La mission spatiale ACES (ESA)



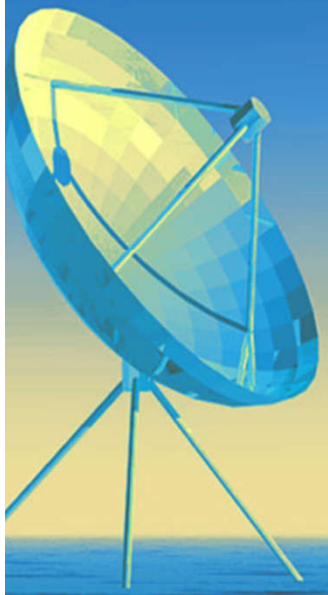
Repose sur des comparaisons de temps entre des horloges au sol et une horloge spatiale

qui est, pour la première fois,

un étalon primaire de fréquence

PHARAO (LTE, LKB, CNES)

Horloge à atomes de césium refroidis par laser



Supports: CNES, CNRS, ENS, ESA, First TF, NASA, LNE, LTE, OP, Penn State & SU



Chronologie

1993 — Début du projet PHARAO

1997 — Succès du Test en vol parabolique de notre prototype

1998 — Début de ACES

2001 — Développement industriel et qualifications: MI & MV

2014 — Livraison de PHARAO à l'ESA

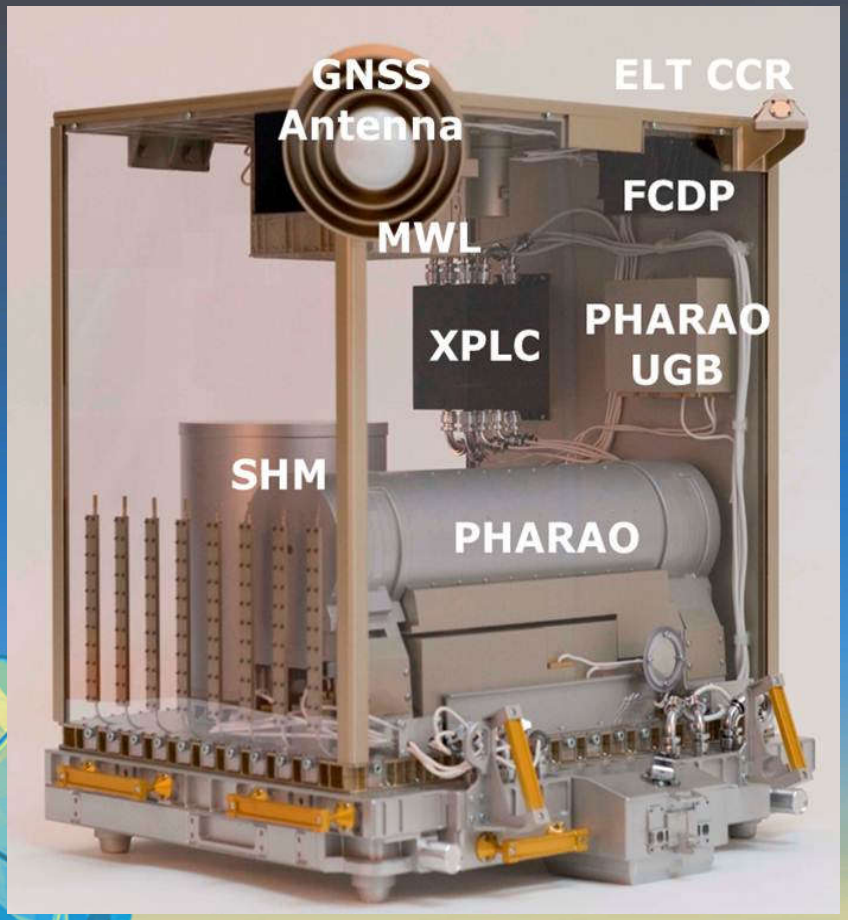
2024 — Intégration & tests ACES (difficultés sur les autres instruments

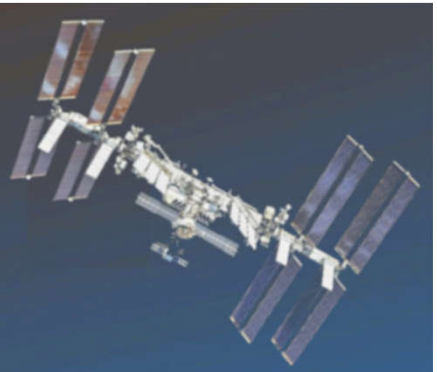
2025 — Lancement à Cap Kennedy



PhL

A bord de l'ISS:





PHARAO: PFS
SHM: Active hydrogen maser
UGB: PHARAO computer
XPLC: ACES computer
MWL: MicroWave Link
FCDP: Freq. Comp. & Distrib. Package
ELT: Europea laser timing
CCR: Corner Cube &Receptor
GNSS: GALILEO, GPS

TM/TC: de Toulouse à l'ISS

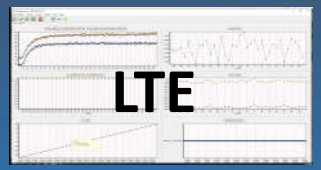
Operateurs : prépare procédures
+ envoie télécommandes
+ coordination avec Col. CC
Controleurs : monitoring 18/7



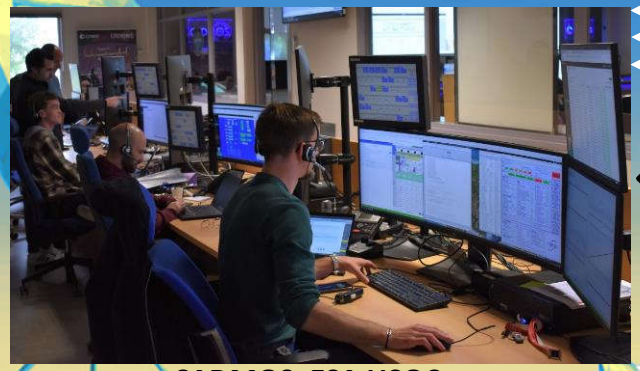
ISS ESA Columbus Module



NASA TDRS GEO satellites







CADMOS, ESA USOC
CNES, Toulouse, FR



Columbus Control Centre
ESA-DLR, Oberpfaffenhoffen, GER



ISS Control Centre
NASA, Houston, USA



NASA Ground Stations
White Sands & Guam, USA

Stations sol

en operation: JPL, LTE,NPL,PTB, NICT (rec.), NIST

Installation: GOW (octobre)



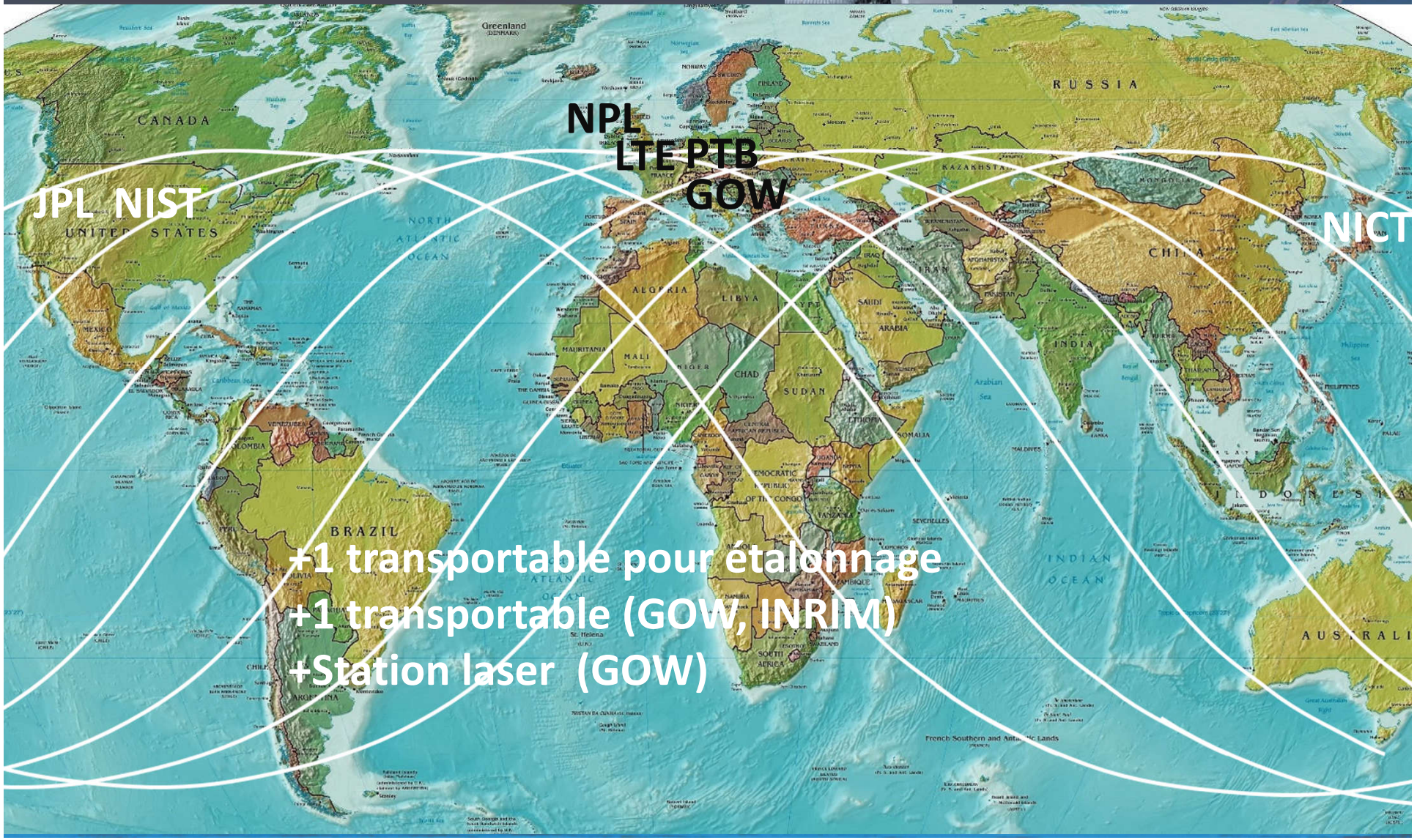
400 km

V~7km/s

Période 90



Passage durée~6’



Objectifs Scientifiques

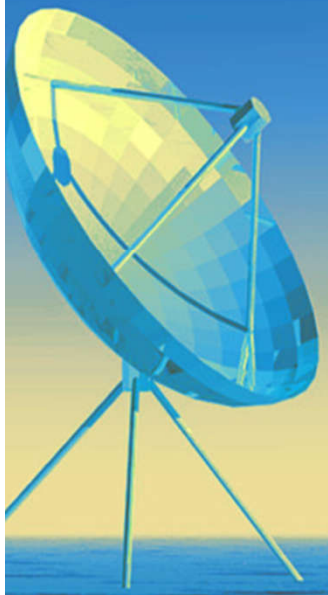


Métrologie fondamentale en temps/fréquence

$\delta t/t$, $\delta \nu/\nu$ à 10^{-16}-10^{-17}

- La physique d'un étalon primaire à atomes froids dans l'espace

1. Mesure du Déplacement Gravitationel:
   - Validité de la R.G. Einstein
   - Géodesie relativiste
2. Stabilité des constantes fondamentales
3. Recherche effets matière noire.
4. Contribution à la redéfinition de la seconde.





PhL

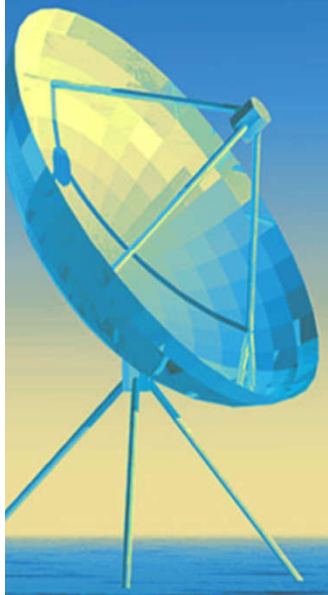
Bilan après 18 mois dans l'espace



PhL



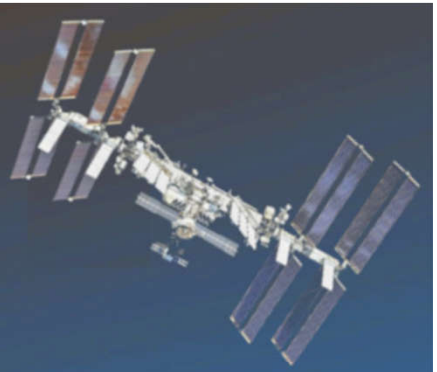
- ✓ PHARAO fonctionne continument et pilote l'échelle de temps bord.
- ✓ Comparaisons MWL:
  - avec FO2 (LTE) Oct. 2025
  - NPL et JPL (maser H) Déc. 2025
  - PTB CSF2 juin 2026.





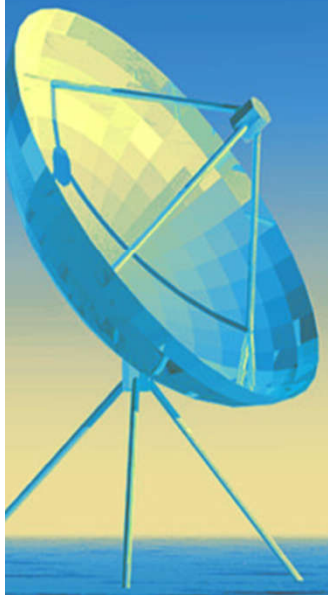
PhL

PHARAO: Evaluation des effets systématiques



à bord:

- Effet Zeeman du second ordre (incert. 2-6x10^{-17})
- Effet rayonnement du corps noir (incert.7x10^{-17})
- Effet de recul (incert.~4x10^{-17})
- Déplacements lumineux (0) à vérifier





PhL

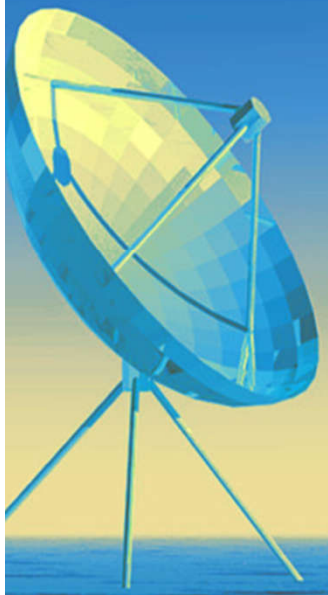
PHARAO: Evaluation des effets systématiques



Comparaisons: PHARAO/FO2 Cs-Rb pour déterminer les collisions et l'effet Doppler (effet de phase de la cavité et transitoires de phase).

Les vitesses de lancement des atomes suivantes ont été mesurées :
1525,885, 640, 393, 247 mm/s en haute et basse densité. Stabilité (2-4x10^{-13}@1s)

- Repose sur la stabilité long terme (mois) de FO2 Cs-Rb: comparaisons Cs/Rb et avec les autres horloges via la circulaire T et via ACES (PTB, NIST)

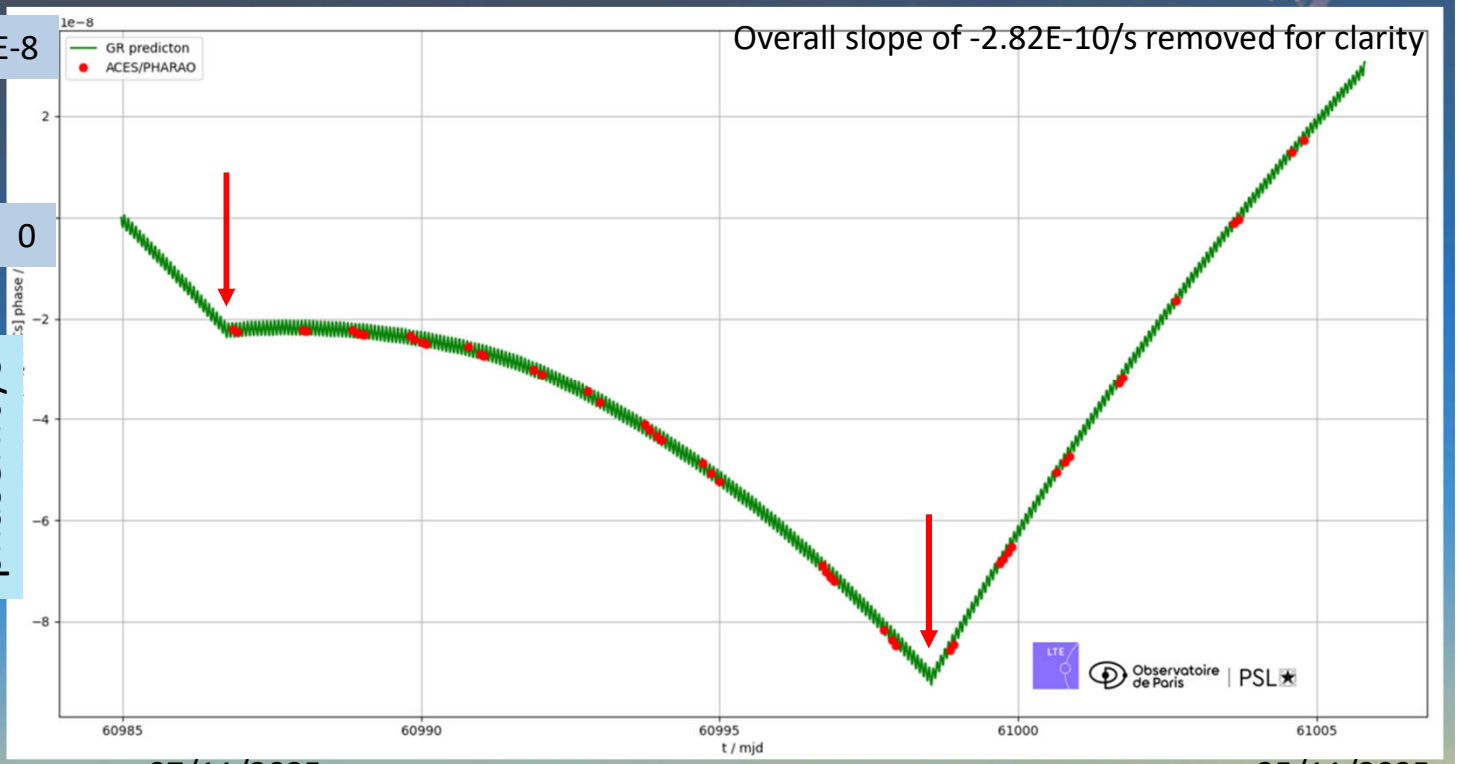


Extrapolation à 0 densité (linéaire) et à vitesse nulle (quadratique)
Analyse en cours: exactitude <10^{-15}

Vers le test du redshift: PHARAO-FO2 Cesium au LTE

ISS Orbitographie par DLR
+model geopotential de la terre
GR prediction en vert

PHARAO: frequence corrigée des effets systématiques en rouge

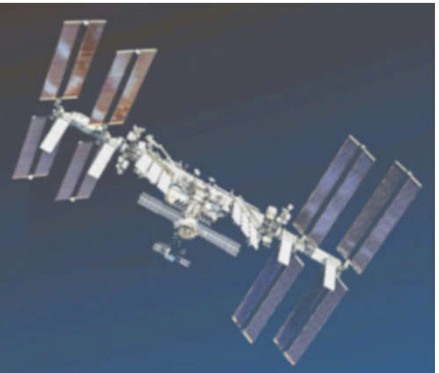


07/11/2025

25/11/2025

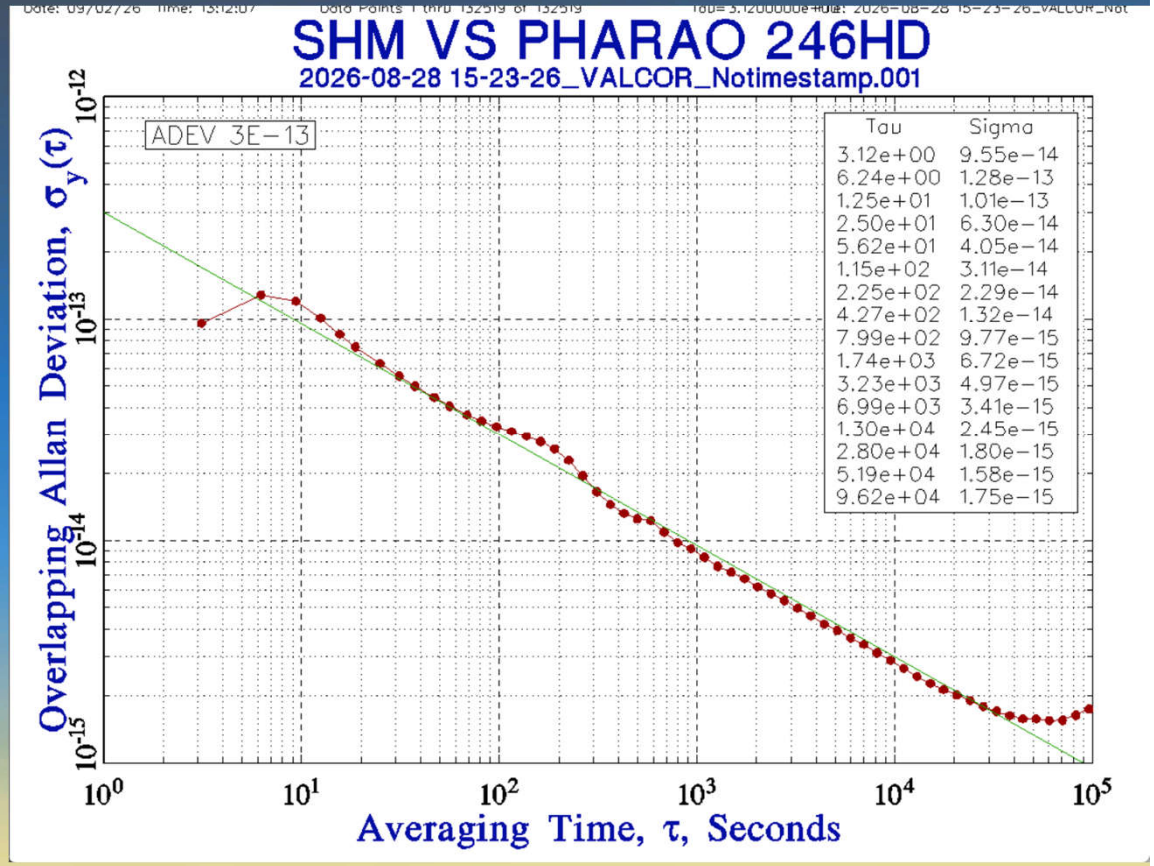
Pas de désaccord sur la RG à 10^{-15}

Le maser à hydrogène, SHM, est en fonctionnement depuis 2 mois!



- Stabilité de fréquence < $2x10^{-13}$@1s
- Pas de modulation orbitale!

➢ Maintenant, l'évaluation de PHARAO ne dépend plus des comparaisons bord/sol: Gain de temps.



Détection,à bord ,des premiers pulses laser (1mois)

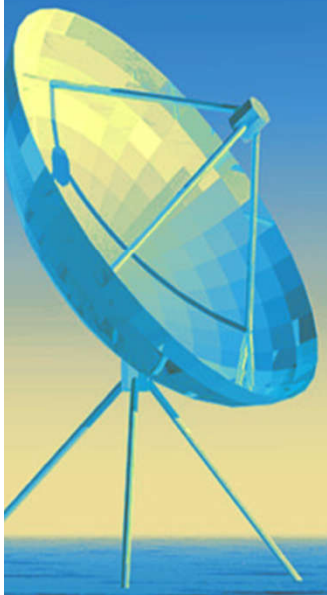
PhL

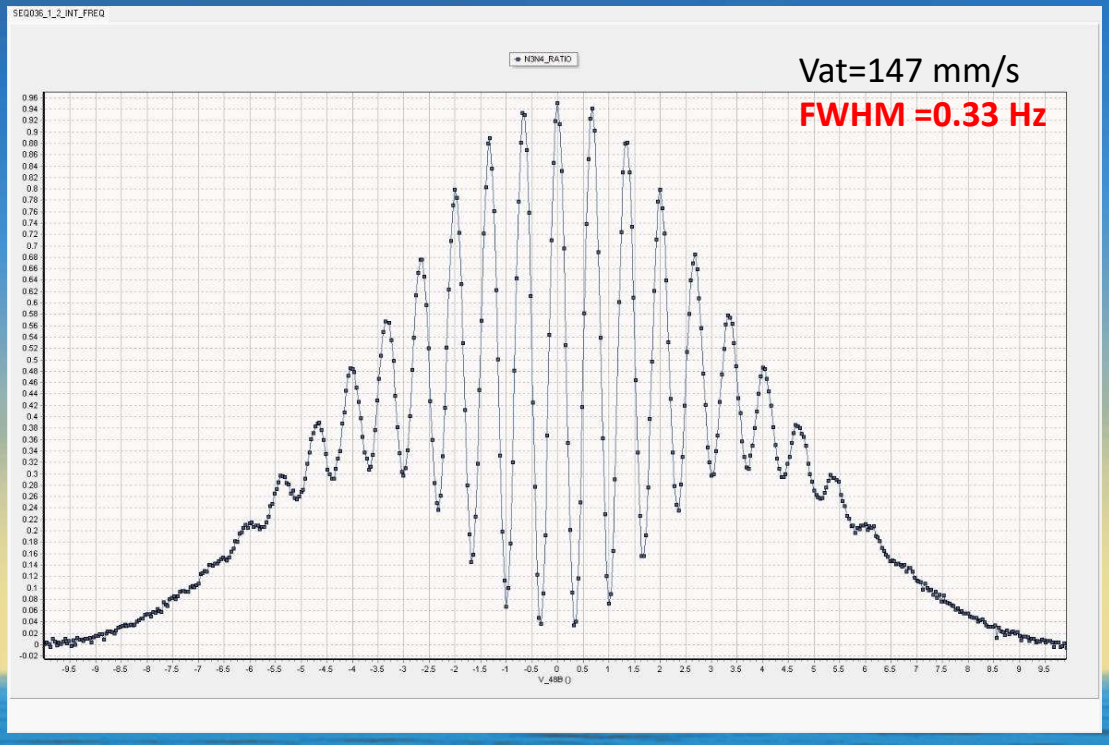
- ACES est maintenant pleinement opérationnel
  (SHM, ELT et stations sol)



- l'exactitude de PHARAO est en cours d'évaluation, l'objectif 10^{-16} reste maintenu à condition d'une extension de la mission (1-2 ans).

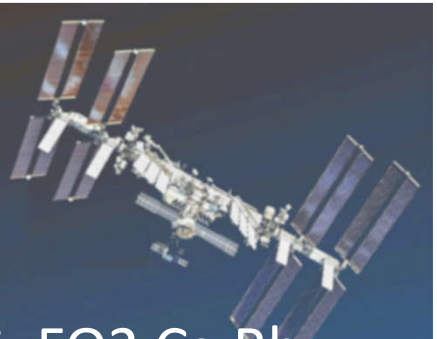
- Vitesse la plus basse utile (147mm/s):
  Effets systématiques plus faibles et extrapolation à 0





Stabilité de
$4x10^{-13}$@1s
6 mois: 10^{-16}

PhL



- Les comparaisons ACES-labo ont débuté entre P&S_FS: FO2 Cs-Rb (LTE), CSF2-Yb1 (PTB), NIST-F4, …
  - Pas d'anomalie à une résolution de 10^{-15}, l'analyse se poursuit.

- Comparaisons, MWL, ELT avec le réseau fibré, via refimeve, NPL, LTE, PTB, en cours.

➢ Accumuler les données de comparaisons pour incertitude 10^{-16}



Pour l'instant la fin de mission 2027, prolongation demandée…

Collaborateurs ACES



Abgrall M[2], Allart E[3], Bauch A[4], Bize S[2], Cacciapuoti L[1], Clairon A[2], Crescence P[3], Delva P[2], Diener WA[5], Eckl J[6], Enzer DG[5], Esnault FX[7], Fuijeda M[8], Gibble K[9], Goujon D[10], Guerlin C[11], Heimbach F[4], Helm A[3], Ichikawa R.[8], Kannanthara J[12], Kehrer J[3], Kodet J[13], Lachaud R[3], Laurent P[2], Léger B[7], Le Poncin-Lafitte C[2], Lilley M[2], Liu S[14], Lorini L[2], Mamoru S[8], Marz S[13], Massonnet D[7], McKelvy J[5], Montenbruck O[15], Niedermaier T[3], Pataraia S[1], Patla B[16], Peignier T[1], Peik E[4], Perri A[10], Piester D[4], Pittet J[10], Plumaris M[1], Prochazka I[17], Rahm J[4], Roze J[2], Salomon C[11], Savalle E[18], Schaefer W[14], Schlicht A[13], Schreiber U[13], Schwall T[14], Schwatke C[13], Shemar S[12], Thulliez E[7], Tjoelker R[5], T unesi J[12], Vollmair P[13], Wang Q[10], Weinberg S[1], Wermuth M[15], Weyers S[4], Wolf P[2], Yu N[5]

[1]European Space Agency, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands,
[2]LTE, Observatoire de Paris-PSL, CNRS, LNE, Sorbonne Université, Université de Lille, Paris, France
[3]Airbus Defence and Space, Friedrichshafen, Germany,
[4]Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany
[5]Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, USA,
[6]Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Geodetic Observatory Wettzell, Bad Kötzting, Germany
[7]CNES, Toulouse, France, [8]National Institute of Information and Communications Technology, Koganei, Tokyo, Japan
[9]The Pennsylvania State University, University Park, USA, [10]Safran Timing Technologies SA, Neuchâtel, Switzerland
[11]Laboratoire Kastler Brossel, ENS-PSL, Paris, France, [12]National Physical Laboratory, Teddington, United Kingdom
[13]Technical University of Munich, Munich, Germany, [14]Timetech, Stuttgart, Germany
[15]German Space Operations Center, DLR, Weßling, Germany, [16]National Institute of Standards and Technology, Boulder, USA
[17]Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic, [18]IRFU, CEA, Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France