

PHARAO dans ACES à bord de l'ISS



PHARAO team:

Ph. Laurent (LTE)

F.X. Esnault (CNES)

D. Massonnet (CNES)

Ch. Salomon (LKB)

K.Gibble (Penn State)



Support from CNES, CNRS, ENS, ESA, First TF, NASA, LNE, LTE, OP,
Penn State & SU

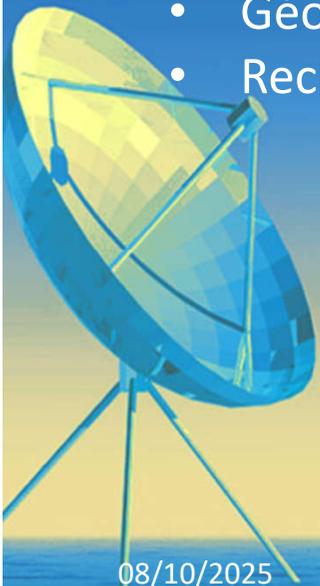


Les objectifs de ACES



Métrologie fondamentale basée sur des comparaisons d'horloges dans des référentiels différents (potentiel gravitationnel, position, vitesse): terre-espace avec une exactitude de fréquence de $\sim 10^{-16,-17}$.

- Tests de relativité générale (« redshift »)
- Stabilité des constantes fondamentales
- Géodésie relativiste (10 cm)
- Recherche sur la matière noire: effets différentiels entre horloges



10 mars 2025,
Arrivée de ACES à cap Kennedy



08/10/2025



21 avril 2025,
Lancement par la fusée Falcon 9 (spaceX)

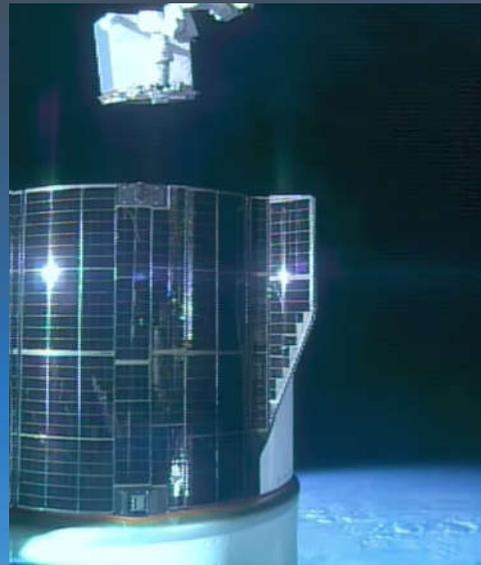
FirstTF ACES 2025

PhL

22 avril, amarrage
du module dragon à l'ISS



25 avril, le bras robotisé transporte ACES vers son
emplacement définitif:

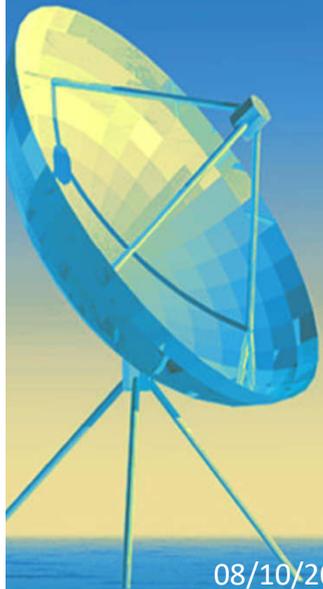


un balcon du module columbus



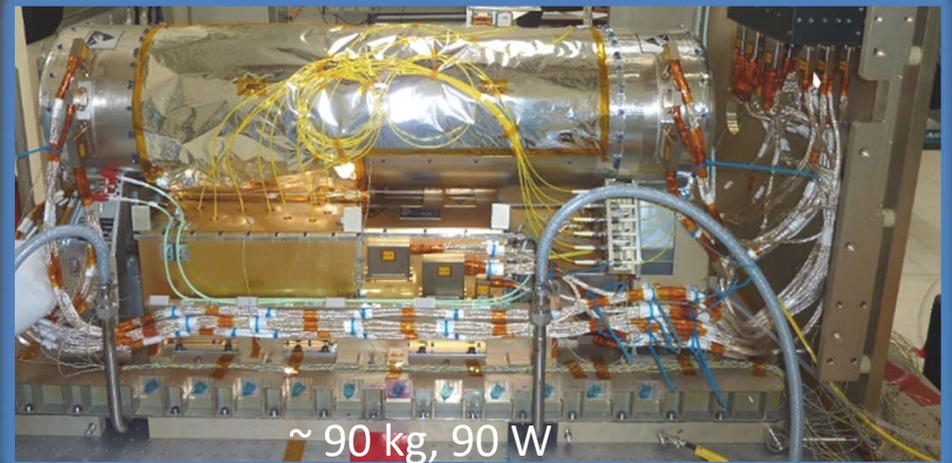
Le 28 avril, la mise en route...

NASA pictures

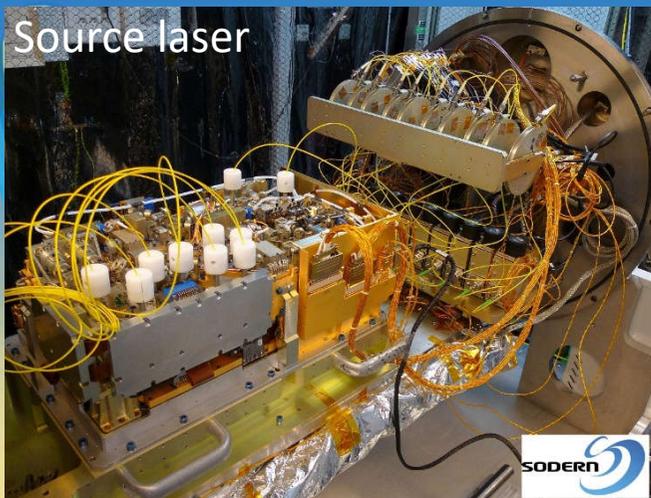


PHARAO

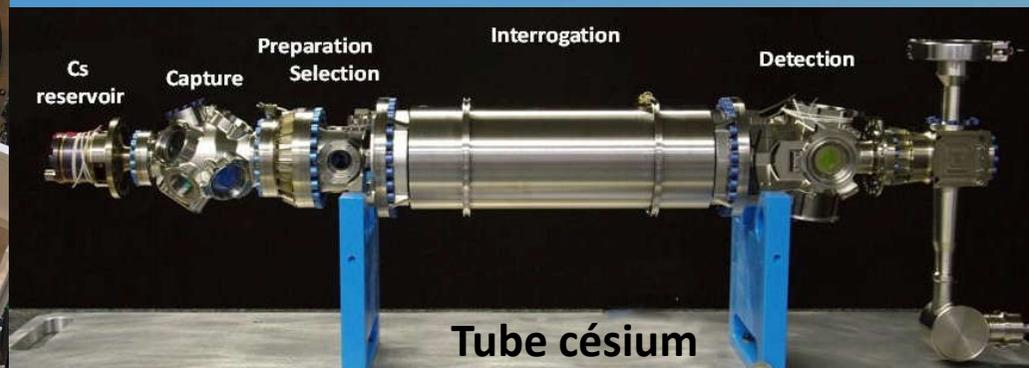
Le premier étalon primaire dans l'espace



- Utilise le refroidissement laser pour fournir un nuage d'atomes froids de césium: Réduire de façon drastique la plupart des effets systématiques qui déplacent la résonance atomique définie à 9192631770 Hz.



Fournit 10 faisceaux laser au tube césium : capture, selection, detection

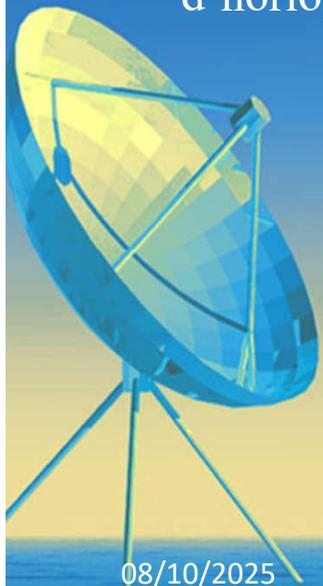


PHARAO

- La source hyperfréquence fournit 2 signaux 9.2 GHz accordables, cavité de préparation et cavité d'interrogation, générés par la multiplication de fréquence d'un oscillateur à quartz faible bruit.
- Ordinateur, UGB, (20MHz)&Logiciel de vol: 50000 lignes, 350 sequences, ~1000 tables de μ commande pour cadencer le cycle d'horloge.



EREMS, Cs-Si



Centre de contrôle ACES: CADMOS (CNES, Toulouse)



- 5 opérateurs (TM/TC)
- 7 contrôleurs (24/24, 7/7)
- 4 développeurs

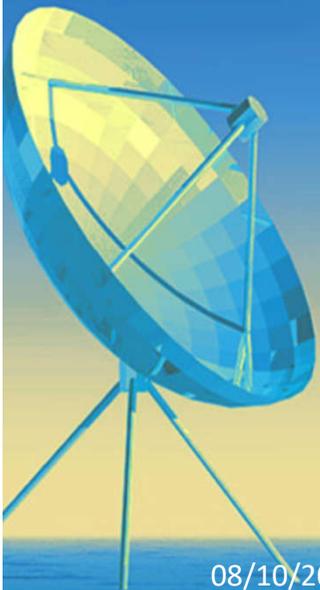
Pour piloter l'ensemble
des instruments ACES

Le 28 avril, la mise en route...



Préchauffage de ACES: température initiale -10°C
Doit remonter à $+10^{\circ}\text{C}$ pour allumer les instruments

2 jours plus tard, les $+10^{\circ}\text{C}$ sont enfin atteints...



08/10/2025

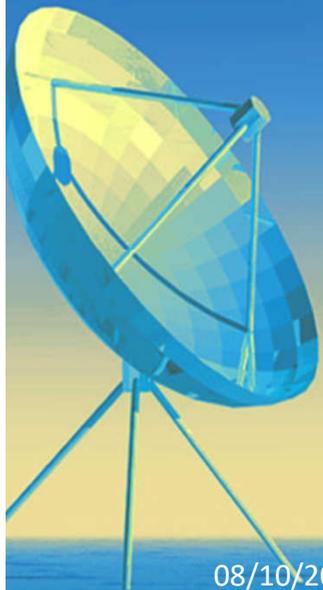
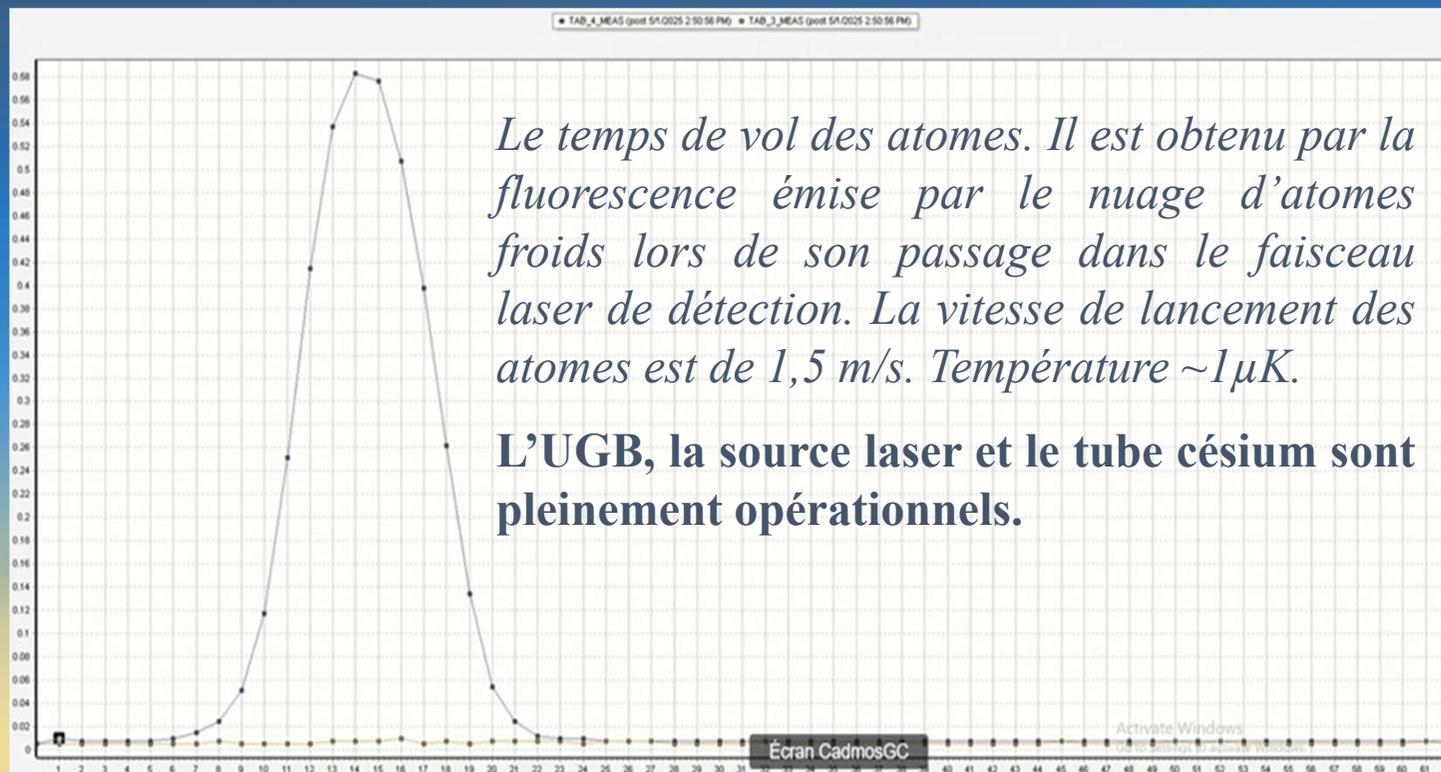
FirstTF ACES 2025

PhL

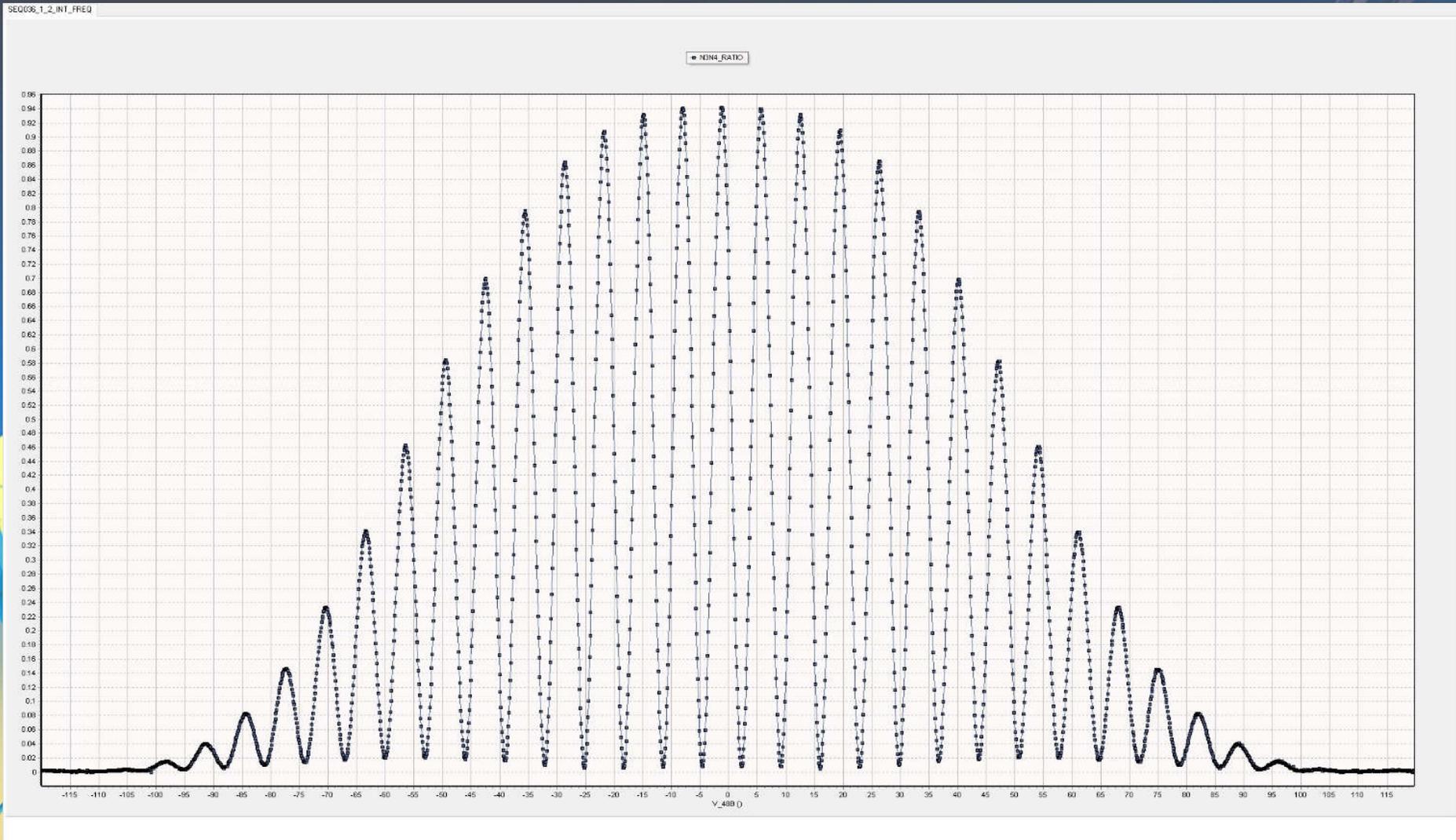
Le 1^{er} Mai, à 16h 37' 21s



Les premiers atomes froids de césium, de l'espace, sont détectés



Et avec la source hyperfréquence, le premier signal d'horloge:
Les franges de Ramsey ($V=1525$ mm/s, $\Delta v=3.47$ Hz, $S/B \sim 1000$)

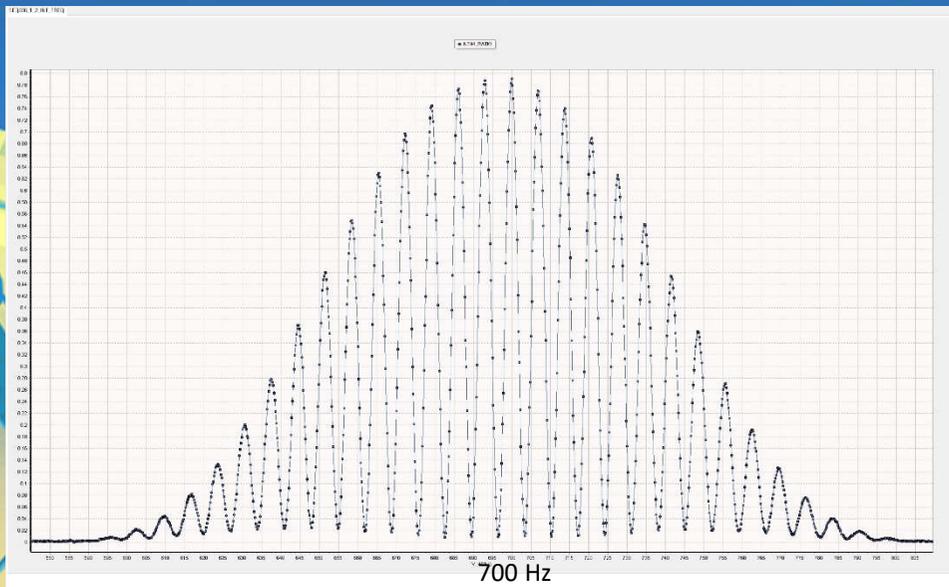


Début de la Caractérisation des performances PHARAO



Le champ magnétique, responsable du plus grand déplacement de fréquence:

- Effet Zeeman du second ordre.
 - Mesure de l'homogénéité le long de la trajectoire des atomes et correction des courants de 7 bobines de champ magnétique.
 - Vérification par les franges Ramsey sur la résonance hyperfine entre états Zeeman $m=1$, 1 000 000 plus sensible que la résonance d'horloge ($m=0$).



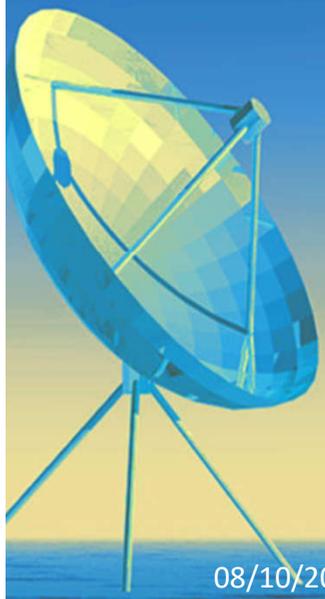
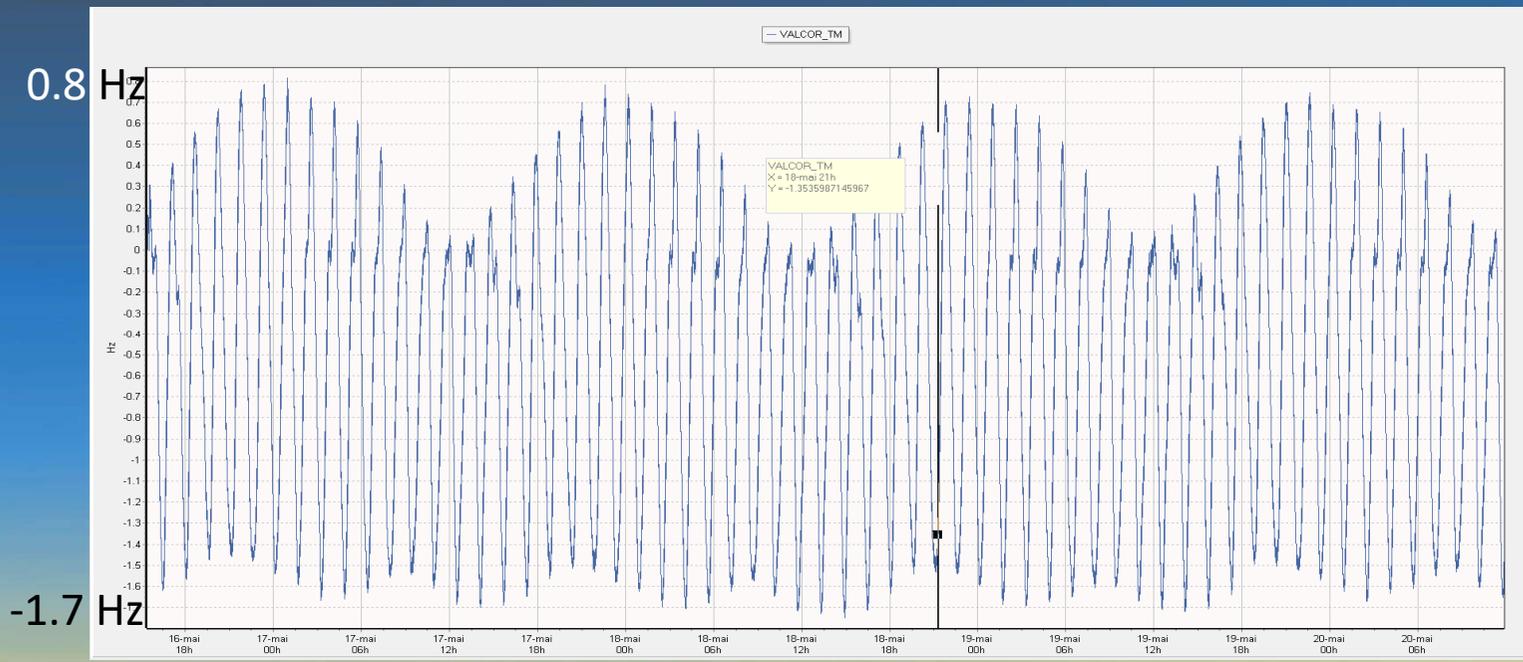
- Excellent contraste et symétrie des franges: Champ magnétique homogène le long de la trajectoire atomique.
- Fréquence centrale 700 Hz
- La fréquence d'horloge ($m=0$) est donc déplacée de 4.3×10^{-14}

Stabilité du champ magnétique: sur une orbite le champ terrestre varie sur $\sim 45\mu\text{T}$ (90 Hz sur la fréquence d'horloge)



- Tube césium: 3 blindages magnétiques et une compensation active (sonde + solénoïde) atténuation de $\sim 200\,000$.

Asservissement de fréquence sur la résonance $m=1$



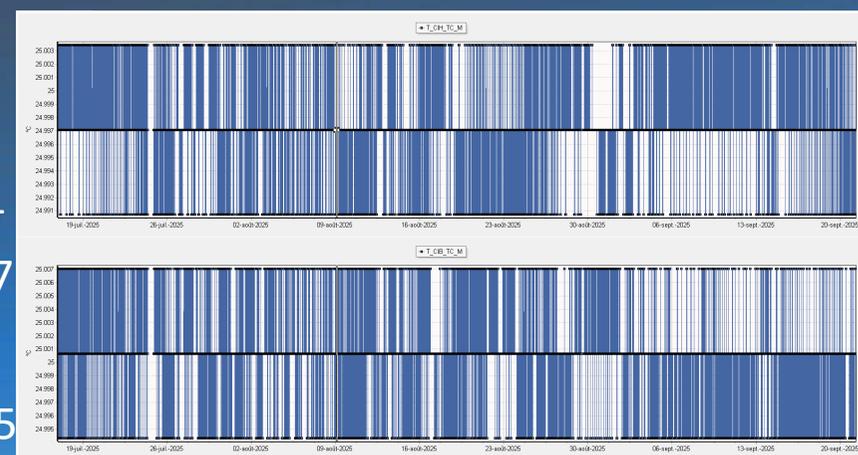
Pour la fréquence d'horloge $\sim 2 \times 10^{16}$, avec corrélation des données de la sonde, incertitude $\sim 10^{-17}$



Deuxième déplacement de fréquence important: le rayonnement du corps noir. Déterminé par la température de la cavité de Ramsey.

Cette température est régulée à qqes mK et mesurée par 2 sondes étalonnées.

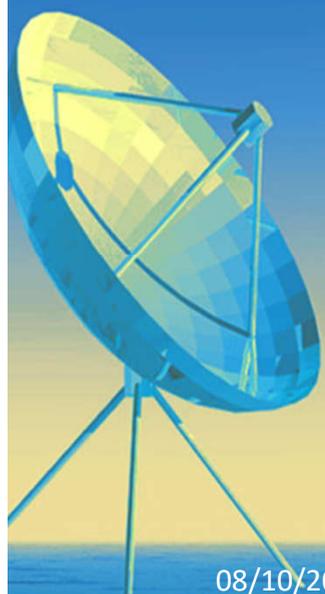
25,003
24,991
25,007
24,995



Juillet

Septembre

Déplacement $\Delta\nu = -1,69 \times 10^{-14}$
Incertitude 7×10^{-17}

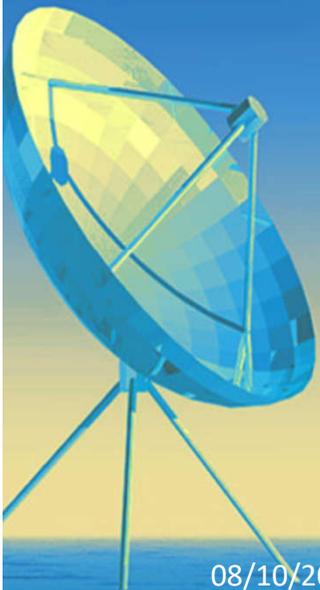


Reste à déterminer les collisions et l'effet Doppler lié au gradient de phase du champ micro-onde dans la cavité (DCP)

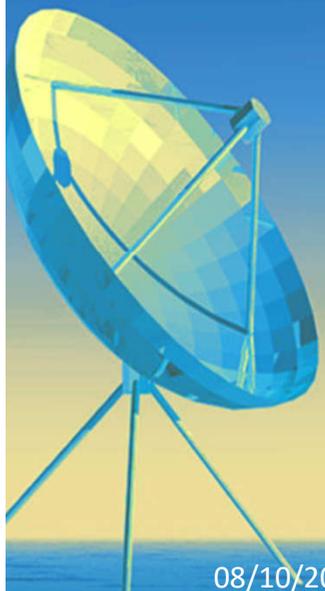
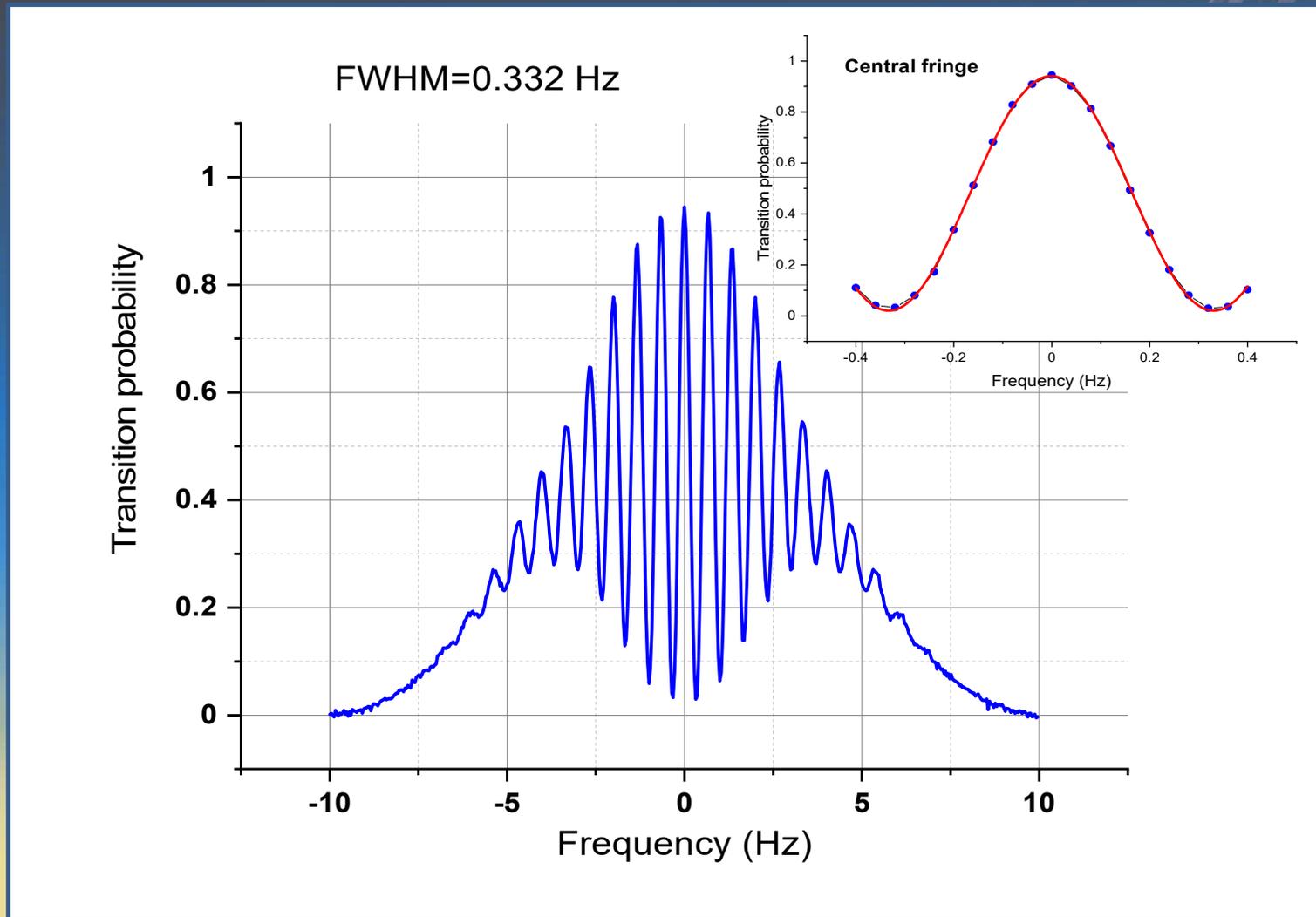


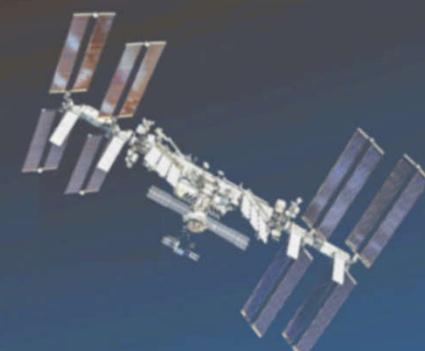
L'avantage de la microgravité est que l'on peut changer la vitesse de lancement des atomes sur plus d'un ordre de grandeur

Nous avons analysé les vitesses à 1525, 639.6, 393.6, 246, 196.8, 147.6 et 98.4 mm/s



La frange de Ramsey la plus étroite jamais observée, et en plus avec un bon rapport signal à bruit ($V=147\text{mm/s}$)

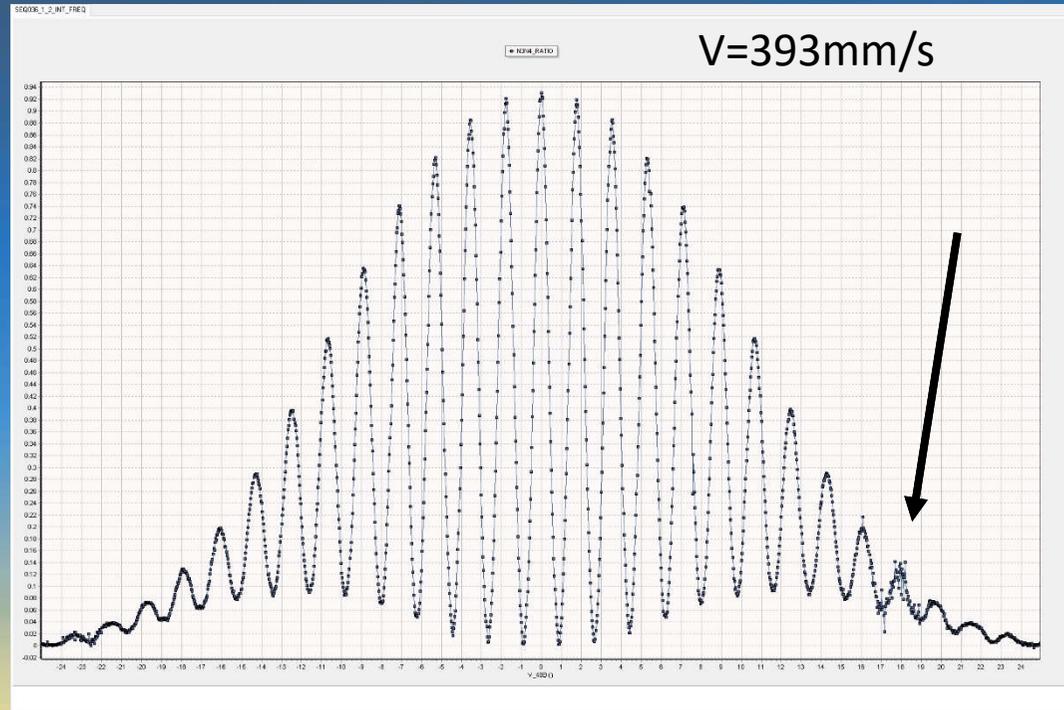
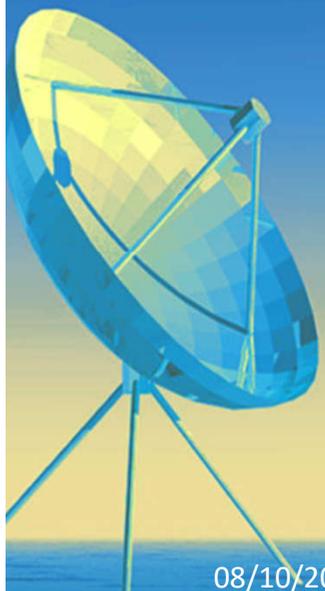




Quelques problèmes:

L'anomalie magnétique de l'atlantique sud: + de radiations

- Pics sur signal de détection
 - Correction logiciel en cours pour filtrer
- Sauts de fréquence de l'oscillateur à quartz (2×10^{-12})
 - A priori faible conséquence lorsque le quartz est asservi en mode horloge



Gros problème: le maser à hydrogène ne fonctionne toujours pas!



Ses rôles:

1. Référence stable de fréquence pour évaluer les effets systématiques (collision et DCP).
2. Asservir l'oscillateur à quartz PHARAO et réduire son bruit aux faibles vitesses de lancement

Conséquences:

- la stabilité de fréquence de PHARAO est dégradée estimée entre 1.7 et $5 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ selon la vitesse de lancement (un facteur 1.5 à 3 supérieur aux prédictions)
- l'évaluation de l'exactitude va donc uniquement reposer sur les comparaisons bord/sol.

Pour mesurer l'exactitude à 10^{-16} , il faudra donc beaucoup plus de temps de mesure, à définir lorsque les comparaisons bord-sol seront pleinement opérationnels



