

LE PROJET PHARAO-ACES ET LA COMPARAISON D'HORLOGES TERRESTRES

David VALAT – Jérôme DELPORTE – F-Xavier ESNAULT

27 mai 2013

Centre national d'études spatiales
DCT/RF/HT / BPI 2013
18 avenue Edouard Belin
31401 TOULOUSE Cedex 9 (France)

SOMMAIRE

- **LES MISSIONS DU PÔLE TEMPS-FRÉQUENCE DU CNES**
- **LE PROJET ACES/PHARAO**
- **LA STATION DE TEMPS DU CST ET COMPARAISON D'HORLOGES**
- **LA R&T AU CNES : TRANSFERT DE TEMPS**
- **RACCORDEMENT RENATER AU CST ET PEIGNE DE FRÉQUENCE**
- **PERSPECTIVES ET CONCLUSION**

SOMMAIRE

- **LES MISSIONS DU PÔLE TEMPS-FRÉQUENCE DU CNES**
- LE PROJET ACES/PHARAO
- LA STATION DE TEMPS DU CST ET COMPARAISON D'HORLOGES
- LA R&T AU CNES : TRANSFERT DE TEMPS
- RACCORDEMENT RENATER AU CST ET PEIGNE DE FRÉQUENCE
- PERSPECTIVES ET CONCLUSION

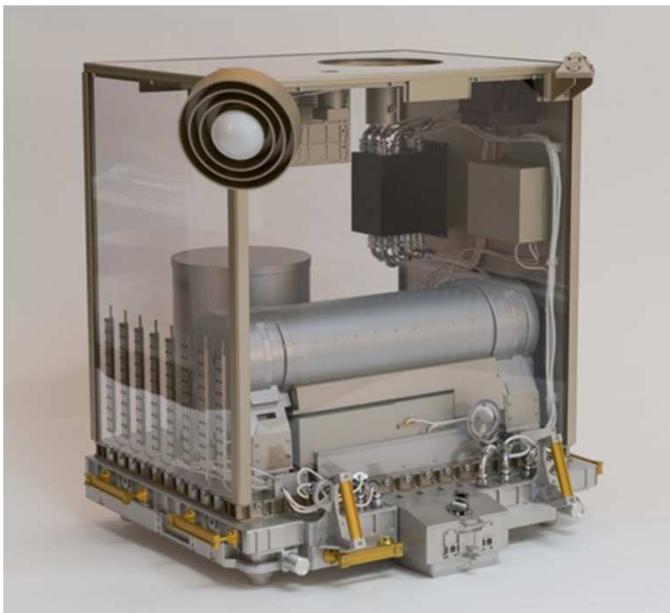
LES MISSIONS DU PÔLE TEMPS FRÉQUENCE DU CNES

- **Projets :**
 - Participer à la définition des équipements ou sous systèmes Temps Fréquence des projets en phase initiale.
 - Assurer une expertise et un support aux projets : Navigation, Doris, T2L2, PHARAO.
- **Actions de R&T et bourses de recherche dans le domaine T/F**
 - Horloges atomiques : horloges compactes pour GALILEO (RUBI-CLOCK, CPT...), horloges optiques (Sr, Hg).
 - OUS : amélioration des oscillateurs à quartz, exploration de nouvelles technologies.
 - Transfert de temps et de fréquence : GNSS Phase, étalonnage absolu de chaînes de réception GNSS, Transfert par fibres optiques.
- **Laboratoire de métrologie Temps/Fréquence**
 - Génération et distribution de la référence de temps CNES, contribution au TA(F) et au TAI.
 - Caractérisation des équipements bords et sols, incluant les essais environnementaux (T, champ mag, vide, radiation avec ONERA).

SOMMAIRE

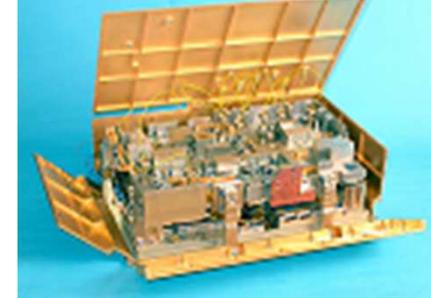
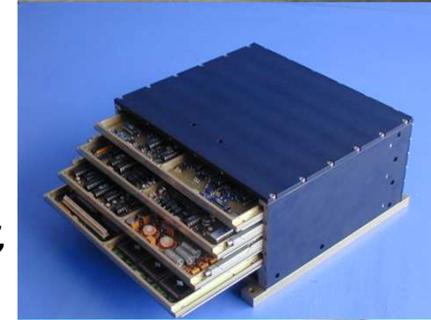
- LES MISSIONS DU PÔLE TEMPS-FRÉQUENCE DU CNES
- **LE PROJET ACES/PHARAO**
- LA STATION DE TEMPS DU CST ET COMPARAISON D'HORLOGES
- LA R&T AU CNES : TRANSFERT DE TEMPS
- RACCORDEMENT RENATER AU CST ET PEIGNE DE FRÉQUENCE
- PERSPECTIVES ET CONCLUSION

Le CNES a la charge du développement et de l'intégration de l'horloge à atomes froids **PHARAO** : contribution française à ACES (Atomic Clock ensemble in Space) de l'ESA.



Charge utile ACES comprenant un maser, PHARAO, un lien microonde, ...

Éléments constitutifs de PHARAO : Source hyper, Tube Cs, UGB, Source Laser, ...

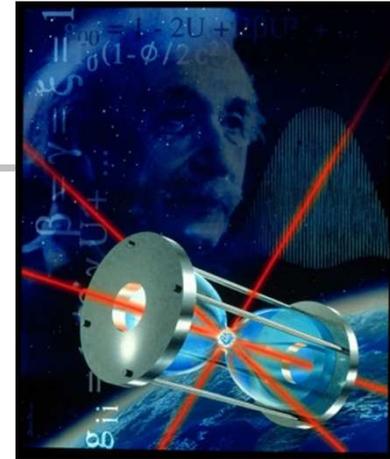


PHARAO : OBJECTIFS

En vol

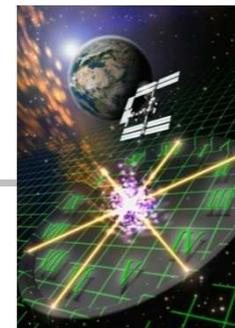
Exactitude visée de 10^{-16}

Stabilité de fréquence 3.10^{-16} @ 1d



- Faire fonctionner une horloge au césium refroidi par laser **en micropesanteur** : stabilité de fréquence $10^{-13} \tau^{-1/2}$ (1.10^{-16} @ 10d).
- Valider un ensemble de nouvelles technologies requises par l'environnement spatial.
- Réaliser des expériences de physique fondamentale :
 - ◆ nouvelle mesure de l'effet Einstein avec une précision de 10^{-6} ,
 - ◆ recherche de possibles anisotropies de la vitesse de la lumière au niveau relatif de 2.10^{-10}
 - ◆ recherche de possibles variations dans le temps (ou l'espace) de la constante de structure fine, par la comparaison de PHARAO avec des horloges atomiques au sol basées sur des atomes autres que le césium.

PHARAO : EVENEMENTS CLES PHARAO



2017	Phase opérationnelle
Mi à fin 2016	Recette en vol, Calibration et Validation
2016	Lancement de PHARAO
Février 2014	Livraison du modèle de vol de PHARAO pour intégration avec ACES
4^{me} trimestre 2013	Intégration et tests du modèle de vol de l'horloge PHARAO
Janvier 2013	Livraison du tube césium
Juillet 2009	Test du modèle d'ingénierie de PHARAO avec son équivalent ACES
Décembre 2008	Décision du CNES de construire le modèle de vol de PHARAO

CARACTÉRISATION DE PHARAO AU SOL

Tests de performance à l'intégration :

- Vérifier l'exactitude de fréquence de PHARAO : $1 \cdot 10^{-15}$
 - Référence FOM ($6 \cdot 10^{-16}$ typique)
- Vérifier la stabilité de fréquence de PHARAO : $3 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$
 - Référence FOM ($1 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$)
- Mesure l'effet des transitoires de phase générés par les microcommandes du cycle PHARAO.
 - Oscillateur cryogénique ULISS (Femto-ST), stabilité de fréq. $< 4 \cdot 10^{-15}$ pour $1 \text{ s} < \tau < 1000 \text{ s}$.

Au sol

Besoin en disponibilité du signal REFIMEVE+ pour ces essais :
Fin 2013 / Début 2014

SOMMAIRE

- LES MISSIONS DU PÔLE TEMPS-FRÉQUENCE DU CNES
- LE PROJET ACES/PHARAO
- **LA STATION DE TEMPS DU CST ET COMPARAISON D'HORLOGES**
- LA R&T AU CNES : TRANSFERT DE TEMPS
- RACCORDEMENT RENATER AU CST ET PEIGNE DE FRÉQUENCE
- PERSPECTIVES ET CONCLUSION

LA STATION DE TEMPS DU CST

Echelles de temps composite CNES

=

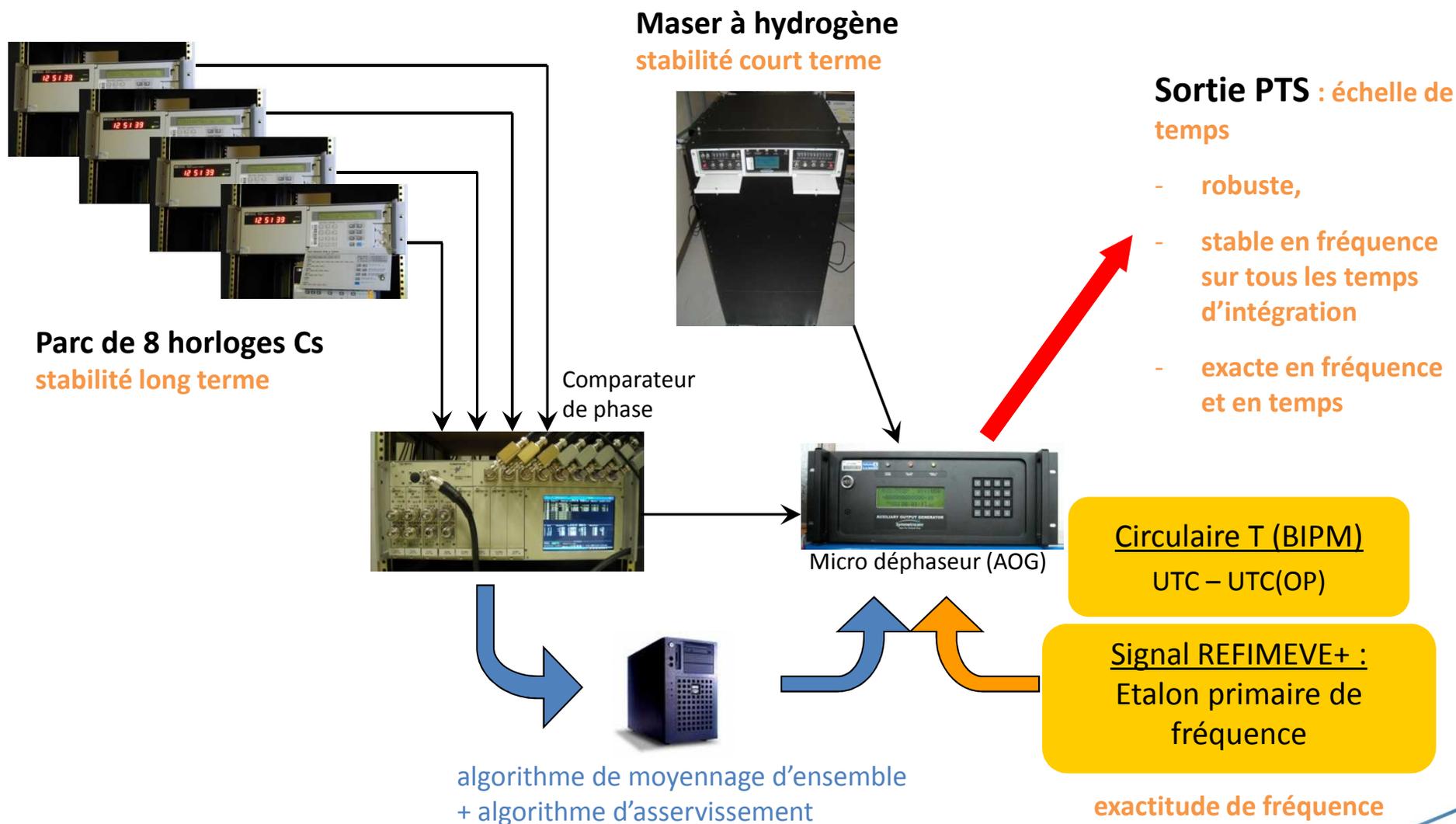
réalisation temps réelle de l'UTC

Objectifs :

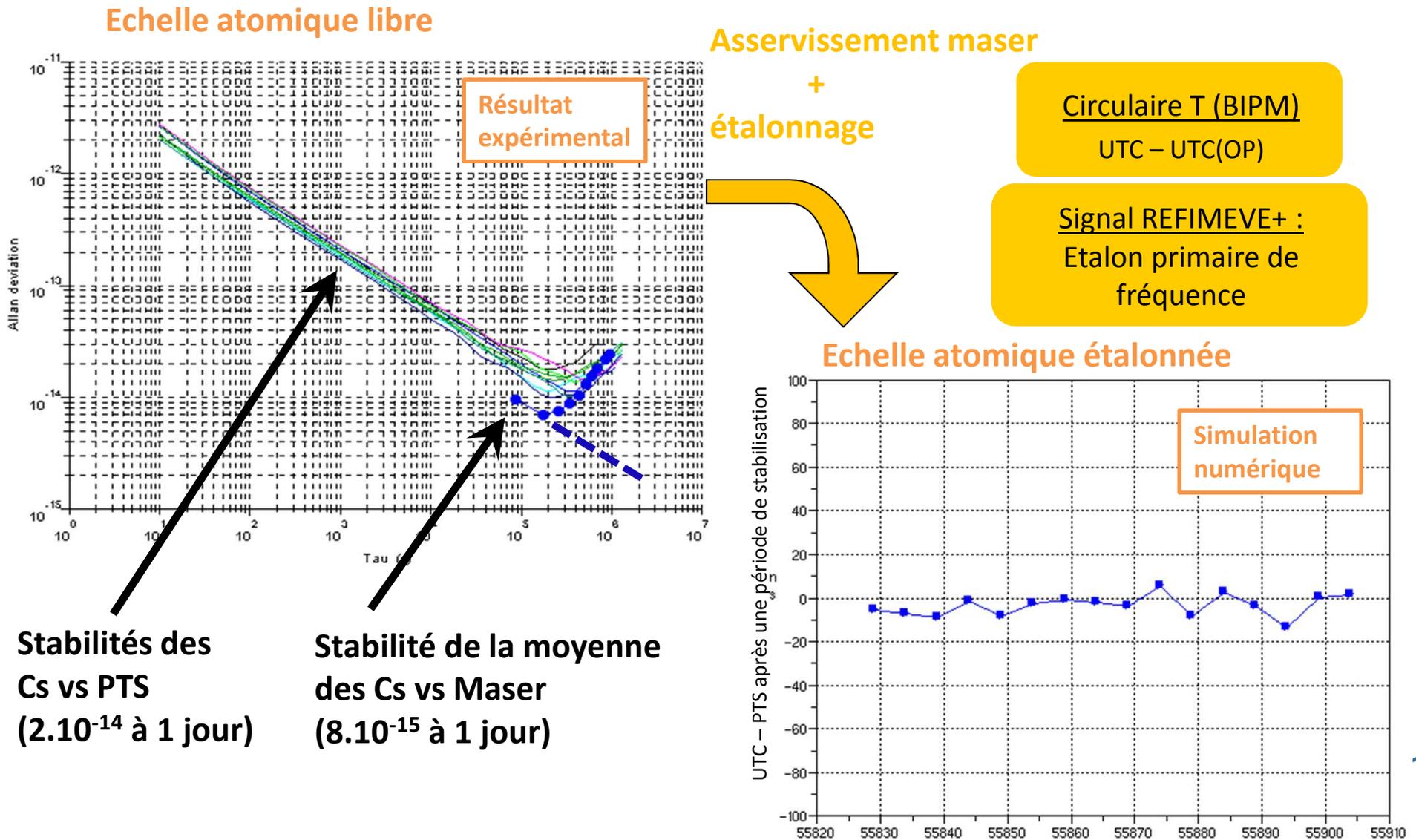
- **Développer notre capacité d'expertise indépendante notamment dans le contexte Galileo.**

- **Disposer d'une échelle de temps**
 - ◆ **de performance équivalente à une PTF Galileo pour le monitoring indépendant en temps-réel de GST (Galileo System Time) y compris en stabilité.**
 - ◆ **pour le monitoring du message radiodiffusé GST – UTC et à terme de ENT – UTC. (ENT : Egnos Network Time)**
 - ◆ **pouvant servir de référence pour les utilisateurs et les projets (Centre de contrôle, REGINA, CAPT, ...)**
 - ◆ **Comme pivot pour le raccordement d'horloges pour participation aux échelles de temps nationales TA(F) et internationales TAI.**

LA STATION DE TEMPS DU CST : SCHEMA DE PRINCIPE



LA STATION DE TEMPS DU CST : PERSPECTIVES



SOMMAIRE

- LES MISSIONS DU PÔLE TEMPS-FRÉQUENCE DU CNES
- LE PROJET ACES/PHARAO
- LA STATION DE TEMPS DU CST ET COMPARAISON D'HORLOGES
- **LA R&T AU CNES : TRANSFERT DE TEMPS**
- RACCORDEMENT RENATER AU CST ET PEIGNE DE FRÉQUENCE
- PERSPECTIVES ET CONCLUSION

R&T CNES : TRANSFERT DE TEMPS PAR FIBRE

- **Action de R&T : R-S12/LN-0001-022 démarrée en octobre 2012 : Transfert de temps par fibre optique (P-E Pottie / LNE-SYRTE, partenariat LPL).**
- **Post-doc cofinancé CNES/Obs. de Paris* 2014 : Transfert simultané Temps-Fréquence par liaison optique fibrée (F. Stefani / LNE-SYRTE, partenariat LPL).**

Objectifs :

- Développer une méthode de transfert simultané de temps et de fréquence par fibre optique sur ~500 km.
- Définir les caractéristiques techniques/développement de la station répétrice pour transfert de temps sur 1000 km.
- ...

* Sur financement européen JRP NEAT-FT.

TRANSFERT DE TEMPS PAR FIBRE : PREMIERS RÉSULTATS / PUBLICATION SYRTE-LPL

	GPS P3	GPS carrier-phase	TWSTFT TW satellite t & f tr.	T2L2 Time Tr. by Laser Link	TTTOF 540 km Two-way public fiber
Accuracy	3 ns	3 ns	1 ns	200 ps (expected)	250 ps
Stability (1d)	0.2 ns	0.1 ns 80 ps (PPP)	40 ps	<10 ps (100 s)	20 ps



- Améliorer les comparaisons d'horloges sur les courtes distances.
- caractériser les techniques de transfert par satellites (sur courtes distances).



SYRTE



SOMMAIRE

- LES MISSIONS DU PÔLE TEMPS-FRÉQUENCE DU CNES
- LE PROJET ACES/PHARAO
- LA STATION DE TEMPS DU CST ET COMPARAISON D'HORLOGES
- LA R&T AU CNES : TRANSFERT DE TEMPS
- **RACCORDEMENT RENATER AU CST ET PEIGNE DE FRÉQUENCE**
- PERSPECTIVES ET CONCLUSION

RACCORDEMENT RENATER AU CST ET PEIGNE DE FRÉQUENCE

Labo optique :

Modèle : FC1500-250-WG + BDU-FF@1542 nm + BDU-FC@1560 nm

Options :

- **EOM-Phase (Electro-optic Phase Modulator)**

Labo T/F :

Modèle : FC1500-250-WG + BDU@1542 nm

Options :

- **EOM-Phase (Electro-optic Phase Modulator)**
- Custom Electronics (1 GHz fiber-coupled photodetector with bandpass filter and 1:10 frequency divider) → 100 MHz

Raccordement CNES :

- Raccordement du laboratoire T/F au point RENATER (Univ. P. Sabatier)
- Réseau fibré local pour la distribution du signal REFIMEVE+ en interne.
- Comparaison de la stabilité du signal REFIMEVE+ à la cavité ultra stable SODERN (stabilité $< 10^{-15}$ entre 1s et 10s) et FOM en exactitude.



SOMMAIRE

- LES MISSIONS DU PÔLE TEMPS-FRÉQUENCE DU CNES
- LE PROJET ACES/PHARAO
- LA STATION DE TEMPS DU CST ET COMPARAISON D'HORLOGES
- LA R&T AU CNES : TRANSFERT DE TEMPS
- RACCORDEMENT RENATER AU CST ET PEIGNE DE FRÉQUENCE
- **PERSPECTIVES ET CONCLUSION**

PERSPECTIVES ET CONCLUSION

Utilisation des signaux REFIMEVE+ pour :

- Réalisation d'échelles de temps.
- Comparaison des moyens de comparaison (GNSS Phase, TWSTFT, ACES MWL...) et le transfert de temps.
- Tests métrologiques de futures horloges (STE-QUEST ?).
- Géodésie : Effet Sagnac.

Le transfert de temps et de fréquence par fibre optique est une thématique nouvelle pour le CNES, qui offre de très bonnes perspectives pour la métrologie temps fréquence, y compris pour les activités spatiales.

→ Engagement du CNES dans cette voie par le partenariat au projet REFIMEVE+.