

LIENS QUANTIQUES À L'OCA

WORKSHOP

APPLICATIONS DES TECHNOLOGIES TEMPS-FRÉQUENCE AUX DOMAINES DE LA DÉFENSE ET DU SPATIAL

OCTOBRE 2025

Geoazur : Mourad Aïmar, Julien Chabé, *Clément Courde*, Nicolas Maurice, Hervé Mariey, Grégoire Martinot-Lagarde, Duy-Hà Phung, Axel Pillot, Julien Scariot, Nils Raymond

Inphyni : Olivier Alibart, Gregory Sauder, Valentin Dumas, Yoann Pelet, Anthony Martin, Laurent Labonte, Virginia D'Auria, Sébastien Tanzilli

Summary

- Contexte

- Le Réseau quantique fibré Quantum@UniCA

- TestBed pour liens quantiques Free Space

PEPR QCommTestBed

- Projets Spatiaux : NordSat, QRUSOE, NOVAMOON

Contexte des liens de communication quantiques

- Pourquoi établir des liens de communication quantique ?

- Pour sécuriser les communications : Quantum Cryptography et notamment la distribution de clés quantiques QKD
 - ⇒ permet de partager des clés secrètes dont la sécurité est garantie par les lois de la physique. Toute tentative d'interception ou de mesure par un espion modifie l'état quantique et devient détectable
 - ⇒ Prépare un monde où les ordinateurs quantiques pourraient casser les algorithmes classiques de chiffrement

- Préparer l'internet quantique :

Un réseau de communication quantique est une étape vers un "internet quantique", où des ordinateurs quantiques, des capteurs et des répéteurs quantiques seraient interconnectés.

Cela permettra : la téléportation d'états quantiques entre nœuds distants, le traitement distribué quantique (partage de calculs entre plusieurs processeurs quantiques).

- Application scientifiques industrielles :

Institutions de recherche : pour tester les fondements de la physique quantique (intrication, non-localité, décohérence).

Industrie et défense : pour des réseaux inviolables de communication entre centres sensibles (banques, gouvernements, infrastructures critiques).

Spatial : des liens satellite-sol permettent de dépasser la limite géographique des fibres optiques (faibles pertes et grande portée).

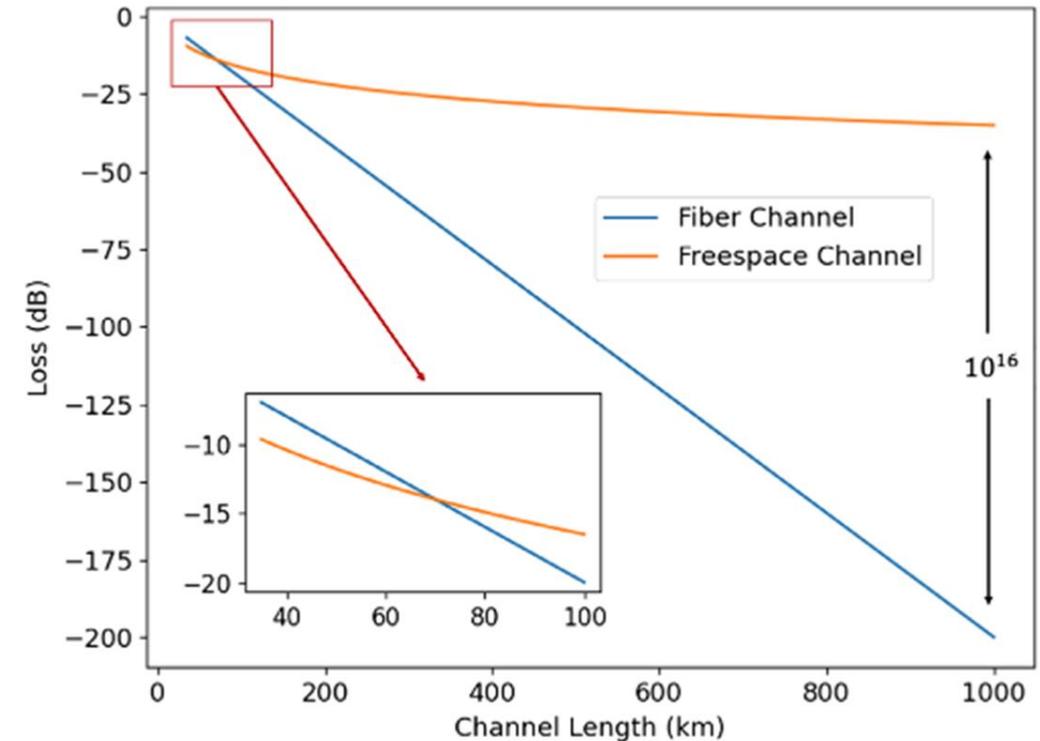


Contexte des liens de communication quantiques

- Problème techniques à résoudre
Les pertes dans les fibres optiques limitent la distance entre nœud à environ 50 km. Impossibilité d'utiliser des amplificateurs comme sur les réseaux classiques.

⇒ R&D sur les liens free-space, sur les mémoires quantiques, sur les sources, sur les systèmes de synchronisation

Interest of free space for long distance quantum experiment



From Lu et al., Micius Quantum experiments in space, 2022

Contexte des liens de communication quantiques

- Enjeux géopolitiques

La Chine, l'Europe et les États-Unis investissent massivement dans ces infrastructures :

Micius (Chine) : premier satellite de communication quantique (2016).

EuroQCI (UE) : réseau quantique paneuropéen en développement.

NASA et DARPA : projets de liaisons quantiques spatiales et militaires sécurisées. Ces initiatives visent à garantir l'autonomie stratégique et la souveraineté technologique en matière de cybersécurité.



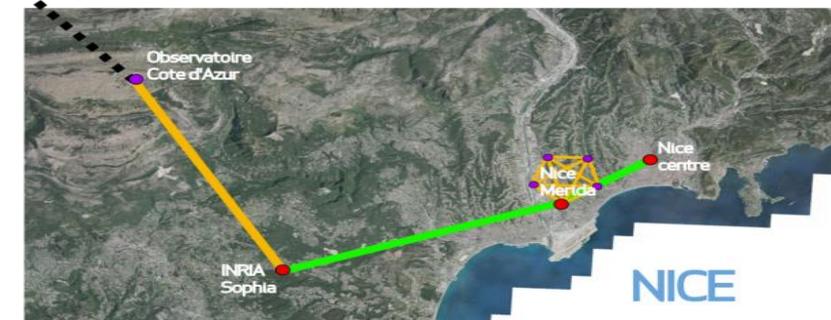
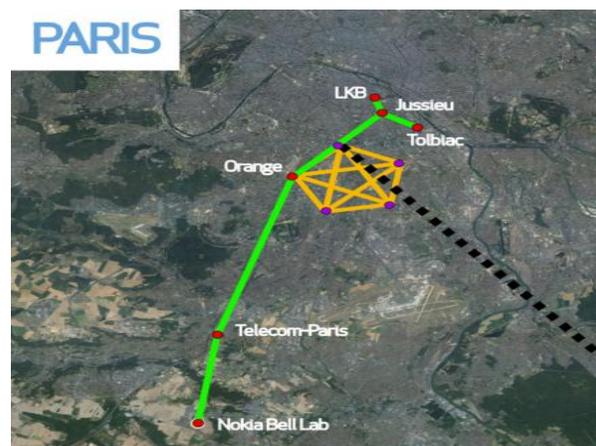
Satellite-based entanglement distribution over 1200 km
Yin et al., Science 356, 1140 (2017)





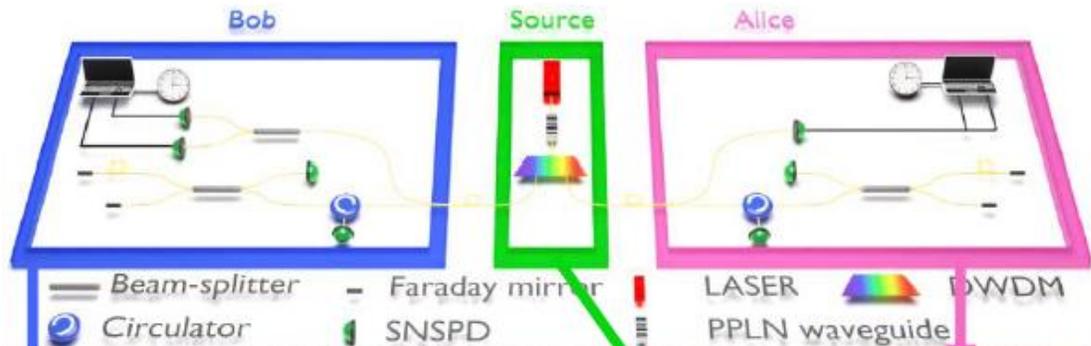
projet PEPR QcommTestBed

WP1: Mise en place et opération de l'infrastructure réseau

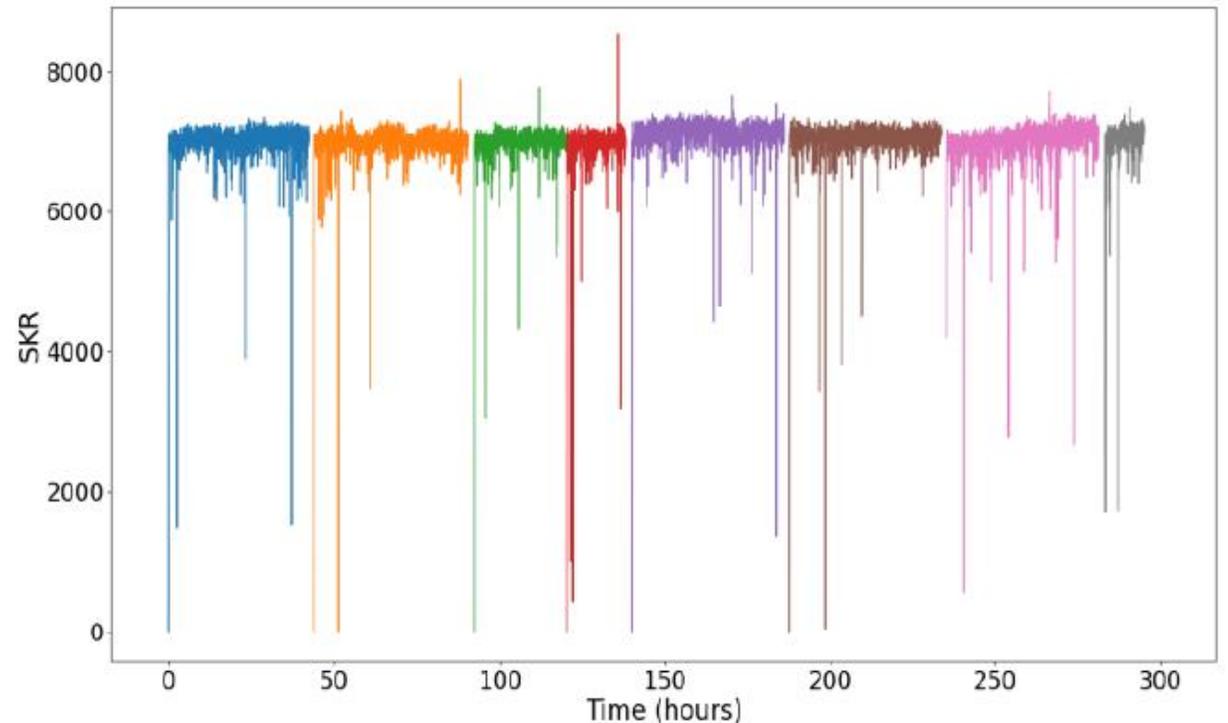


- **Responsables** : O. Alibart – INPHYNI, C. Courde – GEOAZUR
- **Tâche 1** : Développement et opération d'une infrastructure réseau à fibre optique (haut TRL)
- **Tâche 2** : Caractérisation et opération de stations sols pour un lien espace libre vers les satellites (bas TRL)

QKD on the French Riviera



- Fully automated QKD operation
- Quantum time transfer
- Secret Key Rate : **7kbps** over **300h**
- Potential to operate for 40 users

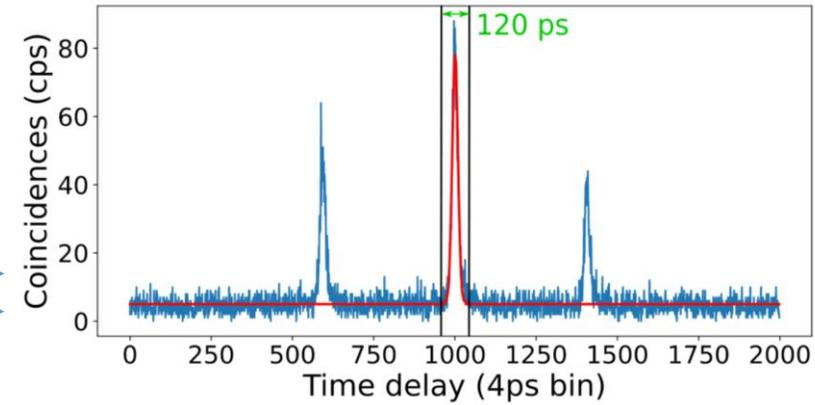
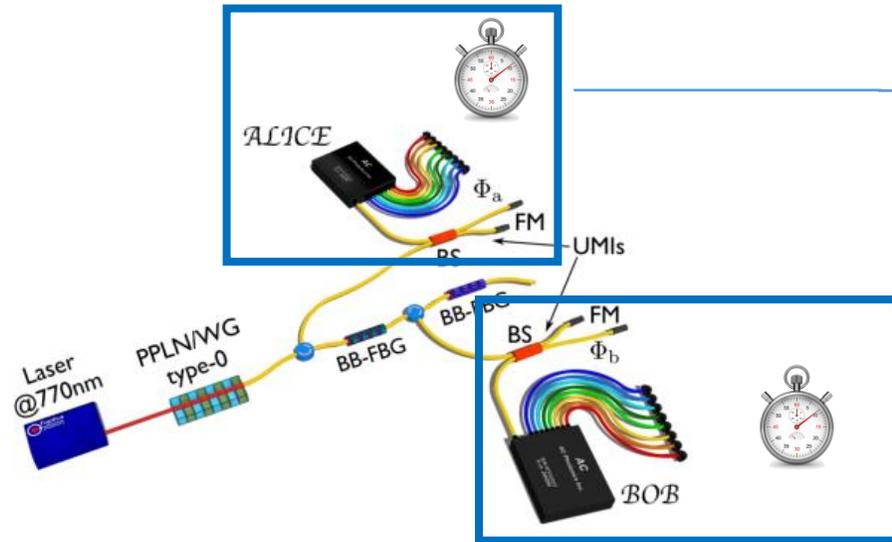


Réseau fibré Quantum@UniCA => extension au site de Calern de l'OCA

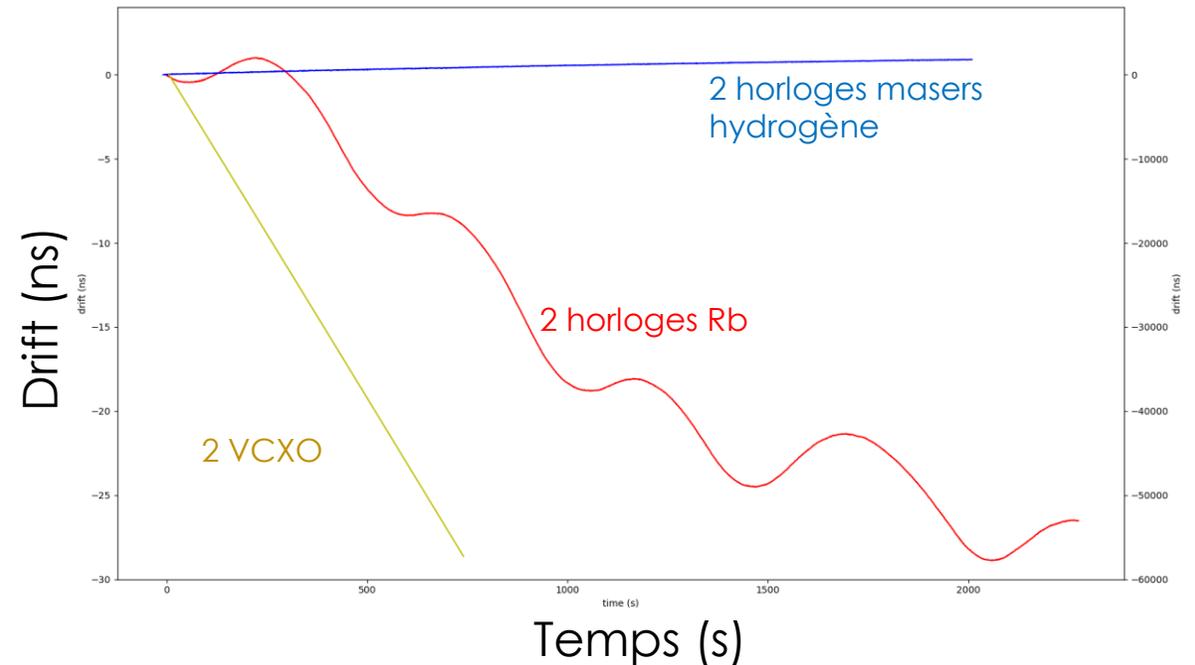


Réseau fibré : synchronisation des nœuds

Ex. Distribution intrication (DV-QKD)



Besoin de synchroniser les deux horloges



Réseau fibré : synchronisation des nœuds

Optical signal multiplexed with quantum signals ? (GEOAZUR + INPHYNI)

Open questions :

- Precision ?
- Coexistence with quantum signal?
- Rate of signal ?

Which platform :

- Industrial ? (Sync-E @Orange)
- Semi-industrial ? (white rabbit)
- Custom SFP-based ? (Sigmaworks)
- Future : T-REFIMEVE ?



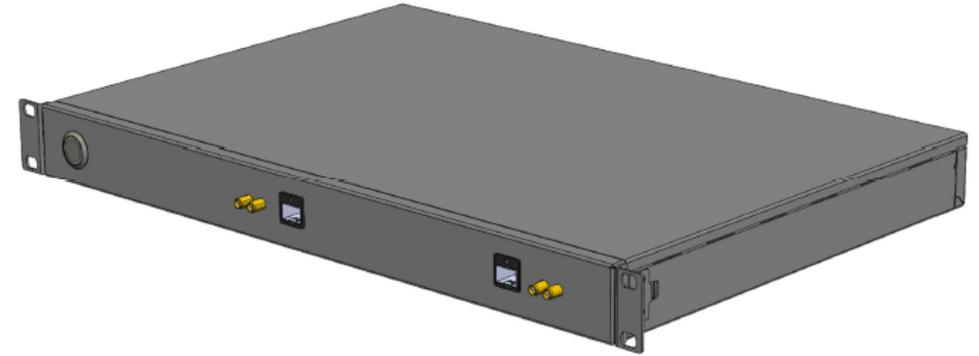
Réseau fibré : synchronisation des nœuds

Precision and optimal rate study :

2.2 Caractéristiques générales

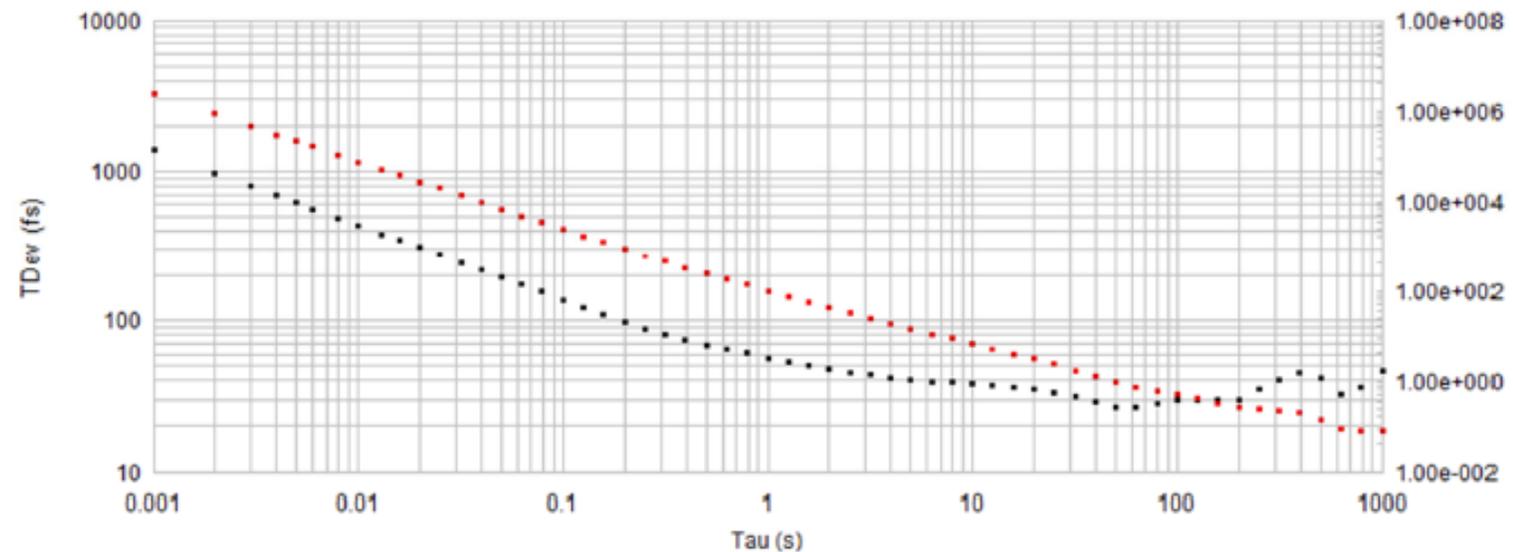
Les caractéristiques attendues sur l'ensemble du système avec des conditions thermiques stabilisées à 1 degré sont les suivantes :

- Cadence des signaux min : 0
- Cadence des signaux max : 50 MHz
- Incertitude : < 2 ps RMS
- Stabilité : < 1 ps @ 1000 s
- Dérive : < 2 ps sur 1000 s
- Déclenchement sur front de montée ou front de descente
- Durée des pulses min : > 200 ps
- Nombre de canaux : 1
- Distance min : 1 m
- Distance max : < 20 km
- Seuil de détection réglable indépendant pour chaque canal
- Impédance d'entrée : 50 Ω



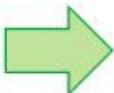
STD-401-310

Transfert de signaux synchrones

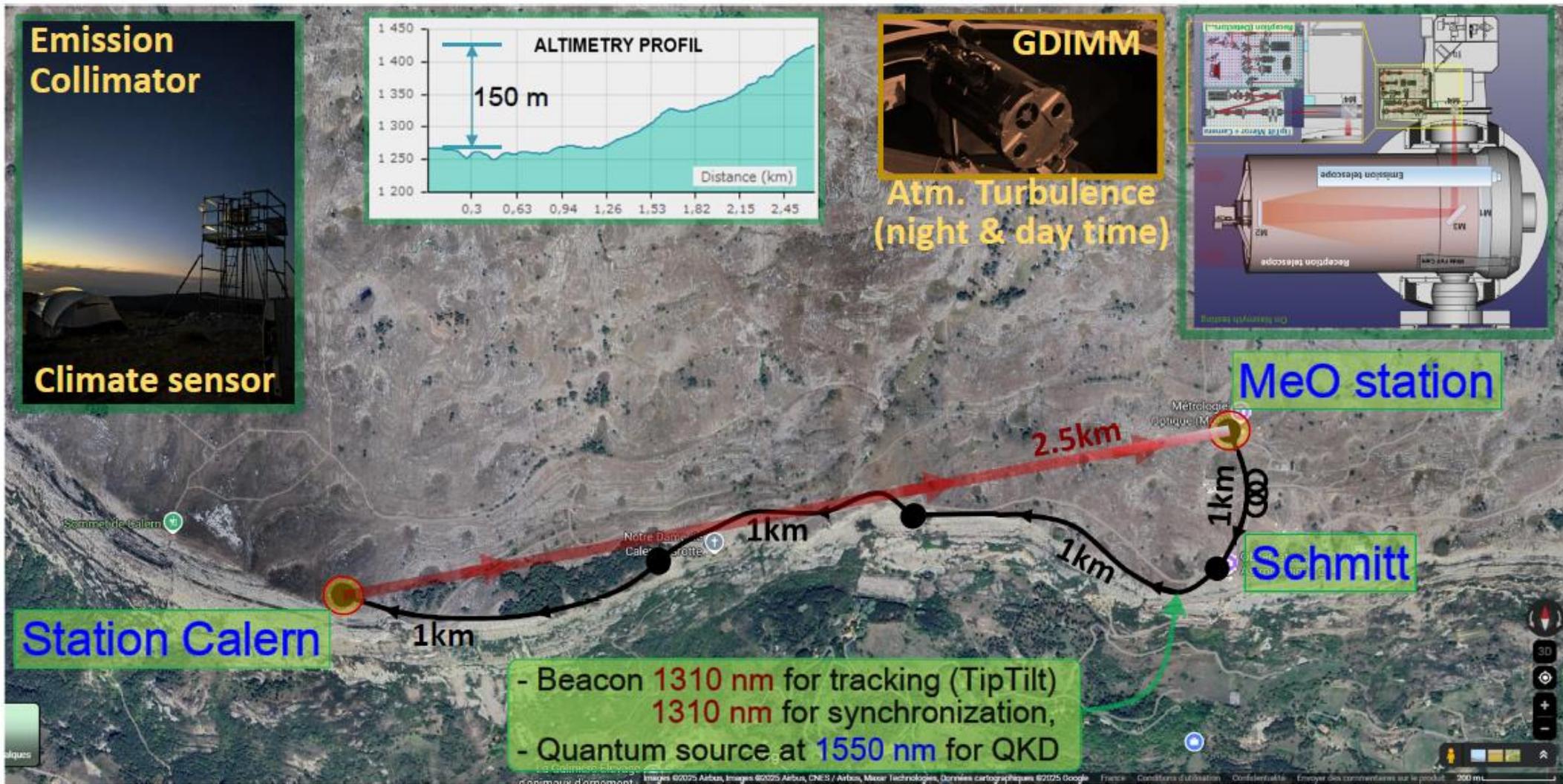


TestBed pour liens quantiques Free Space

PEPR QCom Testbed



Measurement Campaign August 2025



Emission Collimator

Climate sensor

Station Calern

ALTIMETRY PROFIL
150 m
Distance (km): 0,3, 0,63, 0,94, 1,26, 1,53, 1,82, 2,15, 2,45

GDIMM
Atm. Turbulence (night & day time)

MeO station

Schmitt

- Beacon 1310 nm for tracking (TipTilt)
- 1310 nm for synchronization,
- Quantum source at 1550 nm for QKD

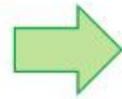
- May 2025**
- First Alignment
 - Link budget

- July 2025**
- Fiber deployment
 - Mono-mode fiber coupling
 - Link budget

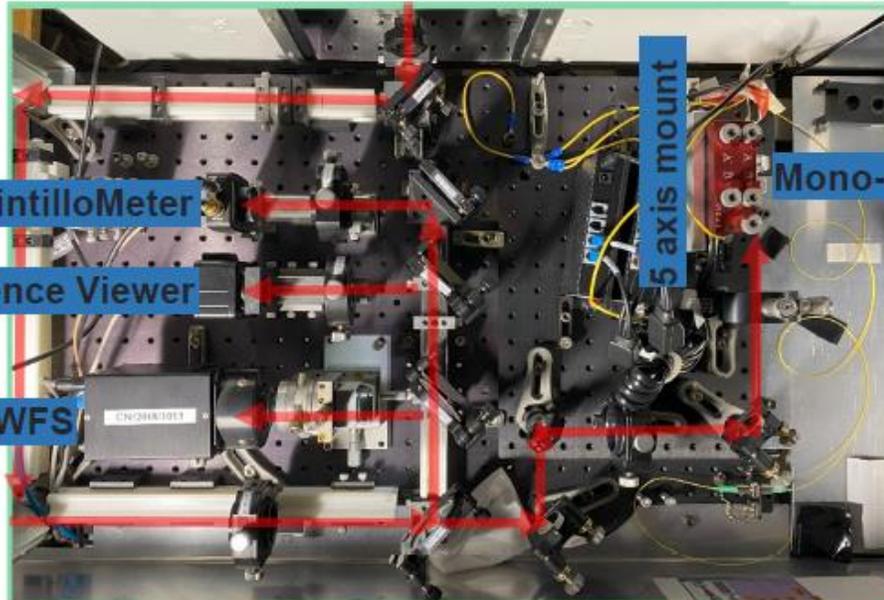
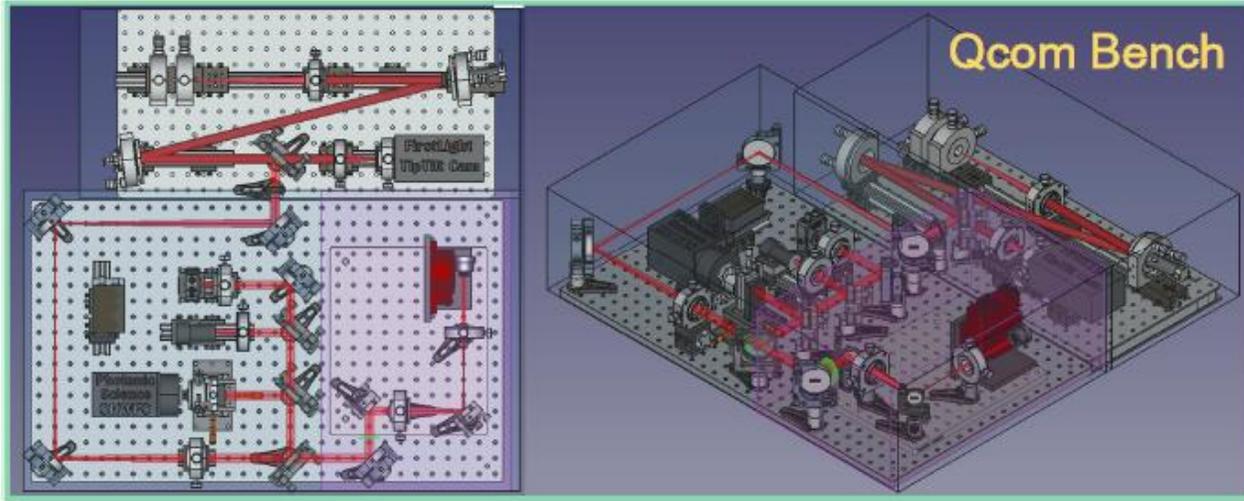
- August 2025**
- Fiber deployment
 - Link budget
 - Quantum Meas.
 - Synchro. Meas.
 - Turbulence monitor
 - T,H,P monitoring

TestBed pour liens quantiques Free Space

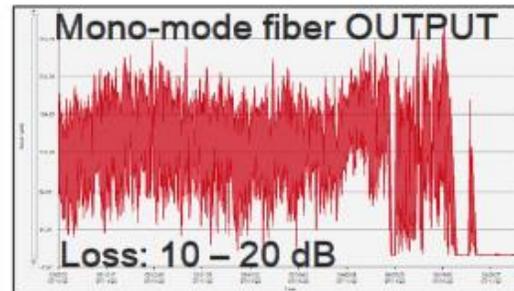
PEPR QCom Testbed



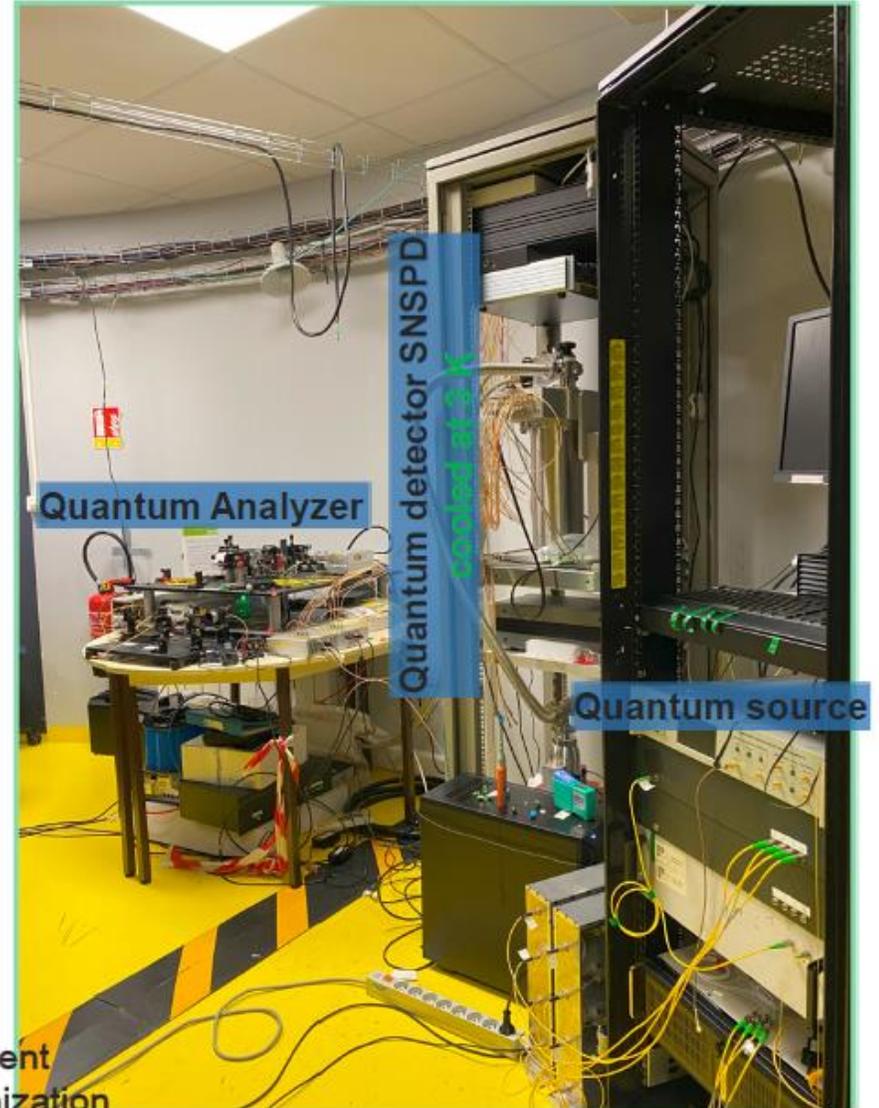
Measurement Campaign August 2025



Mono-mode fiber Coupling



Signal level matches the requirement for QKD measurement + synchronization



TestBed pour liens quantiques Free Space

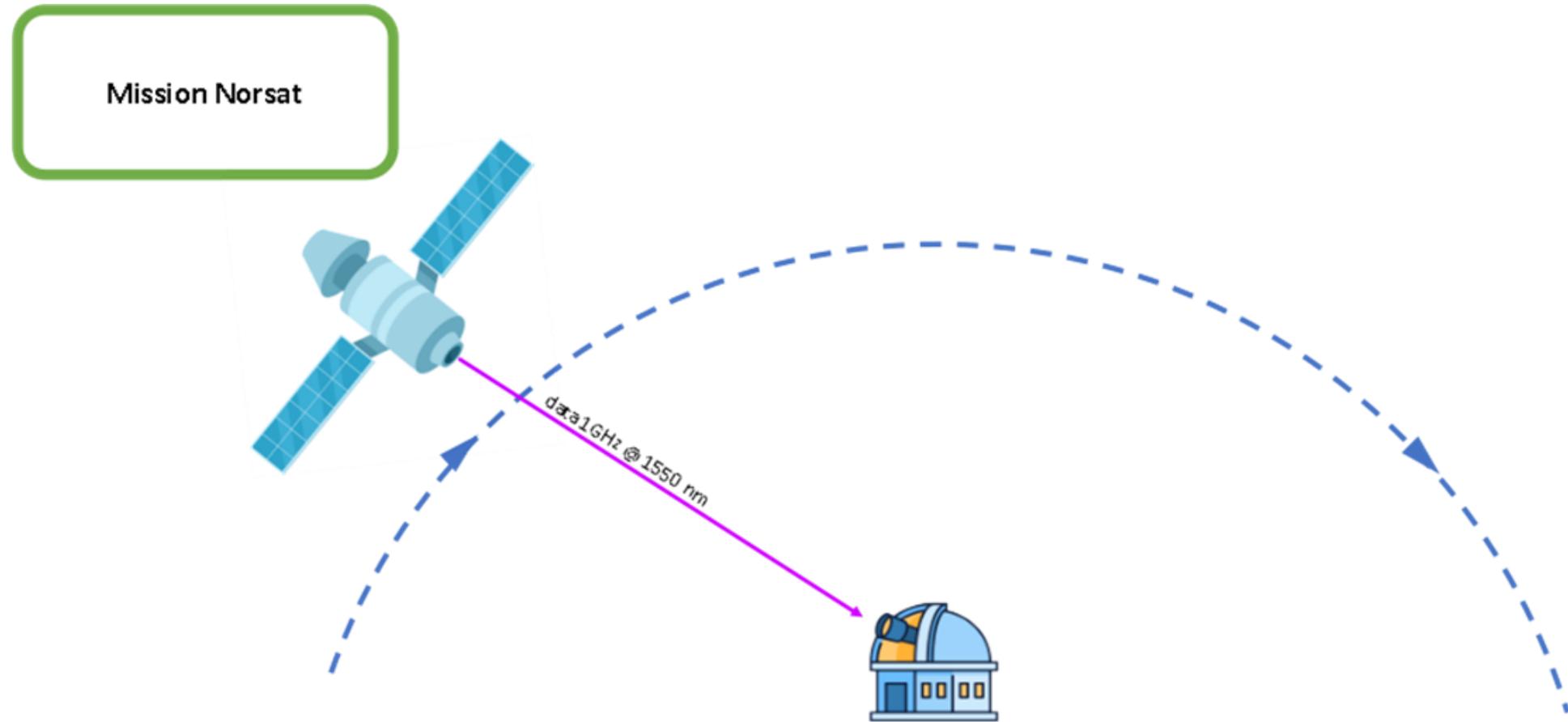
PEPR QCom Testbed



Measurement Campaign August 2025

- ❑ 4 km de fibre noire (6 cœurs, mono-mode smf-28) a été déployé, (sécurité?)
- ❑ Nouvelle version GDIMM (Doeblin) : mesure de jour et nuit
- ❑ Couplage du signal dans un fibre mono-mode (en 2.5 km espace libre + turbulence atm.)
Test de Monture 5 Axes (BQR Geoazur) dans l'espace libre
0.5% – 10% de couplage selon la condition de turbulence ($r_0 = 3 \text{ cm} - 50 \text{ cm}$).
- ❑ Banc Nasmyth de réception – multi fonctions:
 - Miroir TipTilt (BQR OCA) pour la poursuite fine à 120 Hz
+ PI Controller avec Caméra IR (CNES)
 - Analyseur de front d'onde sur l'axe du faisceau – SHWFS avec μ Lens (CNES)
 - Caméra de viser pour l'alignement + vérification
 - ScintilloMeter (0.5 μ W – 5 mW) à 10 kSps: scintillation + bilan de liaison (CNES)
 - Monture + Optics : Lens, Miroirs, Séparatrices : (BQR OCA)
- ❑ Liens QKD fibré + l'espace libre a été établie
 - QKD mesuré à 600 clé/s sous la turbulence
 - Première mesure de Synchronisation a été faite

Projets spatiaux : NordSat 2024

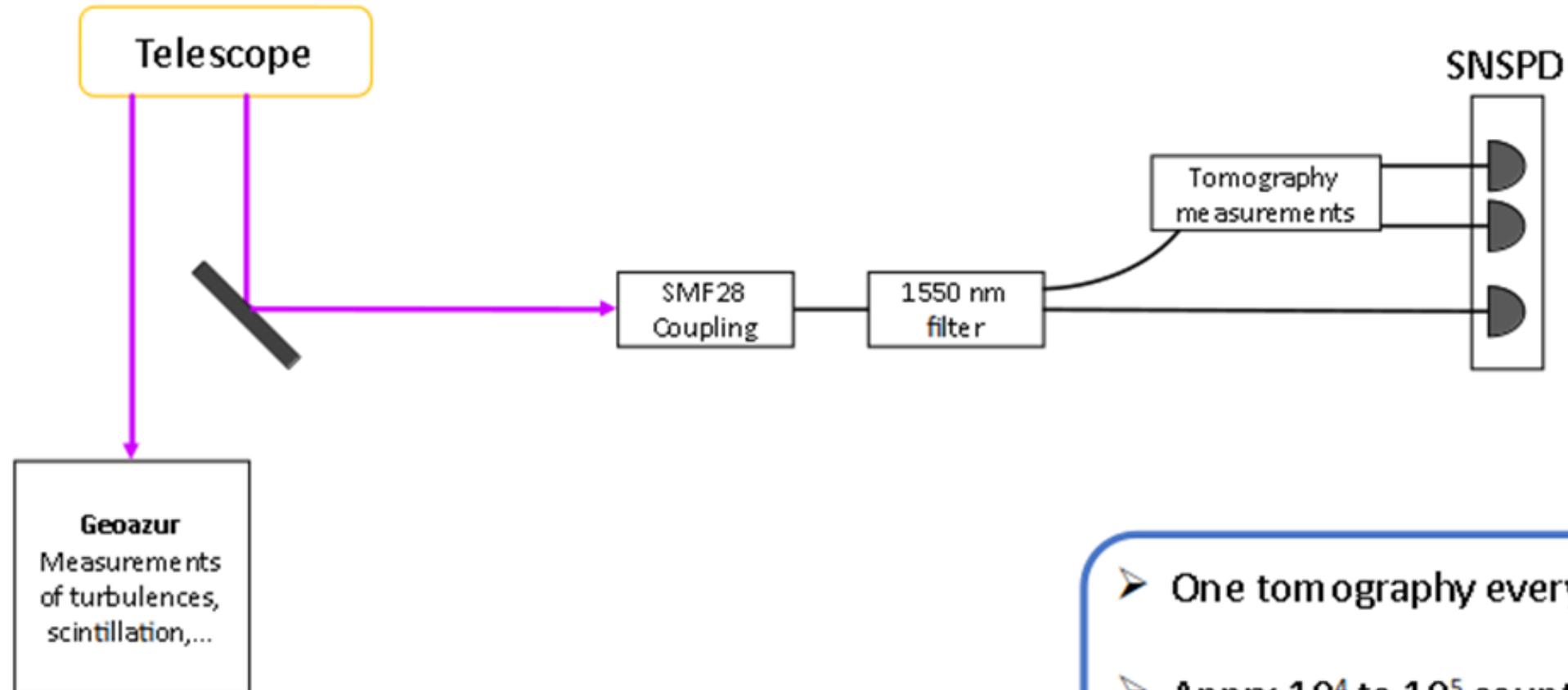


➤ Between 5 and 10 minutes of measurements



The MEO Telescope at the Calern Observatory (Cassegrain; ø1,54m)

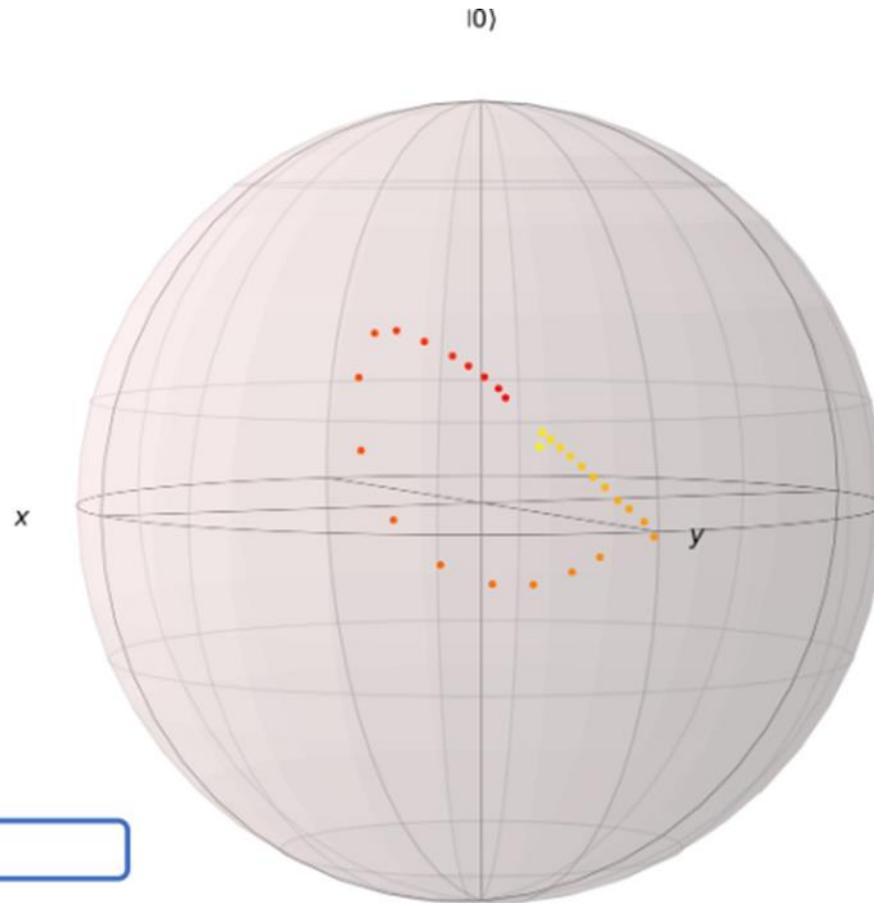
Projets spatiaux : NordSat 2024



- One tomography every 2 seconds
- Apprx 10^4 to 10^5 counts on SNSPD
- 100 to 200 darkcounts/s

Projets spatiaux : NordSat 2024

Tomography results of
05/12 (matin)



➤ Min Purity : 88%

⁽¹⁾ Polarisation rotation seems predictable

Projets spatiaux :

Quantum Optical Ground Stations for EuroQCI QRUSOE

QRUSOE IN A NUTSHELL

/// QRUSOE will prepare the quantum ground stations required for QKD with Eagle-1 and for QIN with QINSAT

/// QRUSOE will provide:

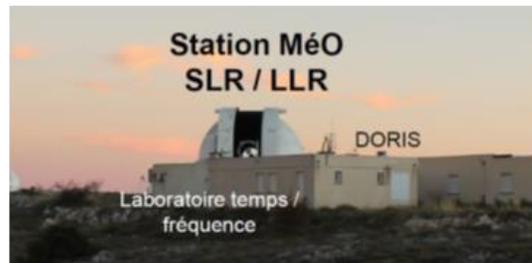
- 2 specific Optical Ground Stations compatible with Quantum Communications
- a ground segment for EuroQCI with the possibility to use different quantum communication protocols (decoy state BB84 and BBM92).

/// Duration: 42 months

/// Start target: 05/01/2026

/// Consortium: 4 large groups + 1 MSE + 1 SME + 6 RTI

Station to be adapted by OCA/CNRS



Station to be developed from scratch by ONERA



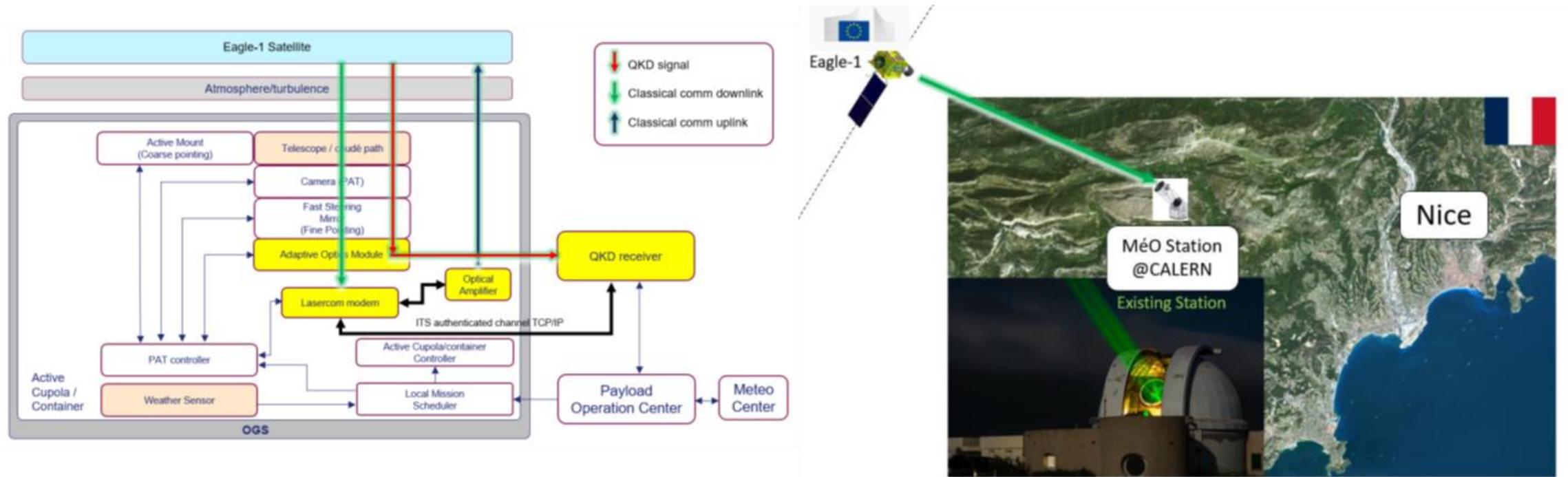
PROVIDENCE (artist's impression)

Projets spatiaux : QRUSOE

OBJECTIVE 1 (QKD + QIN)

Upgrade the existing MéO quantum ground station in Calern (FR) for establishing QKD links with Eagle-1 at the horizon 2027/28.

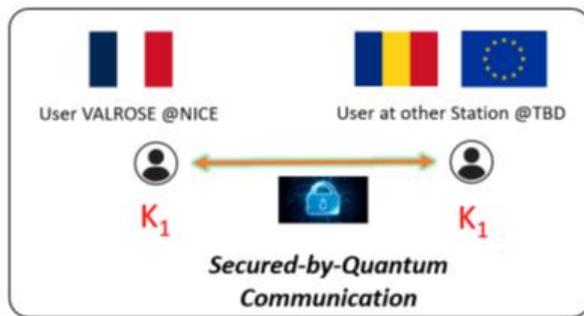
The upgrading will mainly consist in developing an adaptive optics module, developing, and implementing a compatible QKD receiver, and implementing a modem, optical amplifiers, and software suited for the classical bidirectional optical link for the QKD post-processing between Eagle-1 and the MéO station.



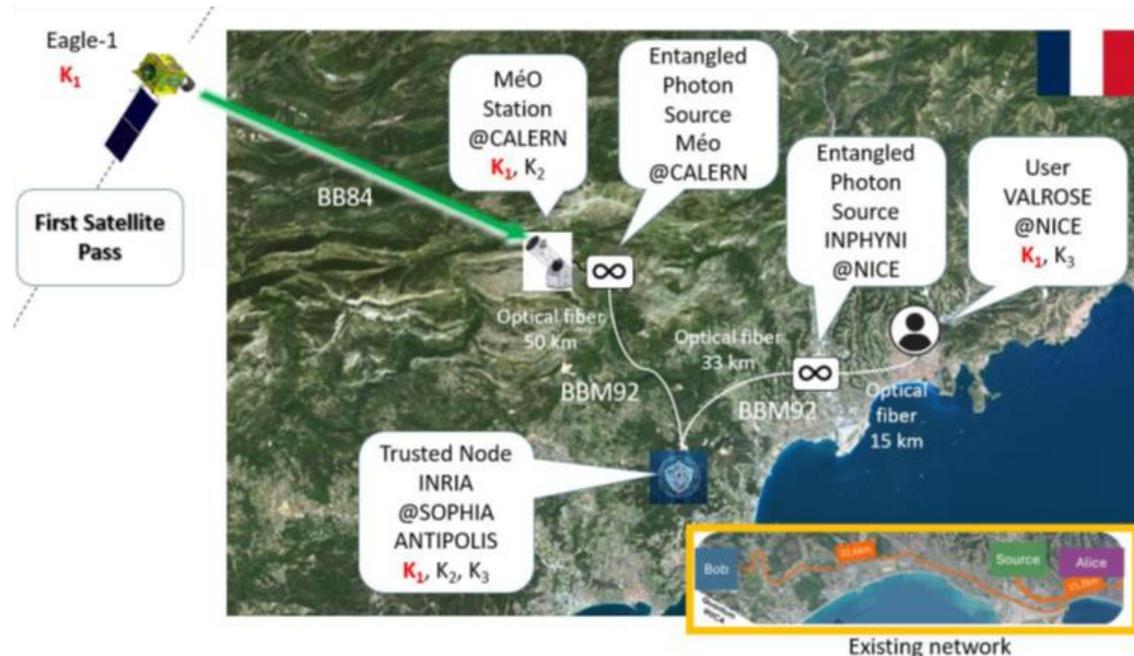
Projets spatiaux : QRUSOE

OBJECTIVE 2 (QKD)

Upgrade and exploit an existing terrestrial quantum optical fibre network in Nice (Quantum@UniCA) connected with the MéO station for testing entanglement distribution prototyping, including end-to-end QKD from a satellite to an end user in an urban area, and demonstrating a QKD service in a three-node network with two QKD protocols (space-to-ground BB84 and ground-to-ground BBM92). The terrestrial network will allow the secured transmission of the Eagle-1 QKD key (shared with MéO station) to the end user in the city of Nice. A cross activity with other selected project will allow to use Eagle-1 as a trusted node to share a key with a ground station located in other countries in Europe (Romania, Greece, Spain, or Poland).



*Final QKD
Use Case*

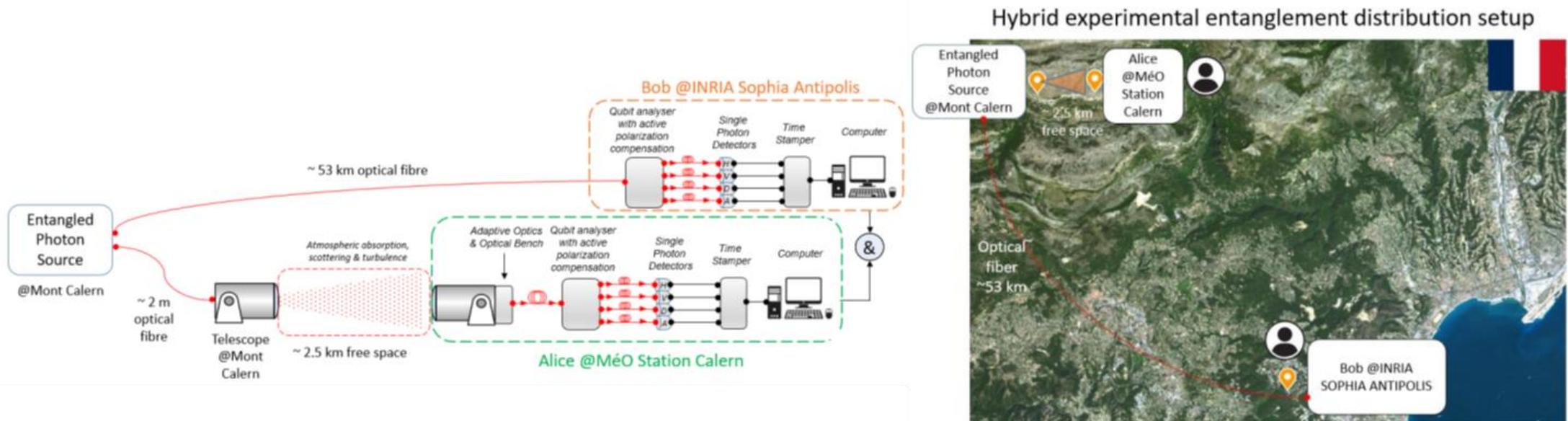


Projets spatiaux : QRUSOE

OBJECTIVE 3 (QIN – VALIDATION STEP FOR QINSAT)

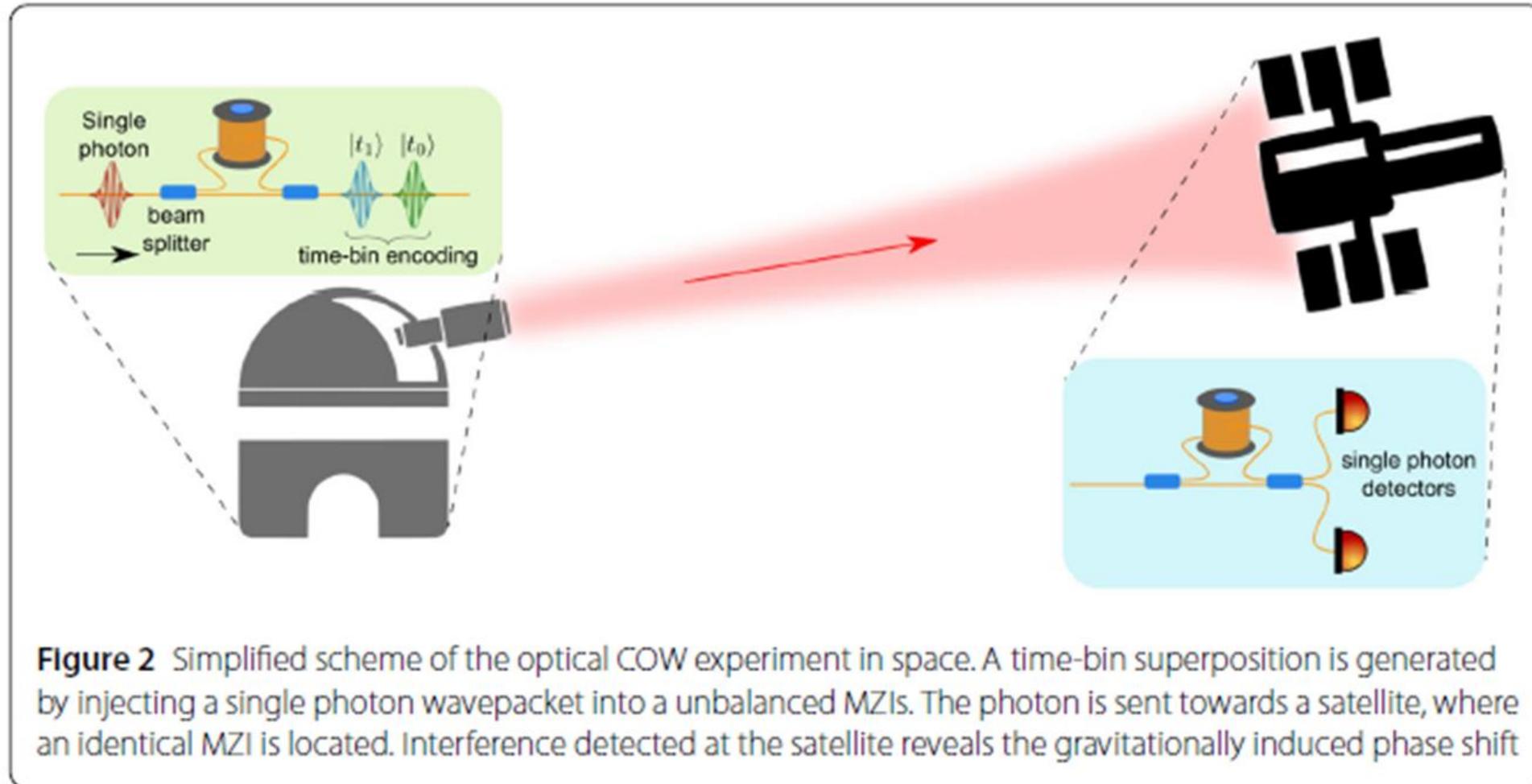
An **entangled distribution experiment** with hybrid channels (one ~2.5 km free space and one ~53 km fibre channel) will allow the prototyping of a future space-compatible entangled photon source with the upgraded MéO station.

This field trial will allow the derisking of the future QINSAT wavelength plan, channel impairment compensation, optical time-synchronization, optical flow isolation, single mode fibre coupling with the adaptive optics module, quantum analyser and filtering techniques for night and daylight operations. This step will validate all the critical functions in an operational environment for the MéO station for its use for the foreseen QINSAT mission around 2030. The source will be located at the Mont Calern, Alice at the MéO station and Bob at INRIA Sophia Antipolis (France).



Projets spatiaux : ESA-NovaMoon, 2031

Colella, Overhauser and Werner (COW) experiment



Conclusion

- Un réseau fibré quantique opérationnel en Côte d'Azur
- Un TestBed free space en cours de développement
- Travaux en cours :
 - Synchronisation des nœuds
 - Amélioration de l'efficacité de couplage & diminution des pertes
 - Couplage Communication optique Free-Space classique & quantique

Thanks for your attention







