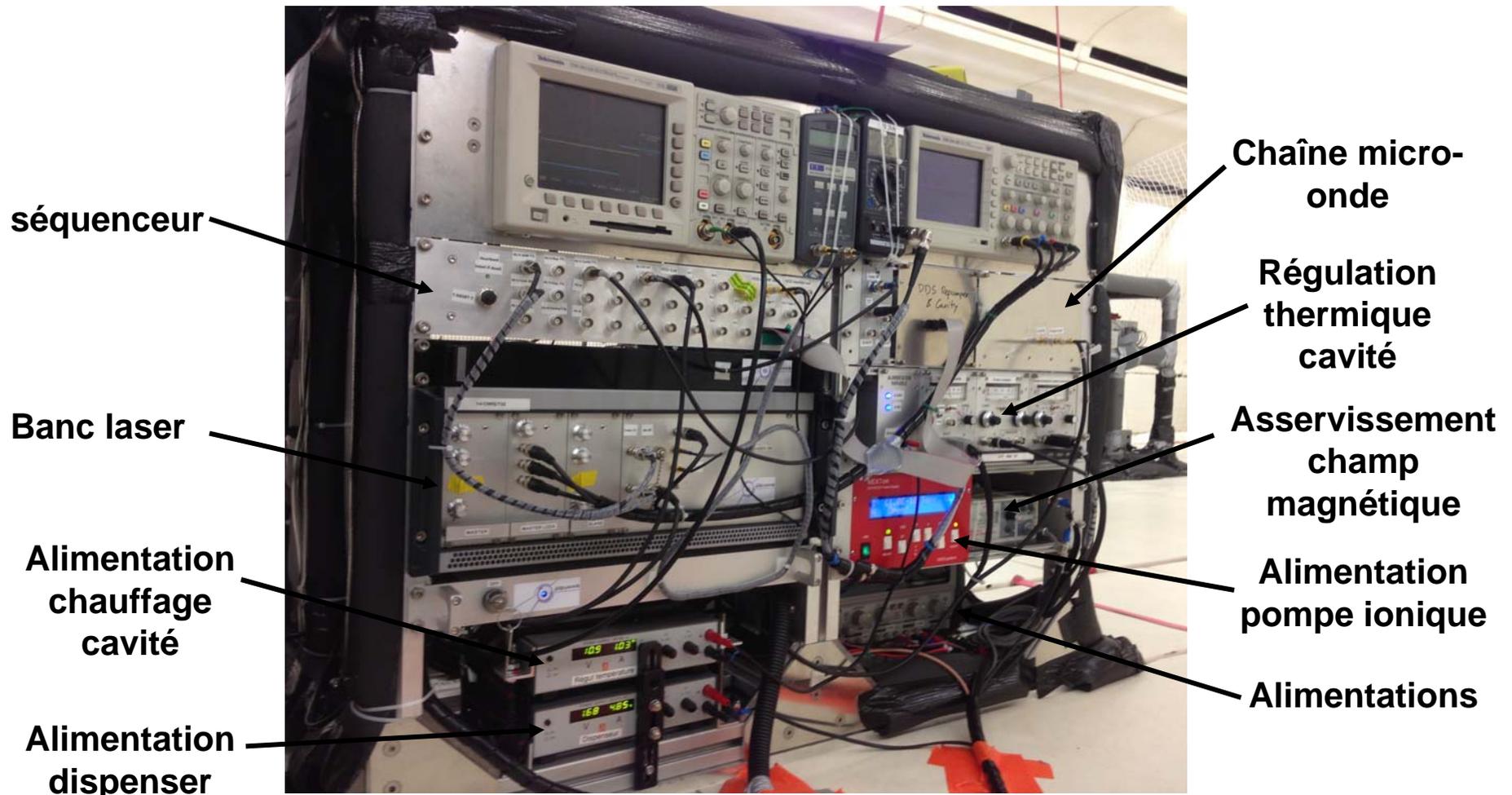


**Séquenceur développé par MuQuans
(rack 2U)**



**Chaîne micro-onde (rack 3U) – intègre
l'oscillateur local, la synthèse de
fréquence et 2 DDS pilotables
(N. Castagna, L. De Sarlo, JF Schaff et le pôle
électronique du SYRTE)**

Le démonstrateur RubiClock – bâti de contrôle



Enorme soutien des services techniques du SYRTE pour la mise au point et l'intégration de tous les sous-systèmes

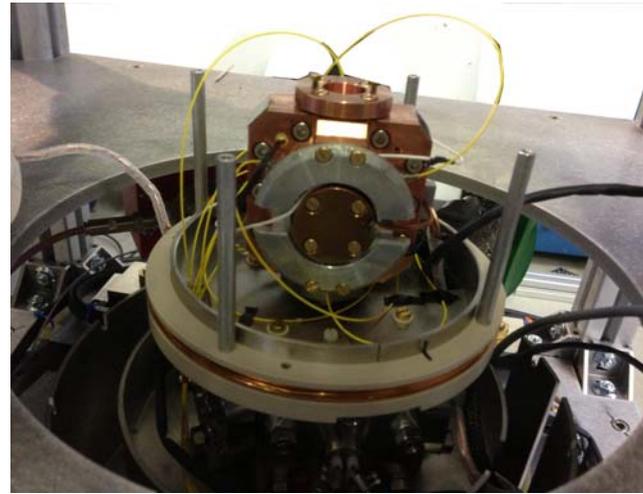
Le démonstrateur RubiClock – bâti résonateur



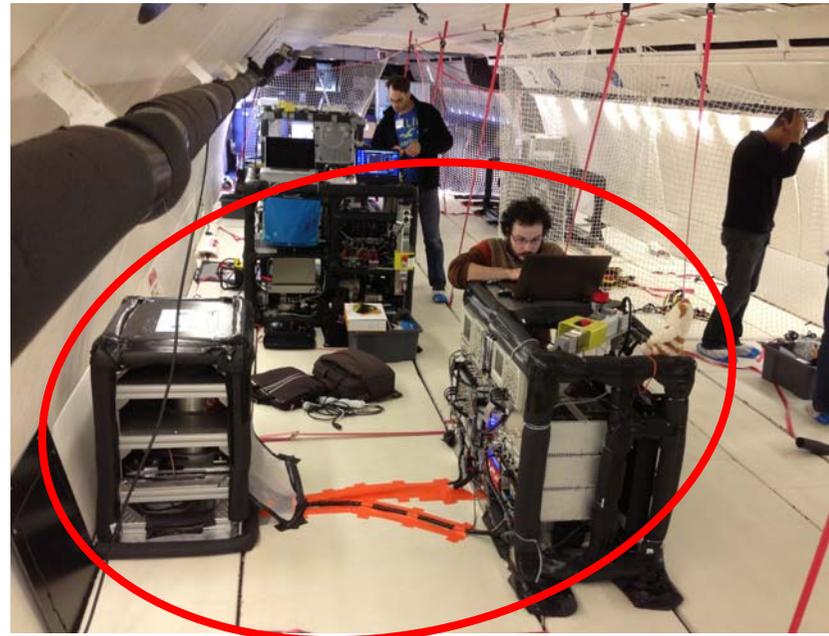
Bâti résonateur

Contraintes Novespace :
Résonateur = 26 kg
Bâti vide = 90 kg

**Expérience installée
dans l'avion**

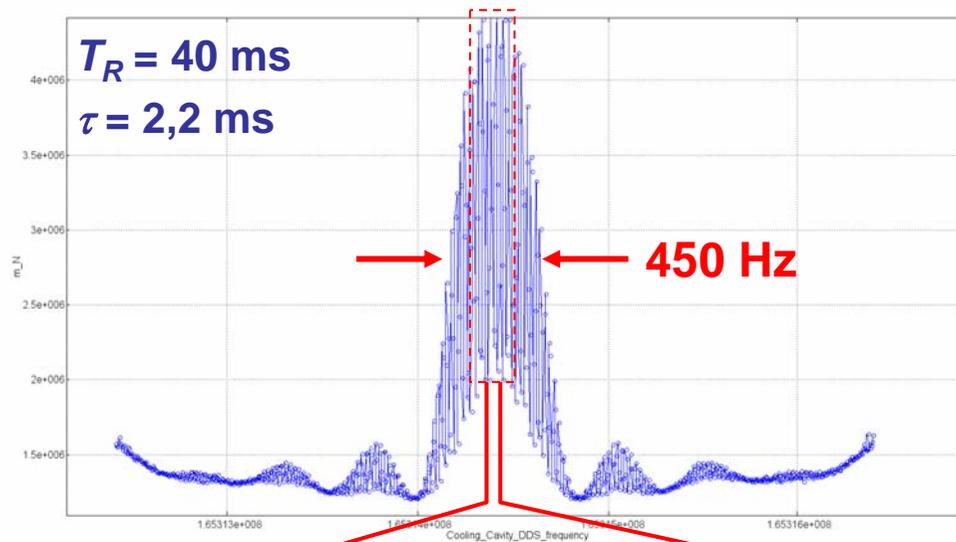


**Résonateur avec
cavité micro-onde**



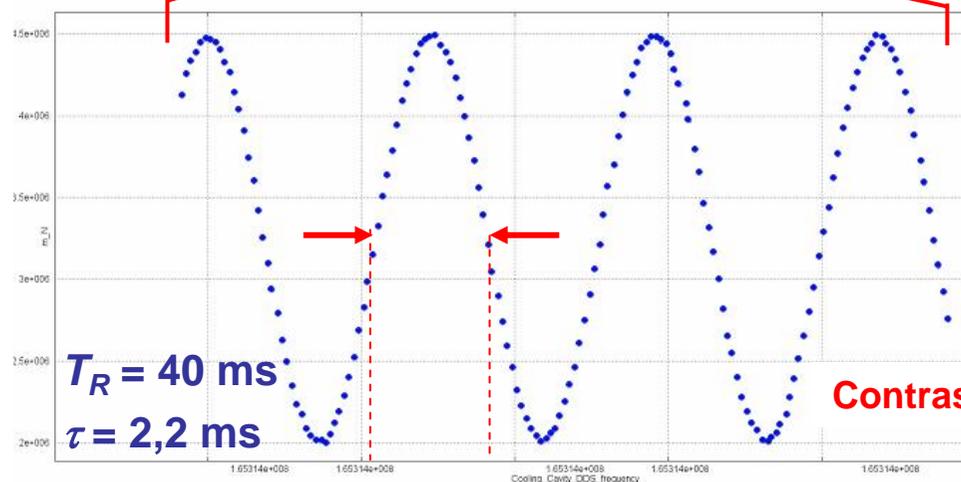
3. Résultats expérimentaux au sol

Validation au sol – Frange de Ramsey



Temps de Ramsey limité à environ 50 ms par la chute des atomes dans la cavité

Refroidissement Doppler simple (désaccord et intensité laser constants)



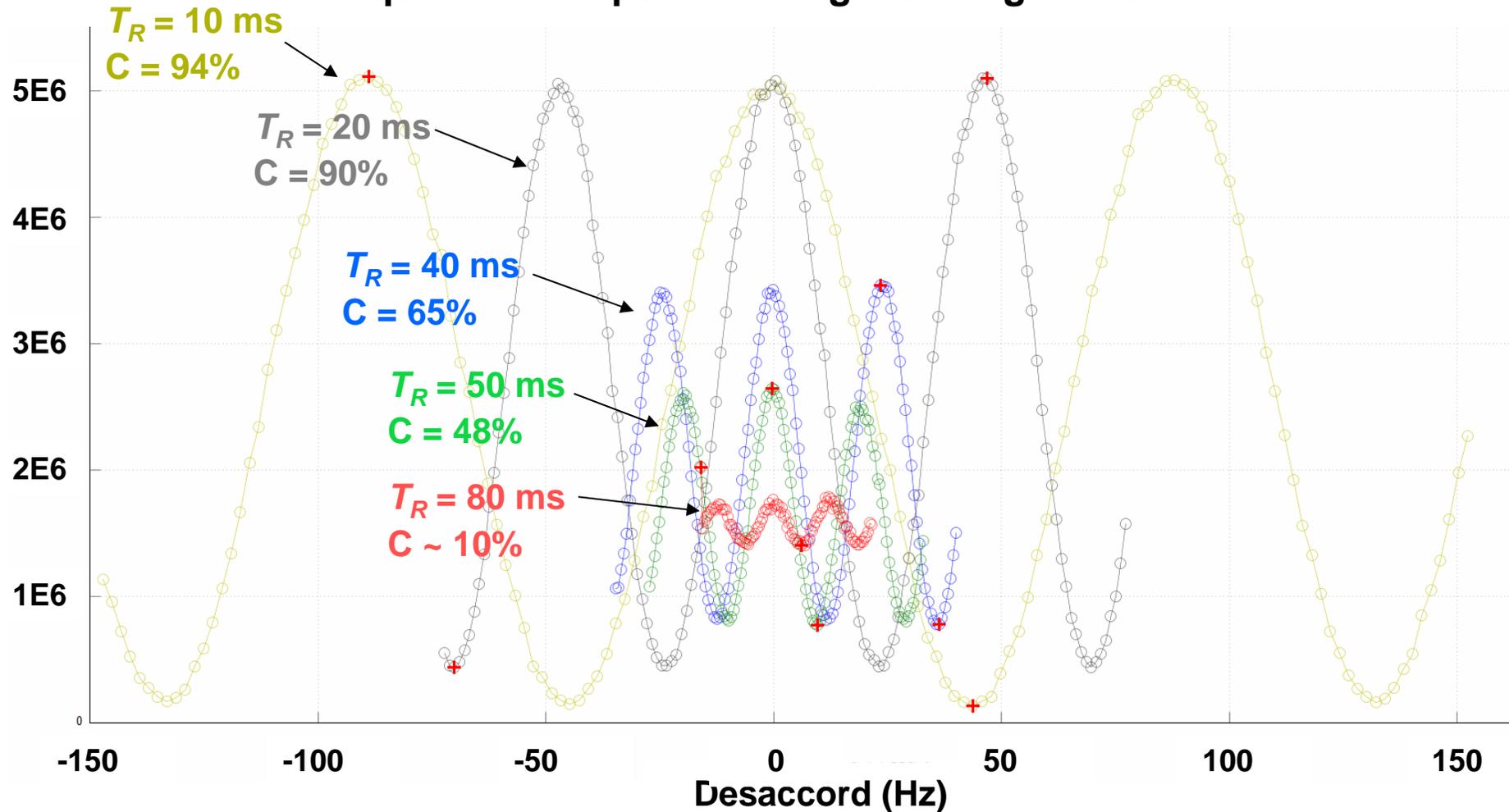
Premiers résultats obtenus en labo il y a 3 semaines

12,5 Hz

Validation au sol - Contraste



Réduction du nombre d'atomes détectés et du contraste quand le temps d'interrogation augmente



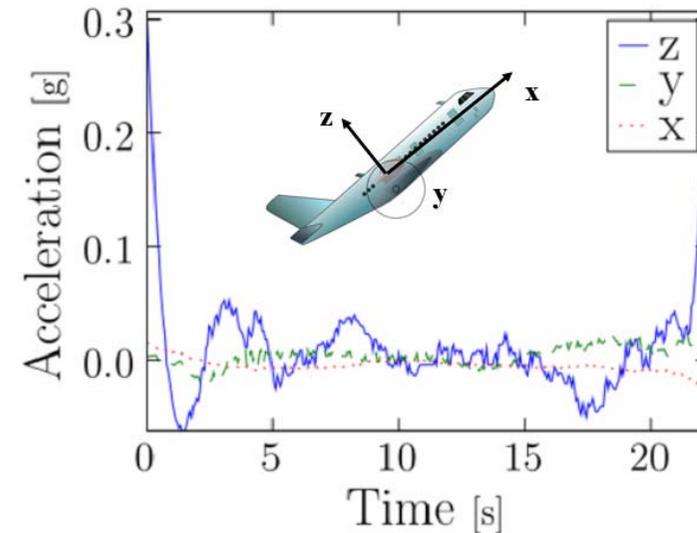
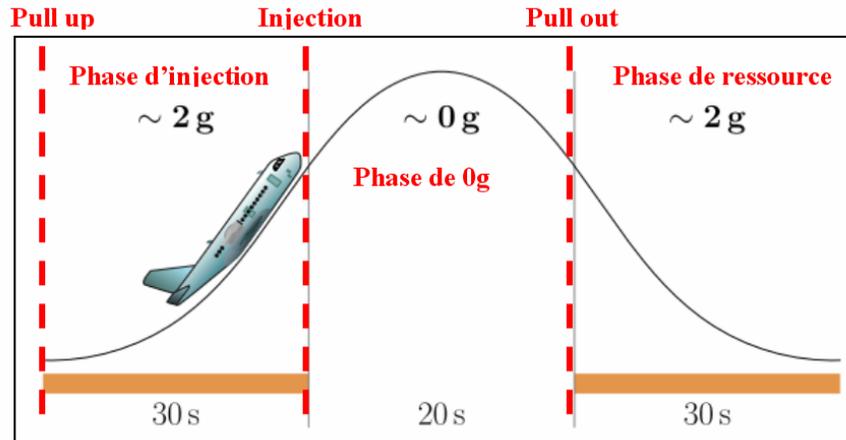
Réduction rapide du contraste pour des temps de Ramsey > 50 ms, liée à la chute des atomes dans la cavité micro-onde

4. Résultats expérimentaux dans l'avion

Conditions des mesures pendant les vols



Possibilité de faire des mesures en « 0g », en « 1g » et en « 2g »



- Environnement accélérométrique relativement perturbé ($\sim 10^{-2}$ g suivant Z)
- Environnement magnétique très variable (jusqu'à 1G de variation entre l'entrée et la sortie de la parabole)

**3 vols de 31 paraboles chacun – 20 secondes de microgravité par parabole
30 minutes de mesure, par tranche de 20s, en tout et pour tout !!**

Objectifs attendus de la campagne de vols

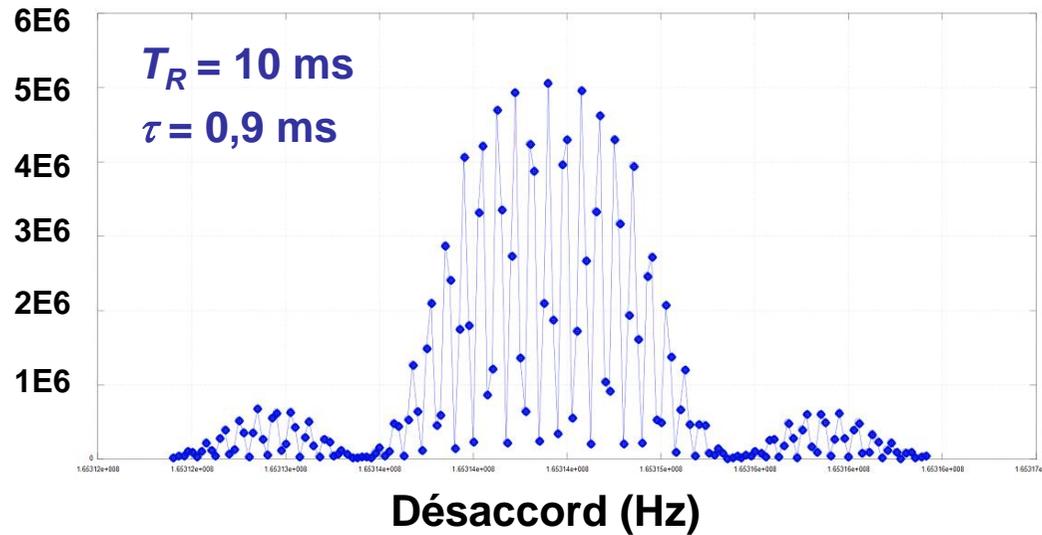


- **Valider le fonctionnement de l'horloge en environnement 0g**
- **Démontrer que la microgravité permet :**
 - **à temps de Ramsey équivalent d'avoir un nombre d'atomes et un contraste meilleur que sur terre**

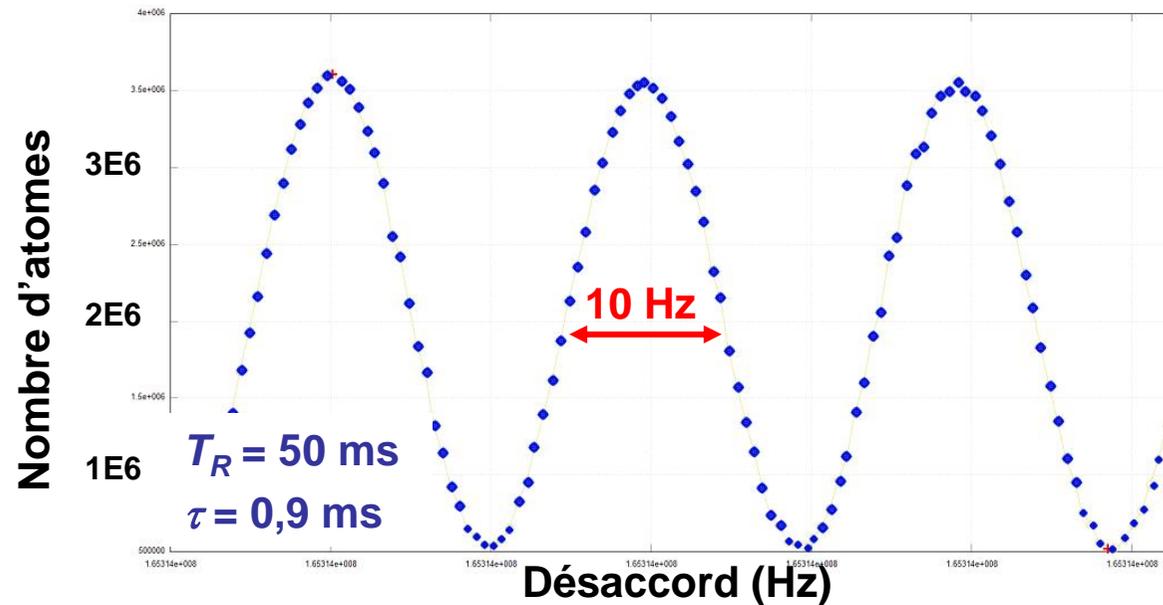
(4 fois plus d'atomes → amélioration d'un facteur 2 de la stabilité)
 - **d'accéder à des temps de Ramsey plus longs, inaccessibles sur terre**

(temps de Ramsey 2 fois plus long → amélioration d'un facteur 2 de la stabilité)
 - **d'améliorer le processus de recapture d'un cycle à l'autre**
- **Quantifier l'intérêt du refroidissement sub Doppler pour des temps de Ramsey long (réduire la perte d'atomes détectés)**
 - Sur terre : temps de Ramsey limité par la chute des atomes dans la cavité
 - En 0g : temps de Ramsey limité par la température atomique

Validation en 0g – Frange de Ramsey

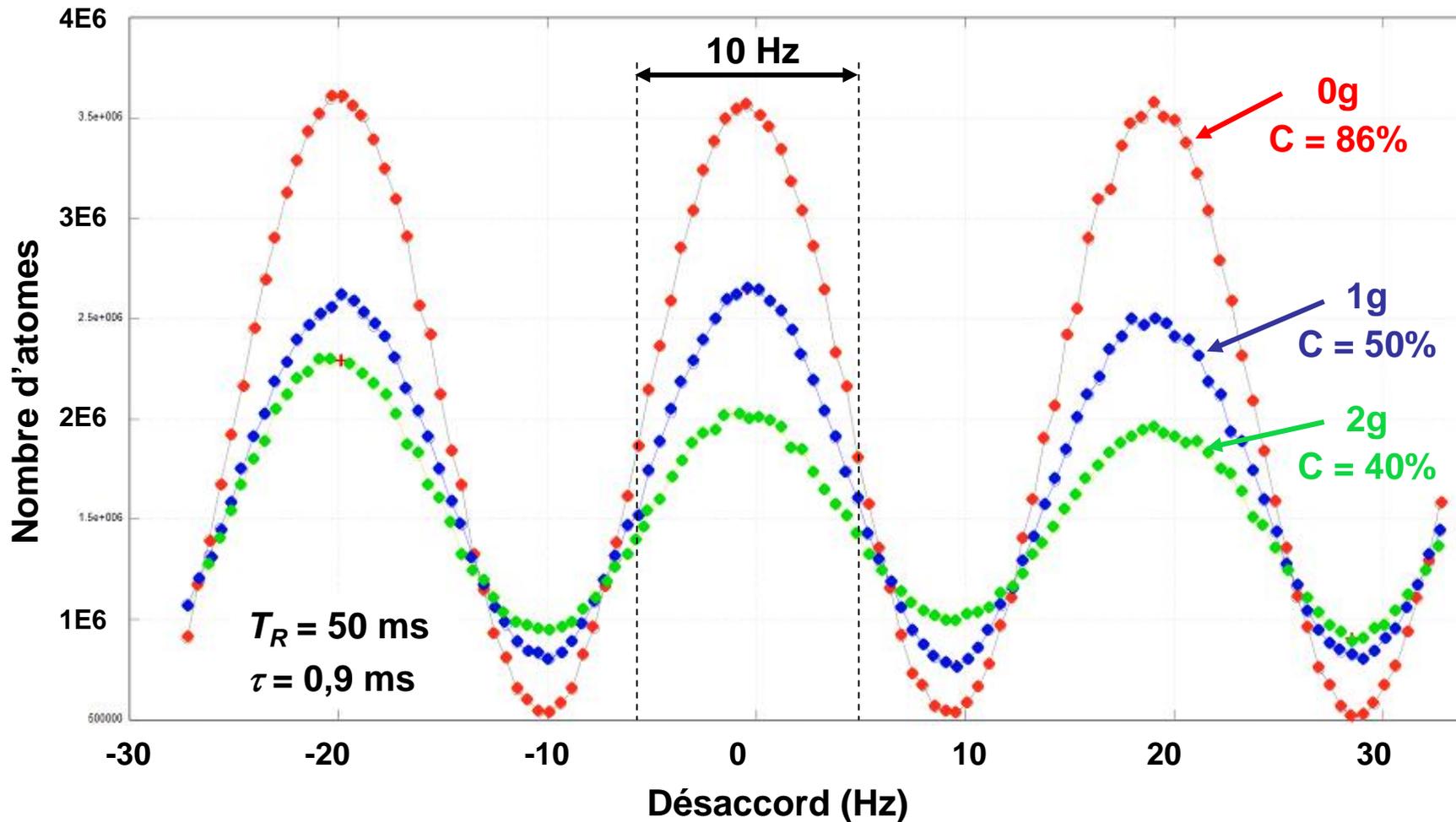


Très bon fonctionnement de l'expérience en 0g, le contraste et le rapport signal à bruit restent excellents



Validation en 0g – Contraste T_R courts

Comparaison entre « 0g », « 1g » et « 2g » pour un temps de ramsey de 50 ms

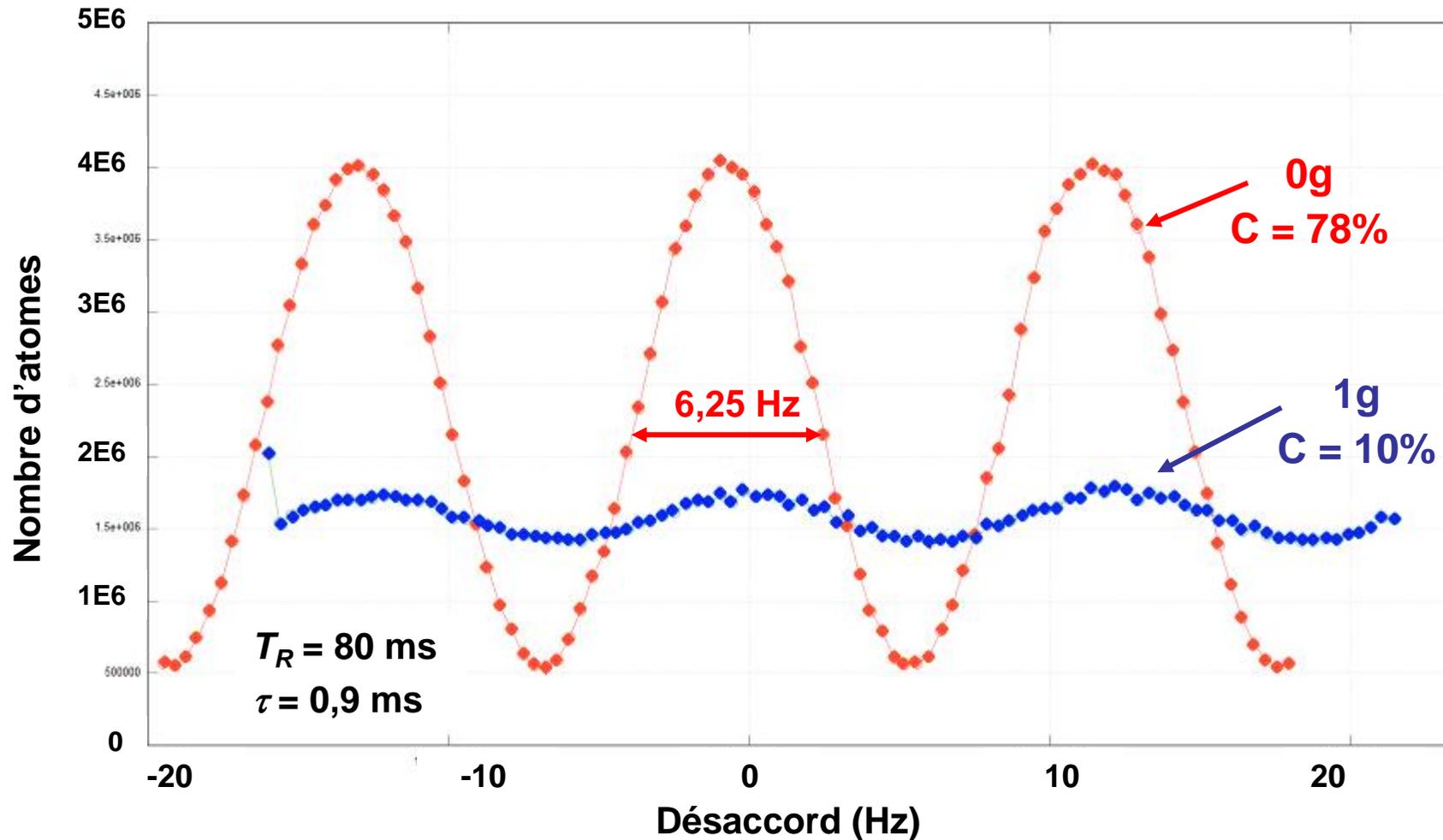


Gain d'un facteur 1,4 sur le nombre d'atomes et d'un facteur 1,7 sur le contraste pour $T_R = 50 \text{ ms}$

Validation en 0g – Contraste T_R longs

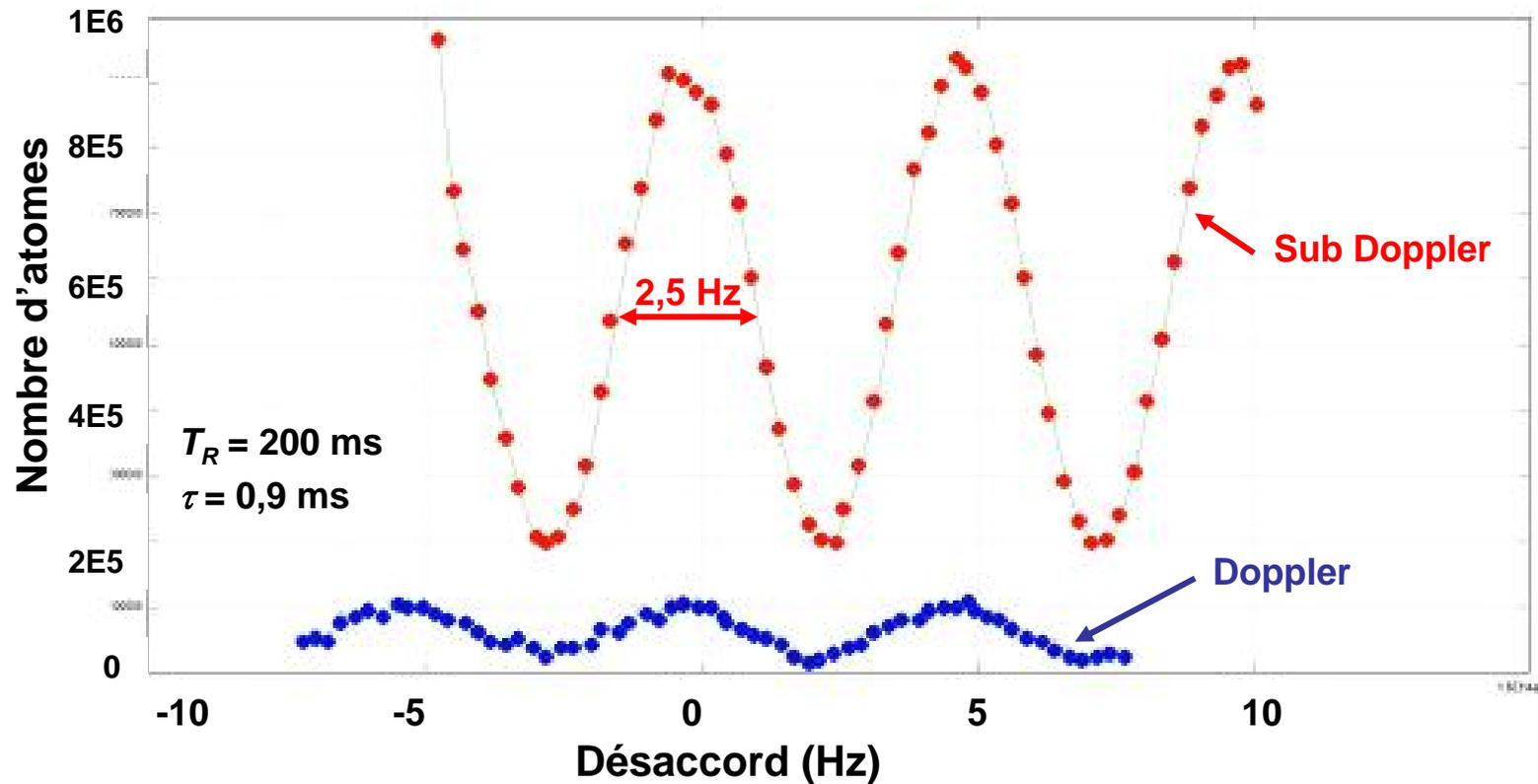


Comparaison entre « 0g » et « 1g » pour un temps de ramsey de 80 ms



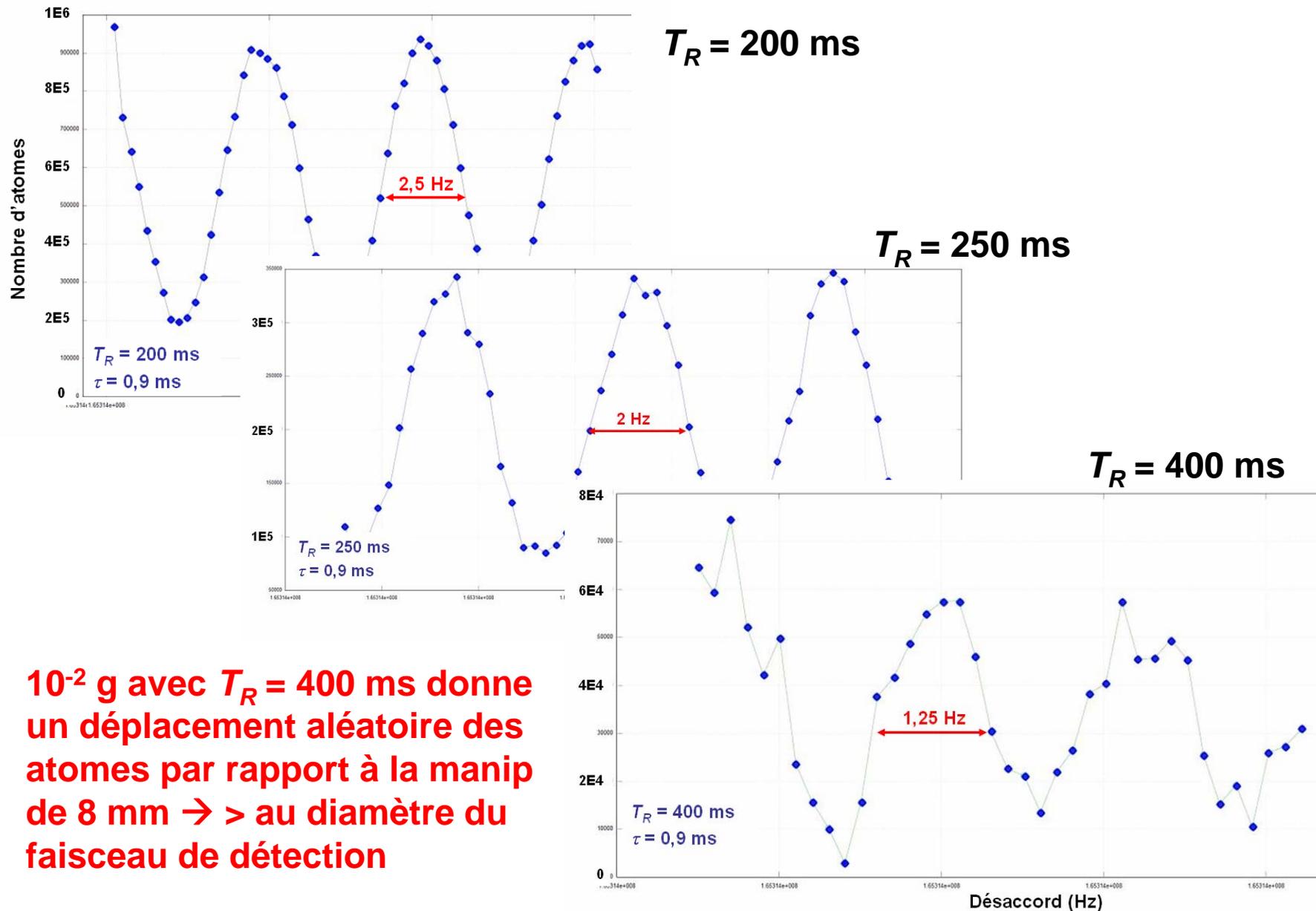
Amélioration importante du nombre d'atomes (x4) et du contraste (x8) pour des temps longs

Validation en 0g – Refroidissement sub Doppler



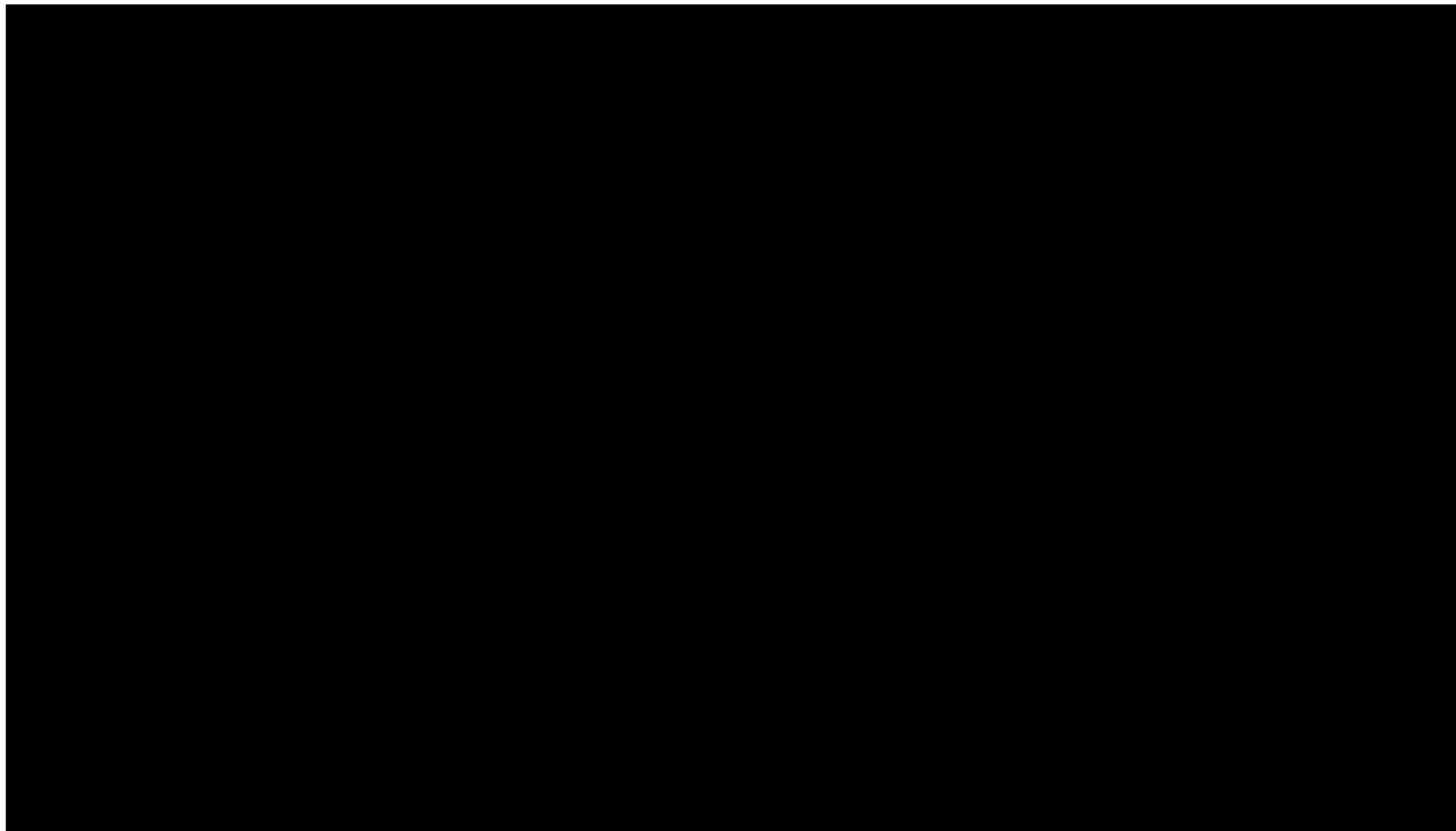
Le refroidissement sub Doppler permet de gagner un ordre de grandeur sur le nombre d'atomes pour des temps de Ramsey longs

Validation en 0g – T_R très longs



10^{-2} g avec $T_R = 400$ ms donne un déplacement aléatoire des atomes par rapport à la manip de 8 mm \rightarrow $>$ au diamètre du faisceau de détection

Première parabole de RubiClock



Traitement des données de vols :

- Evaluer l'amélioration apportée par la microgravité sur le processus de recapture
- Estimer le bruit lié à la dépendance accélérométrique du quartz sur les données

Prochaine campagne de vol prévue en octobre 2014

- Optimisation du refroidissement sub Doppler et mesure de température atomique par vélocimétrie Raman
- Déterminer le meilleur compromis T_R , nombre d'atomes
- Mesures intensives de bruits pour estimer une stabilité à 1s

Travail sur le démonstrateur « sol » :

évaluation de la stabilité court terme et des effets systématiques

Objectifs visés : $\sim 10^{-13} \tau^{-1/2}$ et 10^{-15} à la journée

Remerciements



A l'ensemble des pôles techniques du SYRTE ...



M. Lours



L. Volodimer



J. Pinto



L. Amand

Et à son directeur



N. Dimarcq



B. Venon



F. Cornu



J.-P. Aoustin



S. Ravily



L. Pelay

Toute l'équipe MuQuanS



B. Desruelle



Au CNES et à son soutien depuis 15 ans



J. Delporte



F.-X. Esnault



Ph. Guillemot

Tous ces résultats sont aussi les leurs !

Luigi De Sarlo
Mehdi Langlois

Simon Bernon
Jean- François Schaff

Jérôme Delporte
François-Xavier Esnault
Philippe Guillemot

