

# Kick-off meeting REFIMEVE+

27-28 mai 2013

Institut Galilée – Université Paris 13



# Les enjeux scientifiques de REFIMEVE+

**C. Chardonnet**

*Coordinateur scientifique et technique*

Laboratoire de Physique des Lasers (LPL),  
UMR 7538 CNRS/Paris 13, Villetaneuse



# En 20 ans, plusieurs révolutions dans le domaine de la métrologie temps/fréquence

- **1993** utilisation des atomes froids en métrologie des fréquences : première fontaine atomique
  - exactitude relative de l'étalon primaire :  $10^{-14}$  → quelques  $10^{-16}$
  - Nouvelles générations d'étalons dans le domaine optique
  - Horloges optiques à ion refroidi :  $\text{Hg}^+$   $1,5 \cdot 10^{-17}$  ;  $\text{Al}^+$   $8 \cdot 10^{-18}$
  - Horloges optiques à atomes neutres (dans des réseaux optiques)  
En France, Sr et Hg. Aujourd'hui, quelques  $10^{-16}$ . Potentiel à  $10^{-17}$
- **1998** développement des lasers femtoseconde pour la métrologie des fréquences : les peignes de fréquence  
(Prix Nobel de Physique 2005 : T. Hänsch, J.L. Hall)
  - Permet simplement le raccordement des fréquences dans tout le spectre électromagnétique des radiofréquences au domaine UV.
  - a « démocratisé » la métrologie des fréquences. Versatilité d'utilisation, variété d'expériences possibles et accessibles à de nombreux laboratoires.

# Depuis 2004, nouvelle révolution : Le défi de la dissémination d'une fréquence ultrastable

- Comparaison d'horloges distantes
  - Métrologie T&F
  - recherche d'une variation des constantes fondamentales
  - test de physique fondamentale, relativité
- Liens satellitaires (GPS ou two-way - TWSTFT)
  - $10^{-11}$  (1s) -  $10^{-15}$  (1 jour)
- Liens optiques fibrés
  - Rapides développements au cours des 10 années passées
  - Transfert de la phase optique d'un laser ultrastable à  $1.55 \mu\text{m}$

**Lab A**  
*Optical clocks*



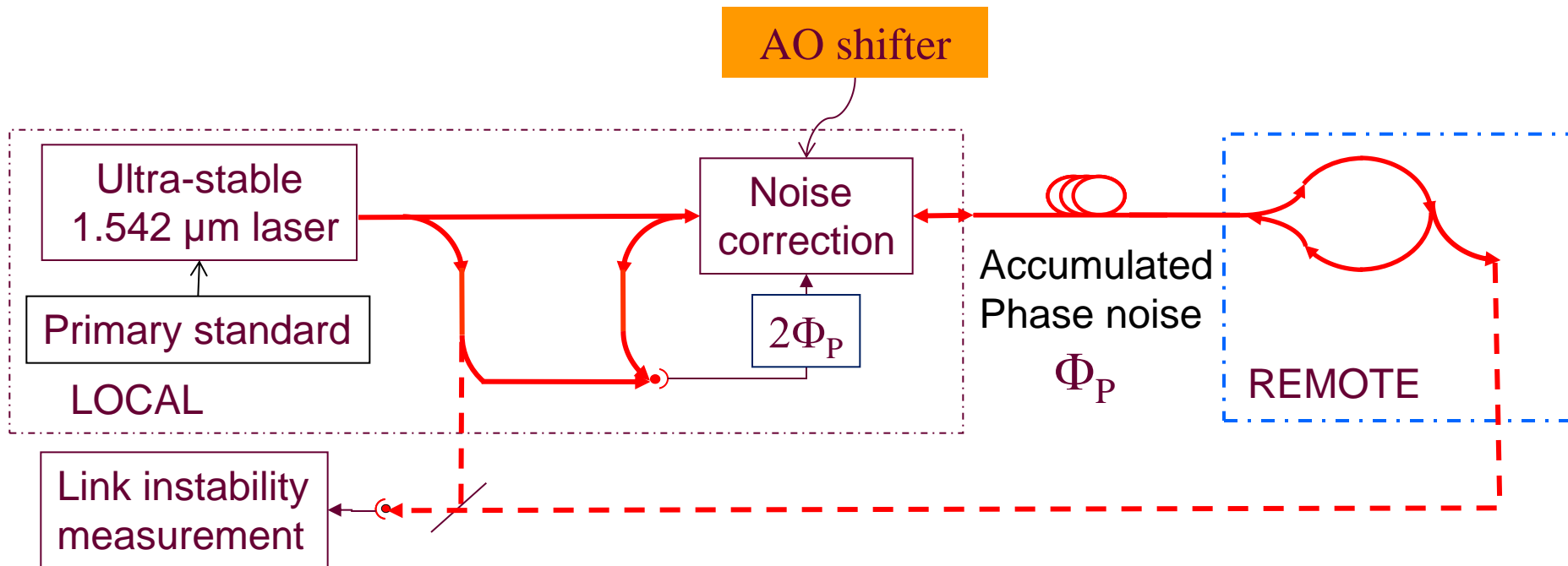
**Lien optique fibré**

**Lab B**  
*Physics or T/F experiment*

Dès les années 90, lien fibré de 3 km entre le SYRTE et le LKB (B. Cagnac)

# Schéma simplifié d'un lien optique stabilisé

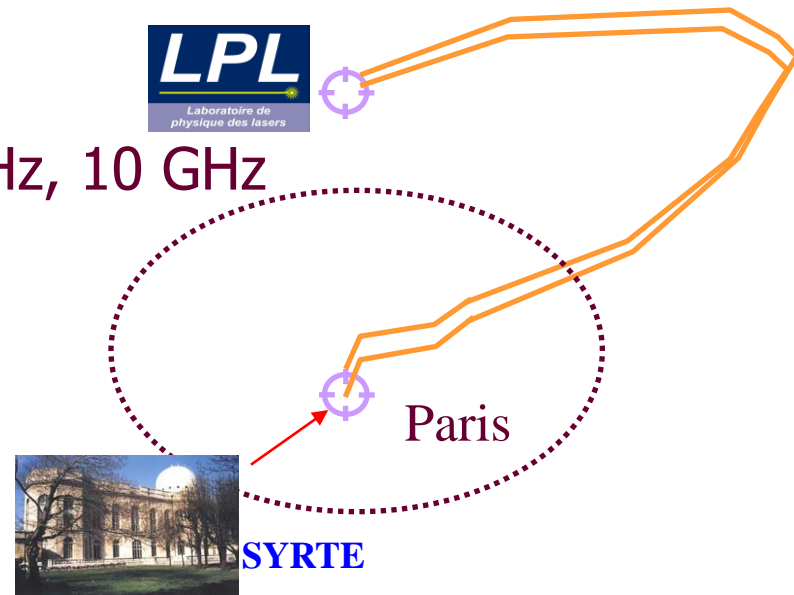
- Fluctuation du délai de propagation dans le transfert de fréquence
- Compensation du bruit par une méthode aller-retour



- Démonstration avec 2 fibres parallèles ou par une fibre en boucle.

# Le lien optique LPL-SYRTE

- 2 fibres "noires" parallèles de 43 km à partir du réseau de France Télécom = un lien optique de 86 km
  - plusieurs sections de fibres soudées ensemble
  - Pertes de 20 dB sur 86 km
- Transfert RF et MW: 100 MHz, 1 GHz, 10 GHz
- Transfert de la phase optique

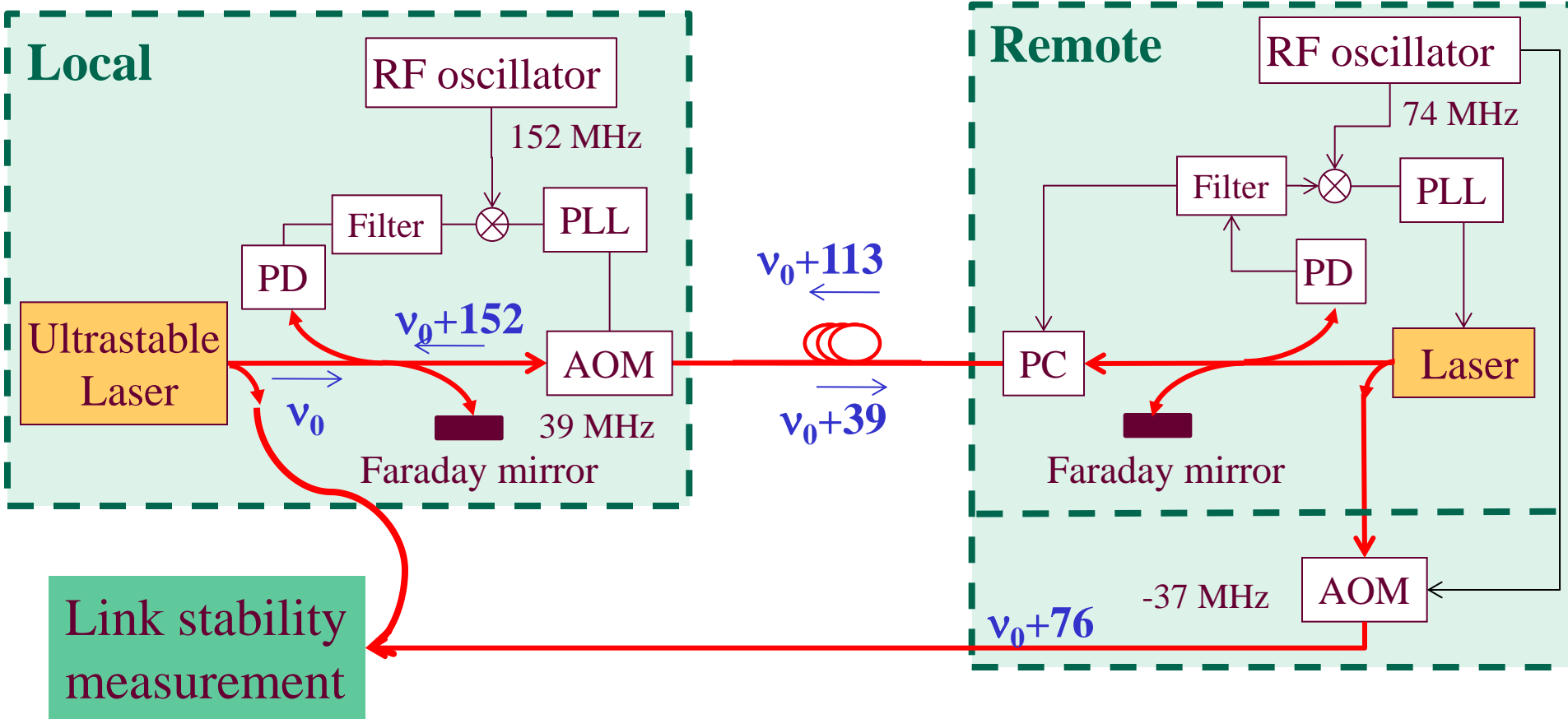


# Etat de l'art

- JILA-NIST optical carrier phase and frequency comb transfer
- SYRTE - LPL (Fr) 540 km optical carrier phase
- PTB-MPQ-Hanover (Germany) 920 km optical carrier phase
- NICT, NMIJ, UT (Japan) optical carrier phase (120 km clock comparison)
- NPL (GB) frequency comb, optical carrier phase
- NIM, SIOM Shanghai (China) microwave optical link
- *INRIM, LENS (Italy) optical carrier phase*
- *UWA, NMI (Australia) optical carrier phase & microwave*

- Le transfert sur des distances de 100-200 km est bien maîtrisé
- Le défi actuel : transfert sur des échelles continentales

# Principe du lien optique stabilisé

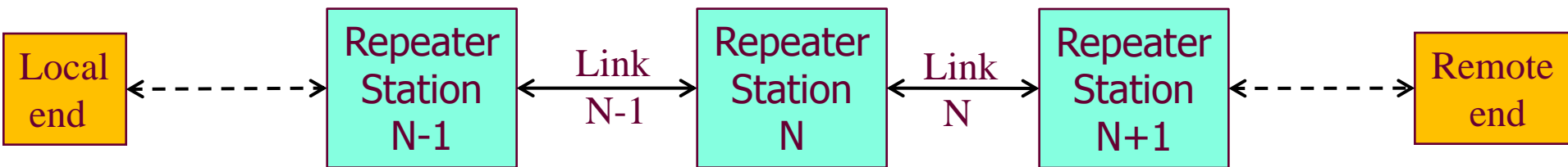


Lock autonome (microcontrôleur), pas besoin d'horloge RF stable au niveau du laboratoire utilisateur, régénération optique (PLL), contrôleur automatique de polarisation.



# Lien optique sur de longues distances

- **Approches multi-segments :**
  - Le lien est divisé en plusieurs segments, en fonction du bruit et des pertes de la ligne
    - délais plus courts
    - plus grande bande passante et meilleure réjection du bruit de phase
- **Il faut des stations répéteurs (ou de régénération)**
  - La station N : renvoie le signal vers station N-1, amplifie et filtre, corrige le bruit du lien suivant N



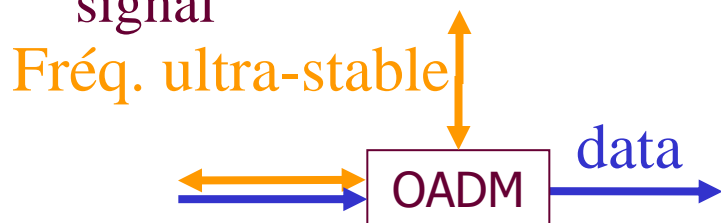
# Stratégie pour un réseau continental

- Problème principal : la disponibilité des fibres  
Les fibres dédiées sont difficiles à obtenir et sont coûteuses
- Utilisation des réseaux publics de télécommunication
  - Réseaux déjà existants et potentiellement moins onéreux
  - Méthode dite DWDM – Dense Wavelength-Division Multiplexing  
Transmission simultanée à deux longueurs d'onde ie deux canaux différents dans la même fibre :
    - Données internet
    - Signal ultra-stable
  - Canal noir (canal 44) au lieu de fibre noire !



- Collaboration avec RENATER

- OADM (optical add drop multiplexer) pour introduire ou extraire un signal

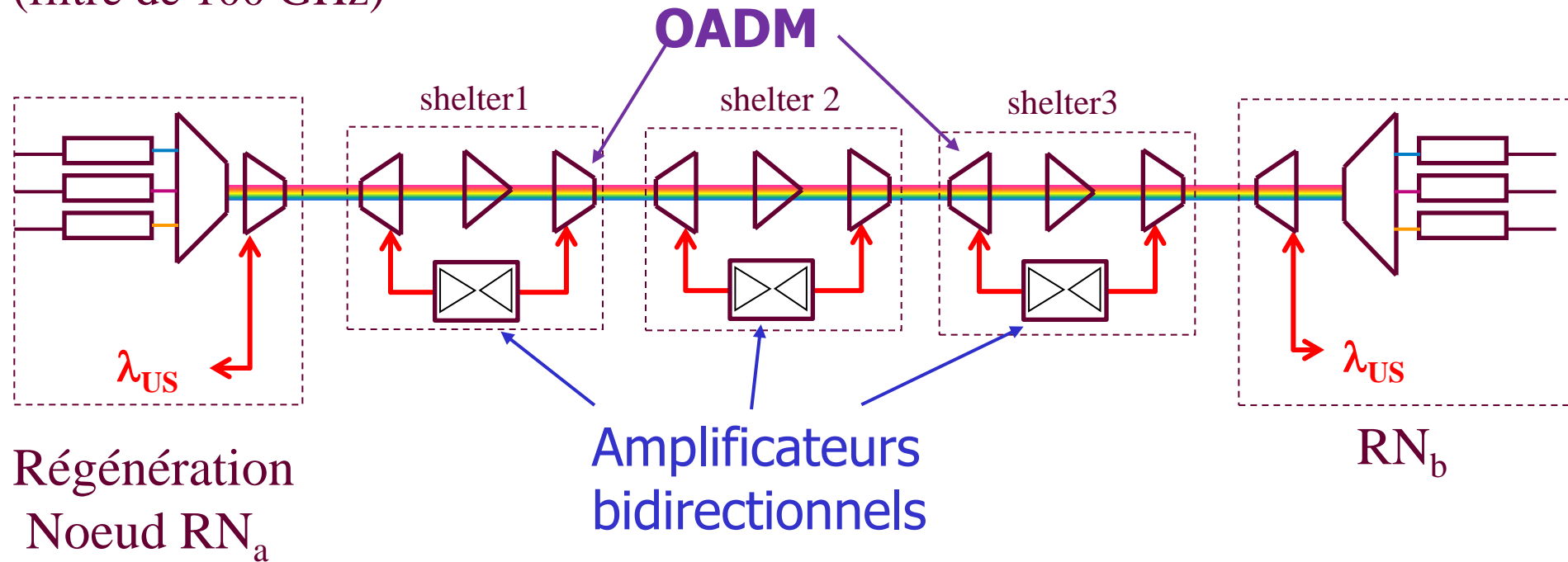
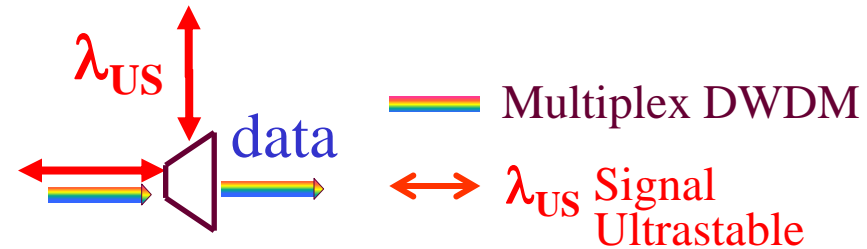


- Composants commerciaux (100 GHz)
- Pertes < 1dB, Isolation > 25 dB
- Bidirectionnel

# Schéma typique d'un lien optique multiplexé

OADM (optical add drop multiplexer)

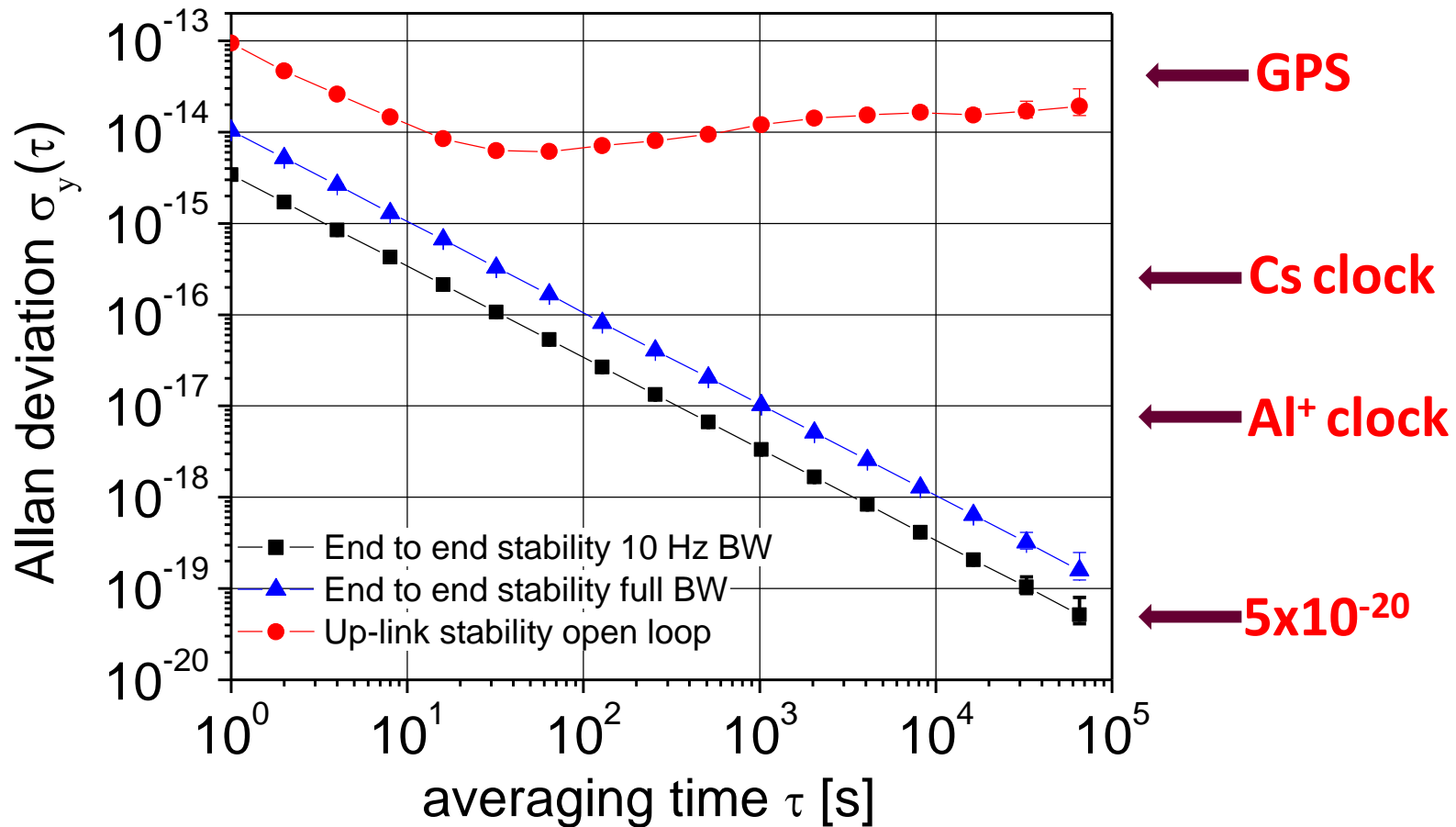
pour ajouter ou extraire un signal  
(filtre de 100 GHz)



Point clé: propagation **bidirectionnelle** continue (pour corriger le bruit)

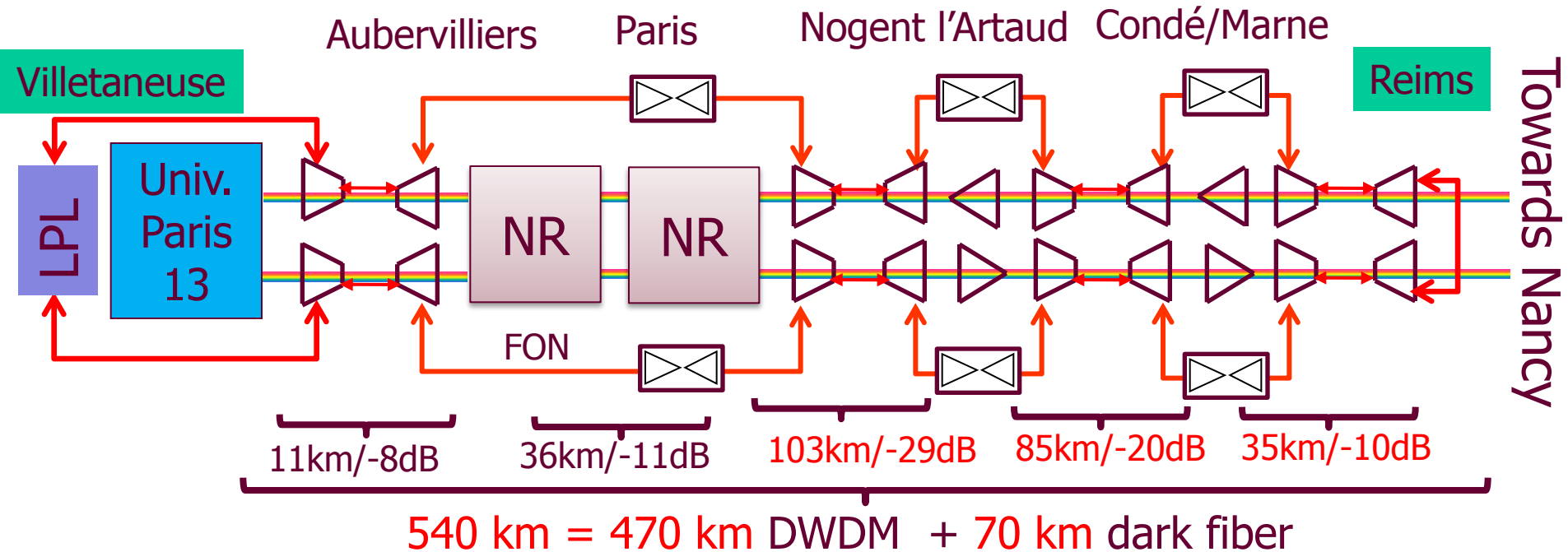
# Transfert de fréquence optique via le réseau internet de RENATER

**LPL – Nogent L'Artaud – LPL : 2x150 km=300 km (avec une station)**



O. Lopez et al, Opt. Express, 2010, **18**, 16849-16857.

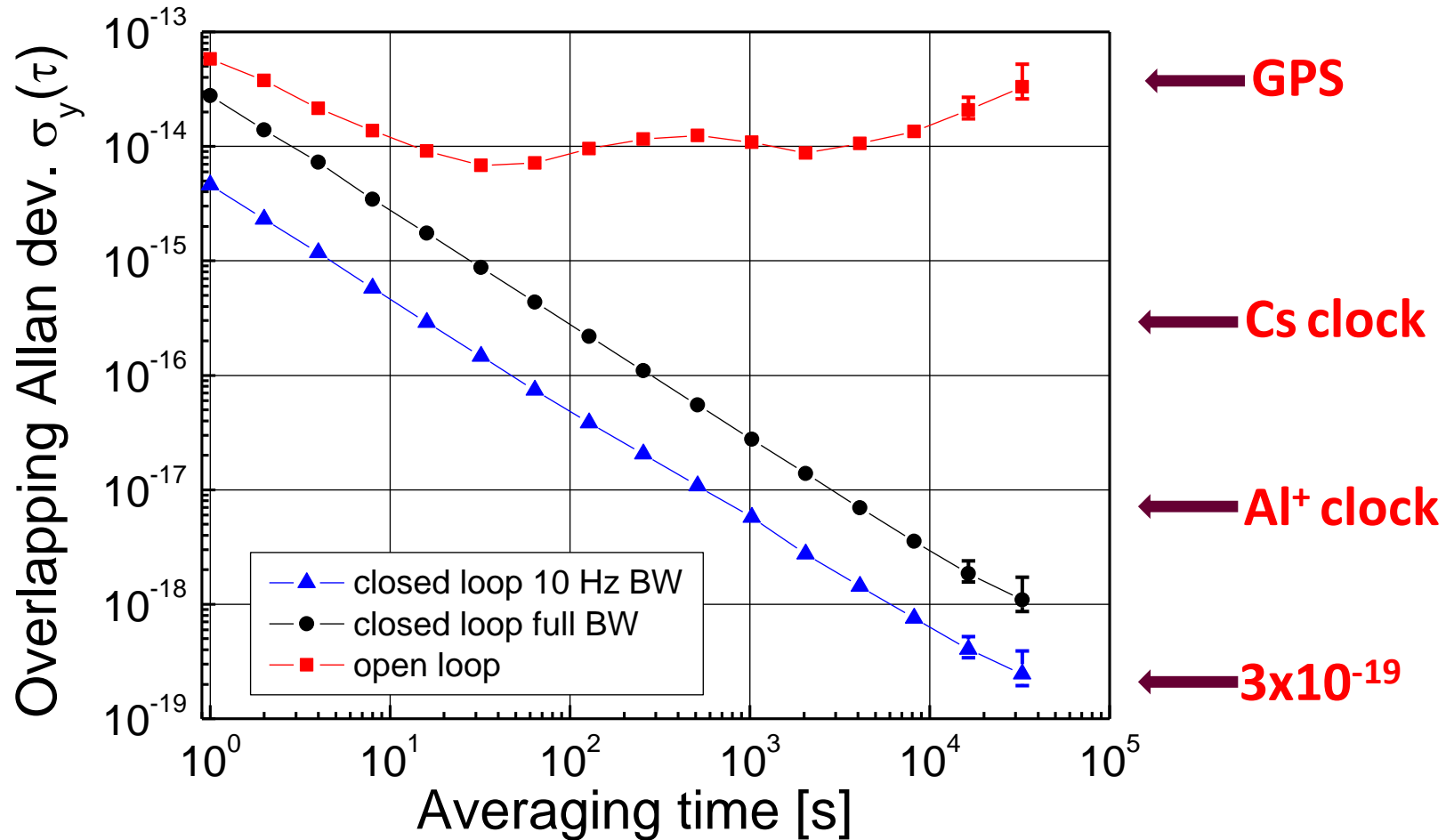
# Lien optique de 540 km LPL-Reims-LPL



- US signal: 1542,14 nm (ITU 44) /Data: 1542.94 + 1543.73 nm (ITU 43 & 42)
- 16 OADMs
- One way attenuation > 150 dB , 6 bidirectional EDFA (gain ~ 100 dB)

# Transfert de fréquence optique via le réseau internet de RENATER

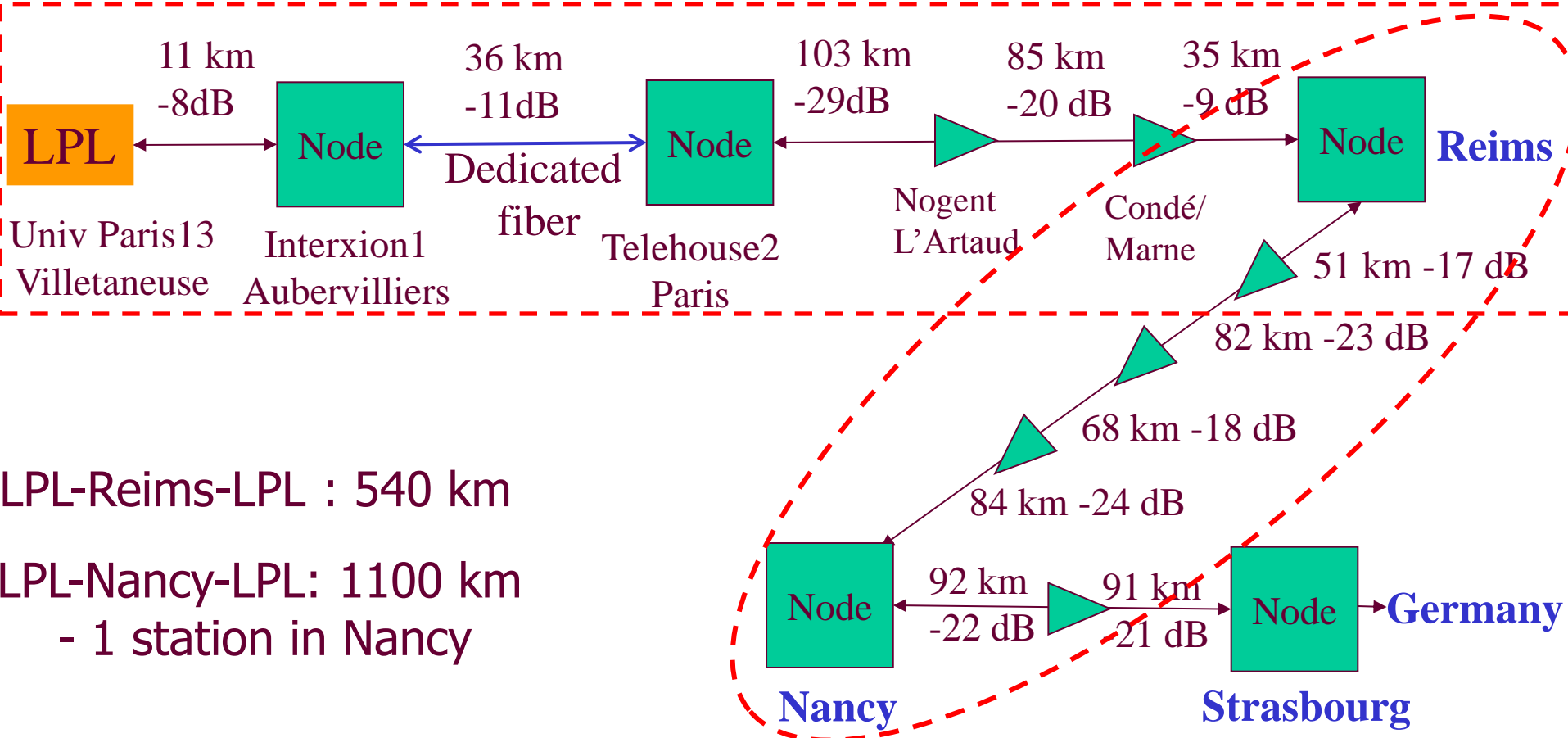
Villetaneuse – Reims - Villetaneuse : 540 km (sans répéteur)



# En projet : lien vers l'Allemagne

Lien multiplexé jusqu'à Strasbourg ~750 km (- 230 dB)

## Paris region

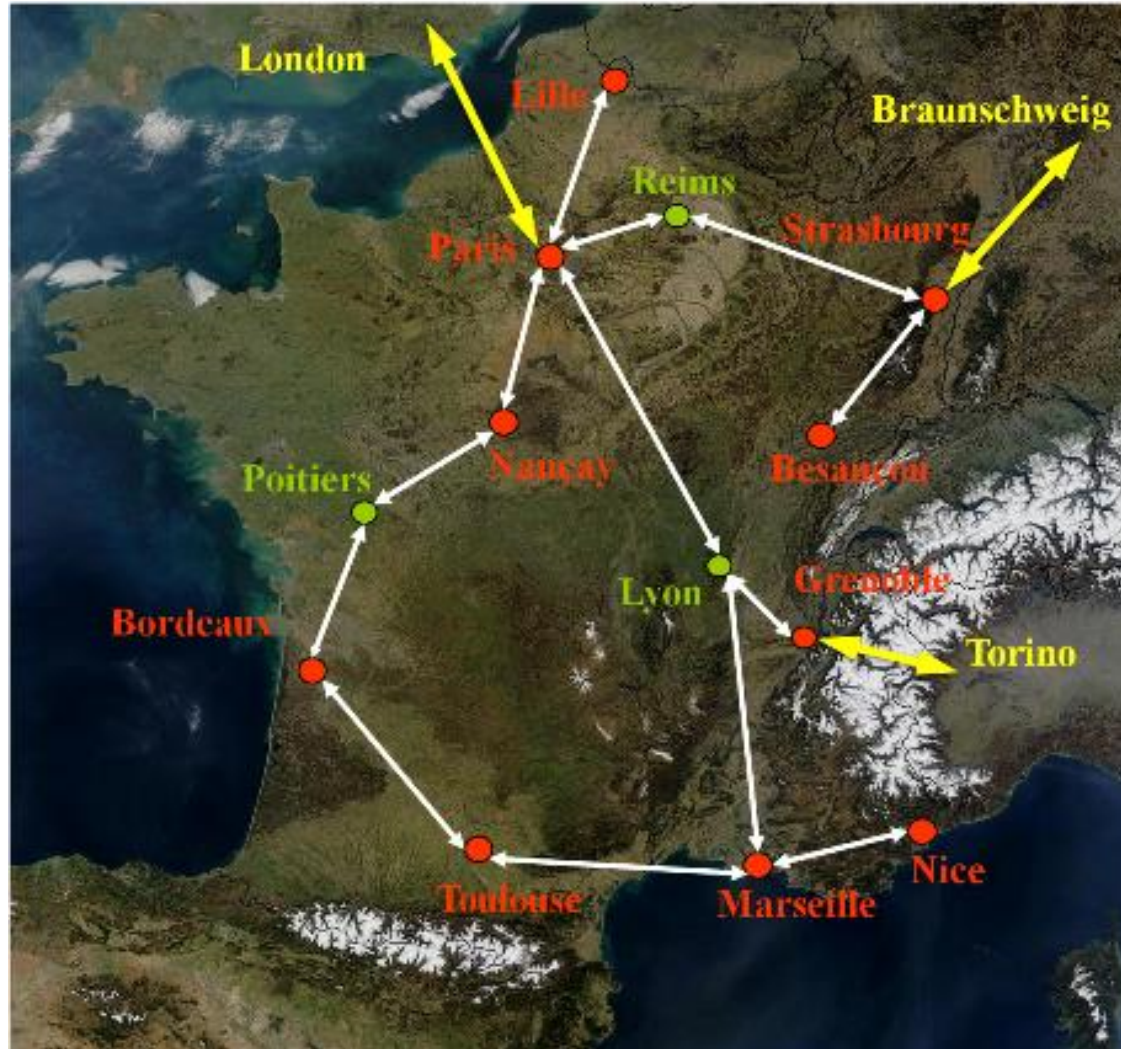


# Le transfert de temps

- Transfert de temps entre INMs par satellite
  - GPS ou TWSTT (Two Way Satellite Time Transfer)
    - Précision  $\sim$ ns, stabilité  $\sim$ 100ps
- Transfert de temps sur fibre
  - PTB 140 km TWTT, précision  $\sim$ 100ps, stabilité  $\sim$ 10ps
  - Polonais 60 km, précision  $\sim$ 10ps, stabilité  $\sim$ 1ps
- Réalisé sur la liaison LPL-Reims aller-retour (540 km)
  - TWTT simultané avec le transfert de fréquence
  - précision  $\sim$ 100ps, stabilité  $\sim$ 10ps



# « Réseau Fibré Météorologique à Vocation Européenne »



Financement 2012-2020

# 21 partenaires dont 18 labos CNRS

- Un noyau dur

- #1 LPL, Paris 13, coordinateur
- #2 SYRTE, Observatoire de Paris/LNE
- #3 RENATER
- #21 IDIL, PME

- Des utilisateurs

- #4 LKB, ENS/UPMC
- #5 LCF, IOGS
- #6 ISMO, UPSUD
- #7 APC, UPDiderot
- #8 LPMAA, UPMC
- #9 LAC, CNRS/UPSUD
- #10 PIIM, Marseille
- #11 LCAR, Toulouse
- #12 UTINAM, Besançon
- #13 FEMTO-ST, Besançon
- #14 USN, Nancay
- #15 PhLAM, Lille
- #16 LP2N, IOGS-Bordeaux
- #17 GEOAZUR, Nice
- #18 ARTEMIS, Nice
- #19 LIPhy, Grenoble
- #20 CST-CNES, Toulouse

11 INP, 4 INSU, 2 INSIS, 1 IN2P3, 1 GIP, 1 EPIC, 1 PME

Equipement structurant pour le Labex FIRST-TF

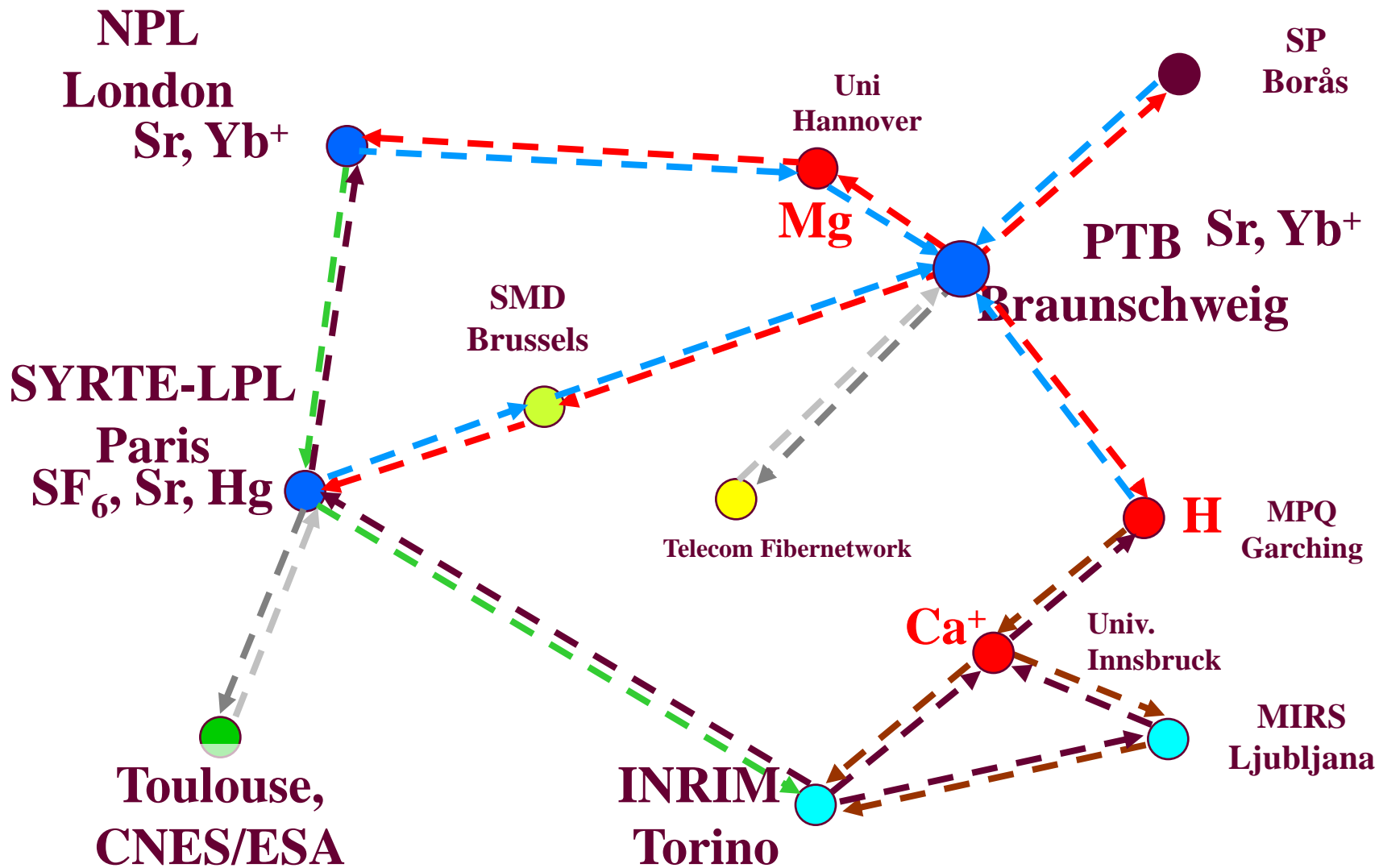


# Enjeu industriel

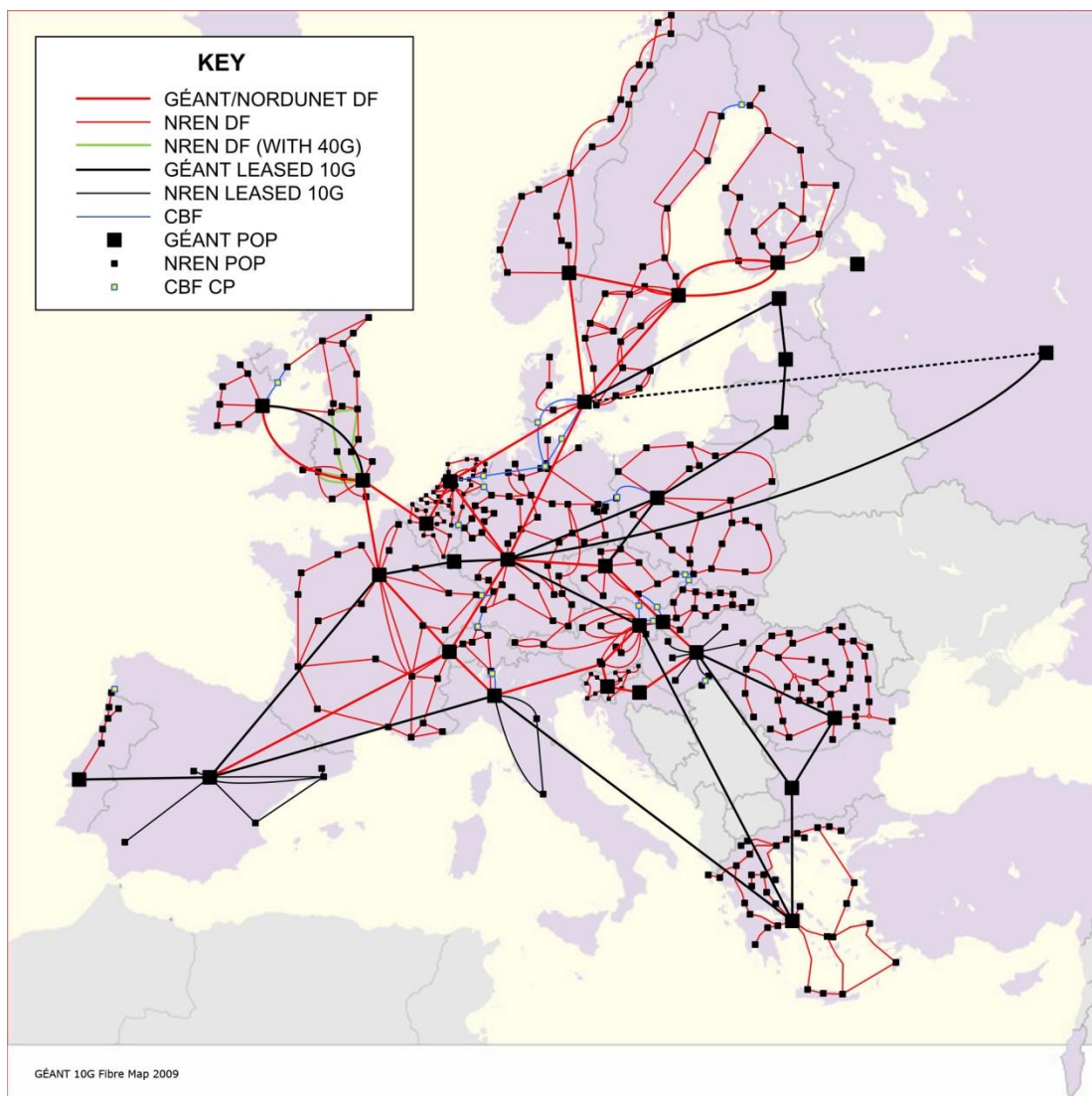
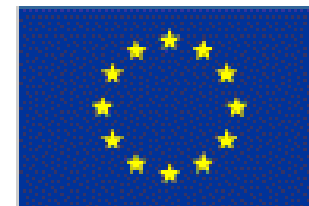


- Transfert de savoir-faire à une PME IDIL (accord de confidentialité, accord de collaboration)
- Embauche d'un premier ingénieur qui sera formé par nos soins
- Réalisation de prototypes industriels des équipements (stations de régénération, amplificateurs, système de supervision)
- Fabrication et installation par IDIL des équipements optoélectroniques sur le réseau REFIMEVE+
- Le suivi en routine du réseau fibré métrologique sera assuré par RENATER
- Un nouveau marché potentiel au niveau international

# Enjeu européen : Réseau fibré continental pour des comparaisons d'horloges optiques



JRP NEAT-FT coordonné par le PTB



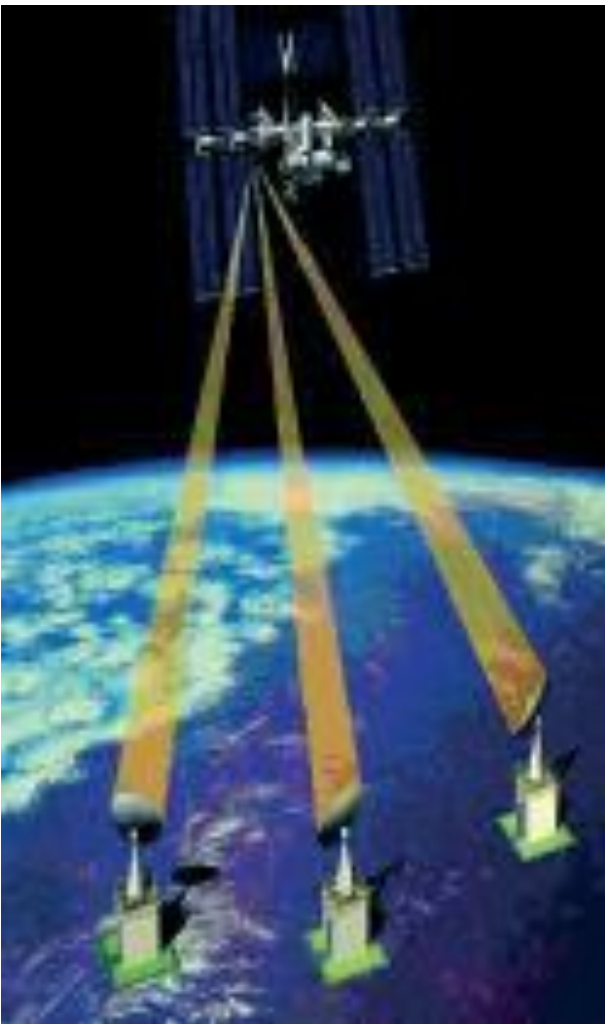
# DE NOMBREUSES APPLICATIONS

# Enjeux scientifiques principaux

- Comparaisons internationales d'étalons de fréquence  
→ Redéfinition de la seconde
- Mesures de différentes constantes fondamentales :  $R_y$ ,  $h/m, \dots$  → Redéfinition du SI
- Amélioration du TAI par raccordement des horloges terrestres et des tests de relativité générale des projets PHARAO-ACES (raccordement au CNES)
- Tests expérimentaux des théories au-delà du modèle standard : tests de variations spatio-temporelles de constantes fondamentales



**ACES (Atomic Clock in Space) is an ESA payload which will fly on-board the ISS (International Space Station) as an External Payload (2012-2015) →(2015-2018)**

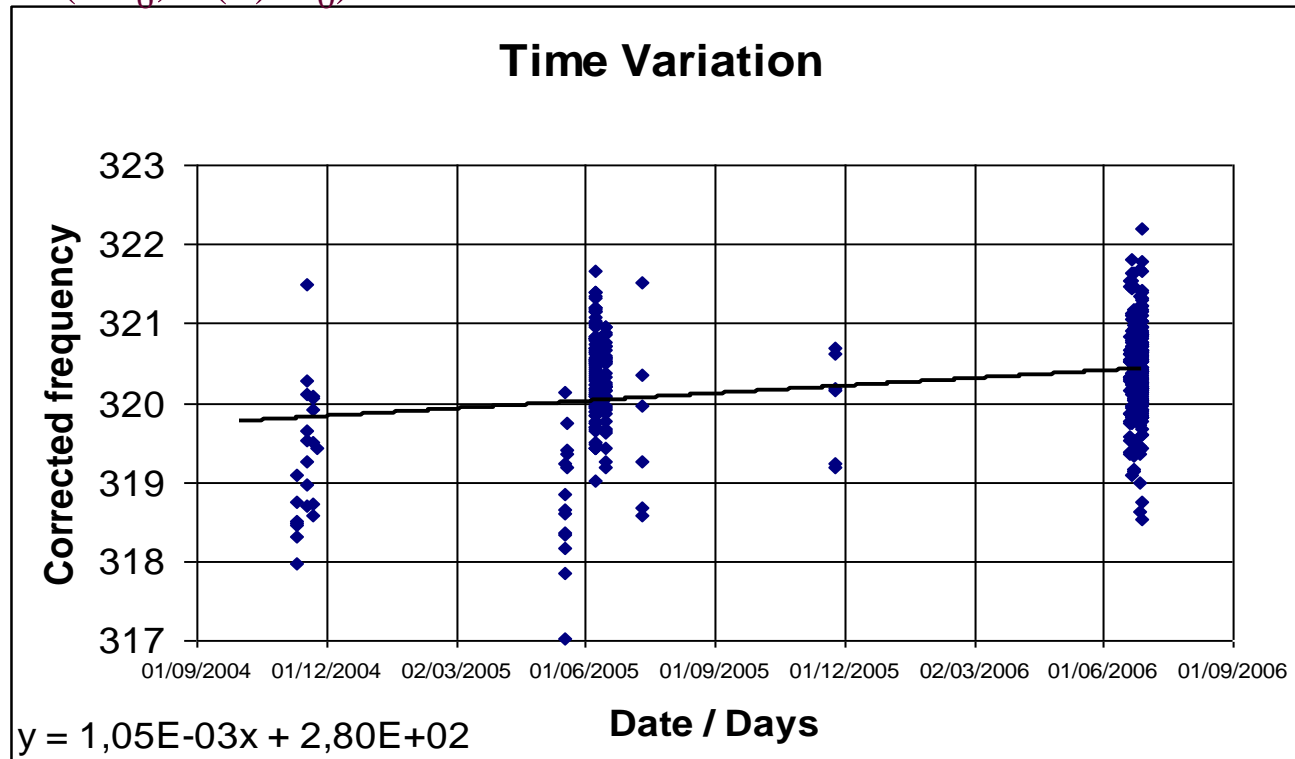




# Variation temporelle de la fréquence absolue d'une raie rovibrationnelle de SF<sub>6</sub>

486 individual measurements during 20 months

$$\nu(\text{SF}_6, P(4) E_0) = 28\,412\,764\,347\,320.26 \pm 0.76 \text{ Hz}$$



$$\frac{\partial \ln(SF_6 / C_s)}{\partial t} = (1.4 \pm 3.2) \times 10^{-14} \text{ yr}^{-1}$$

# Upper limit on $m_p/m_e$ time variation

Marion <i>et al</i> / Syrte /2003	Cs / Rb	$(0.2 \pm 7.0) \times 10^{-16} \text{ yr}^{-1}$	$\left( \frac{\mu_{\text{Cs}}}{\mu_{\text{Rb}}} \right) \alpha^{0.49}$
Bize <i>et al</i> / Nist / 2003	Cs / Hg <sup>+</sup>	$< 7.0 \times 10^{-15} \text{ yr}^{-1}$	$\frac{\mu_{\text{Cs}}}{\mu_{\text{B}}} \alpha^6$
Fisher <i>et al</i> / MPQ / 2004	Cs / H	$(3.2 \pm 6.3) \times 10^{-15} \text{ yr}^{-1}$	$\frac{\mu_{\text{Cs}}}{\mu_{\text{B}}} \alpha^{2.83}$
Peik <i>et al</i> / PTB/ 2004	Cs / Yb <sup>+</sup>	$(-1.2 \pm 4.4) \times 10^{-16} \text{ yr}^{-1}$	$\frac{\mu_{\text{Cs}}}{\mu_{\text{B}}} \alpha^{1.95}$
Amy <i>et al</i> /LPL	Cs/SF6	$(-1.4 \pm 3.2) \times 10^{-14} \text{ yr}^{-1}$	$\frac{\mu_{\text{Cs}}}{\mu_{\text{B}}} \sqrt{\frac{m_p}{m_e}} \alpha^{2.83}$

$$\frac{\partial \ln(m_p/m_e)}{\partial t} = (-3.8 \pm 5.6) \times 10^{-14} \text{ yr}^{-1} \text{ Model-independent}$$

A. Shelkovnikov, R. J. Butcher, C. Chardonnet, and A. Amy-Klein,  
 Phys. Rev. Letters 100, 150801 (2008)

# Autres enjeux scientifiques

- Mesure des fluctuations de la rotation de la Terre par effet Sagnac
- Applications géodésiques possibles. Meilleure définition du géoïde. Actuellement, variation du niveau des océans connu à  $\pm 2$  m. Potentiel gravitationnel peut être contrôlé à  $\pm 10$  cm
- Référencement de toutes les expériences d'un laboratoire grâce à un laser femtoseconde.
- Spectroscopie moléculaire pour la physique de l'atmosphère par laser femtoseconde
- Sécurisation du GNSS.
- Synchronisation des expériences des grands accélérateurs
- La possibilité de réaliser des expériences inter-laboratoires sans déplacement d'équipement...

UNIVERSITÉ PARIS 13  
NORD

RENATER  
CONNECTEUR DE SAVOIRS

cnrs  
dépasser les frontières  
www.cnrs.fr

l'Observatoire  
de Paris

LNE  
Le progrès, une passion à partager

UNIVERSITÉ  
PARIS  
SUD

UNIVERSITÉ  
PIERRE & MARIE CURIE  
LA SCIENCE A PARIS

INSTITUT  
D'OPTIQUE  
GRADUATE SCHOOL  
ParisTech

université  
PARIS  
DIDEROT  
PARIS 7

UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

CVS  
CACHAN

ensmm

UNIVERSITÉ  
JOSEPH FOURIER  
SCIENCES TECHNOLOGIE MÉDECINE



UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ  
FC

Université  
Nice  
Sophia Antipolis

Université  
Lille1  
Sciences et Technologies

GRENOBLE  
UNIVERSITÉS

Aix\*Marseille  
université

Université  
Paul Sabatier  
TOULOUSE III

IRD  
Institut de recherche  
pour le développement

cnes  
CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

IDIL  
FIBRES OPTIQUES

Observatoire  
de la CÔTE d'AZUR