



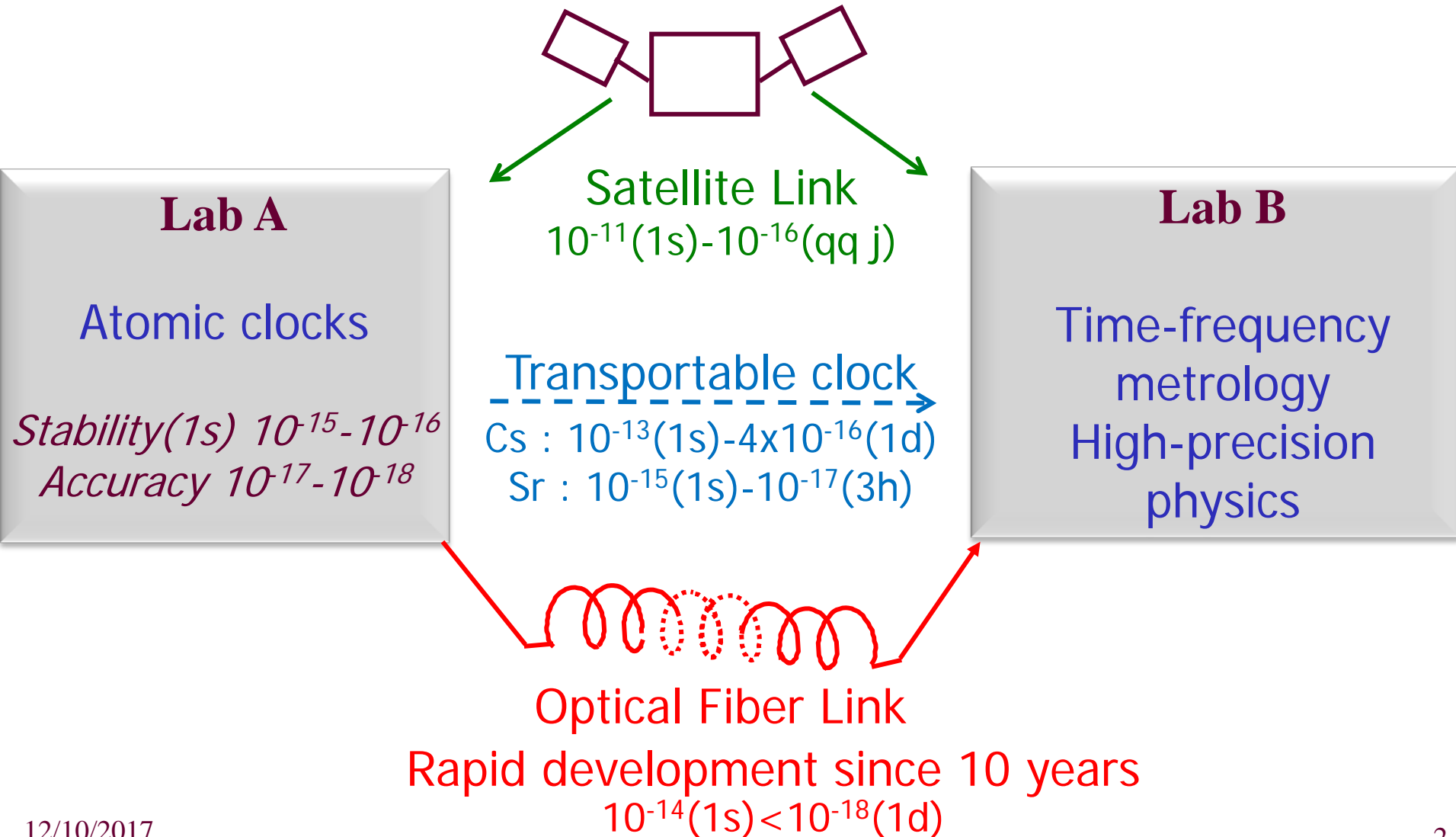
Transfert d'une référence ultrastable de fréquence par fibre optique

Anne Amy-Klein

Laboratoire de Physique des Lasers (LPL)

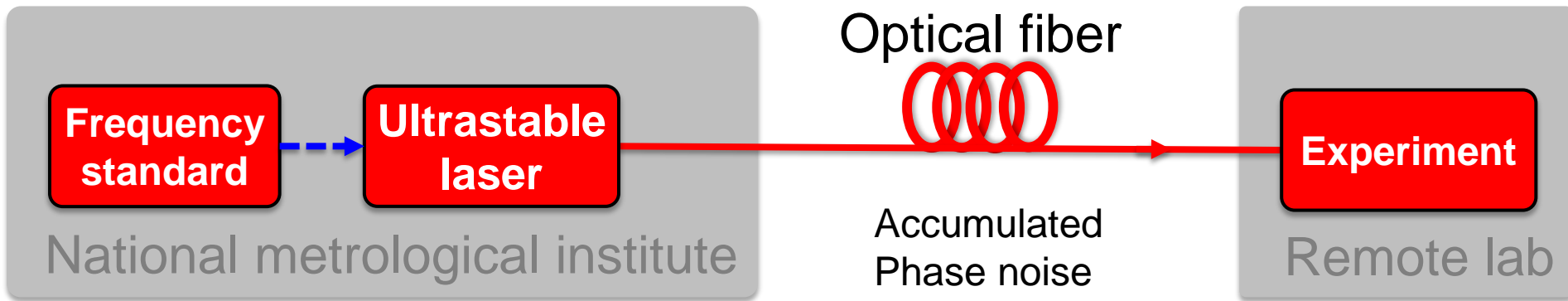
Université Paris 13, CNRS, France

Comment disséminer une fréquence ultrastable?



Transmission par fibre optique d'une référence de fréquence

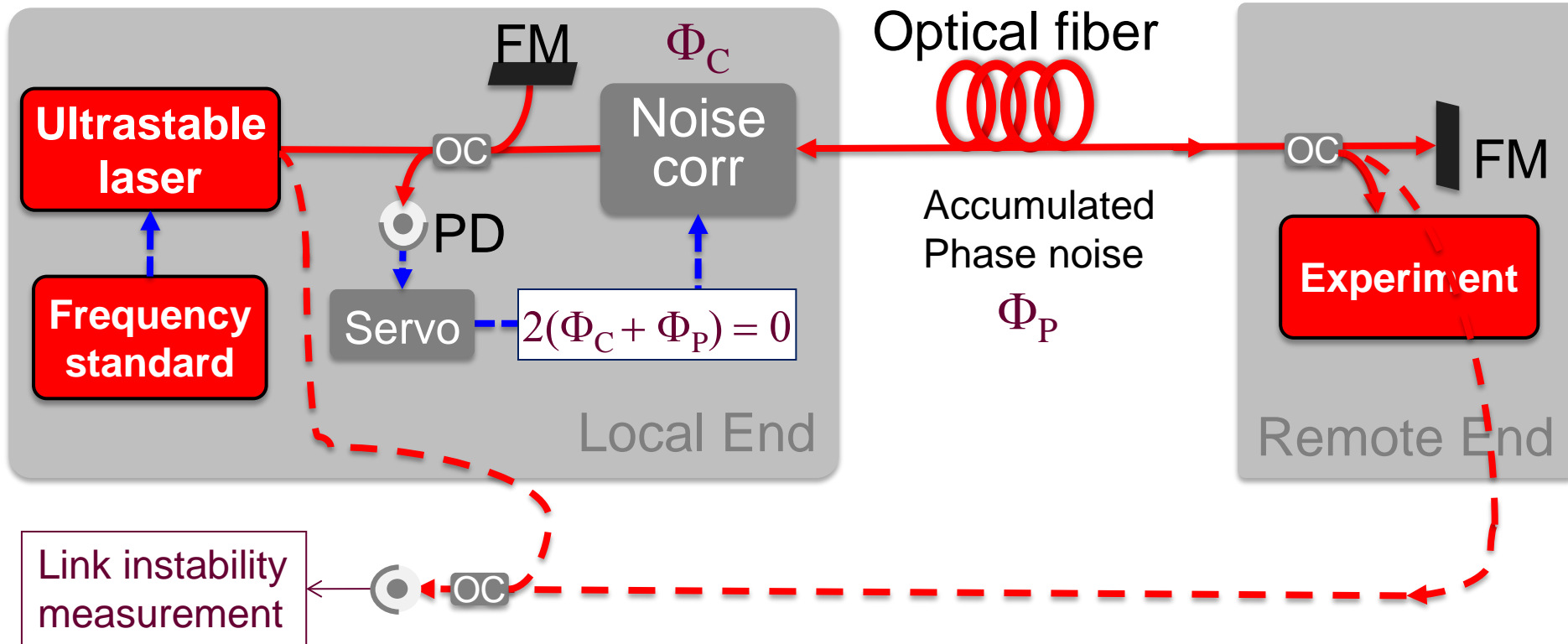
- Transfert direct d'une fréquence optique



- On peut aussi transférer une fréquence RF (par modulation d'amplitude du laser)
- Limitations :
 - Instabilités de fréquence du laser → laser ultra-stable
 - Bruit de propagation
 - Variations de chemin optique dans la fibre, liées aux instabilités acoustiques et thermiques

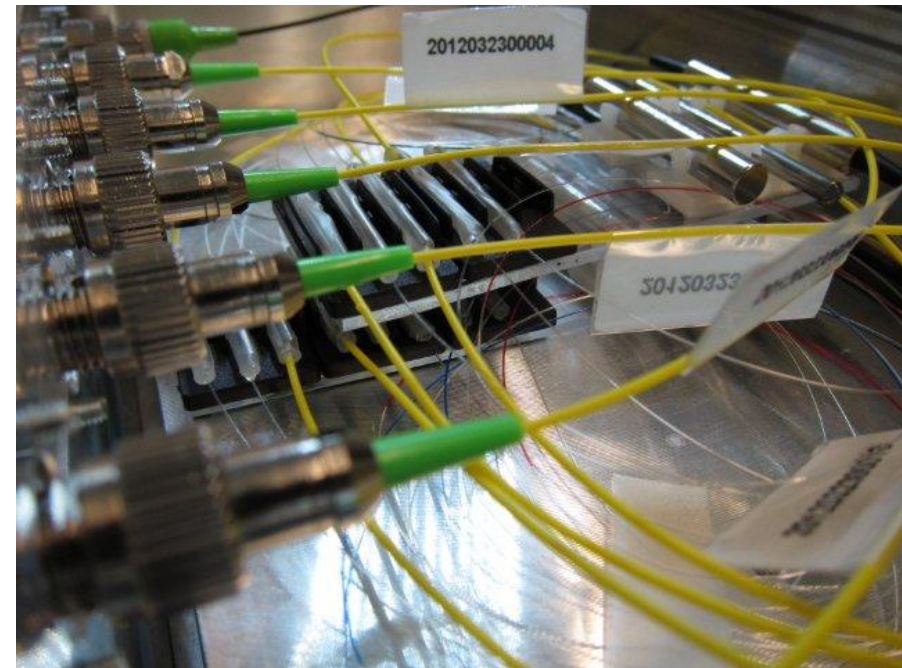
Compensation du bruit de propagation

- Fluctuations du délai de propagation
- Méthode « Round-trip » pour la correction de ce bruit



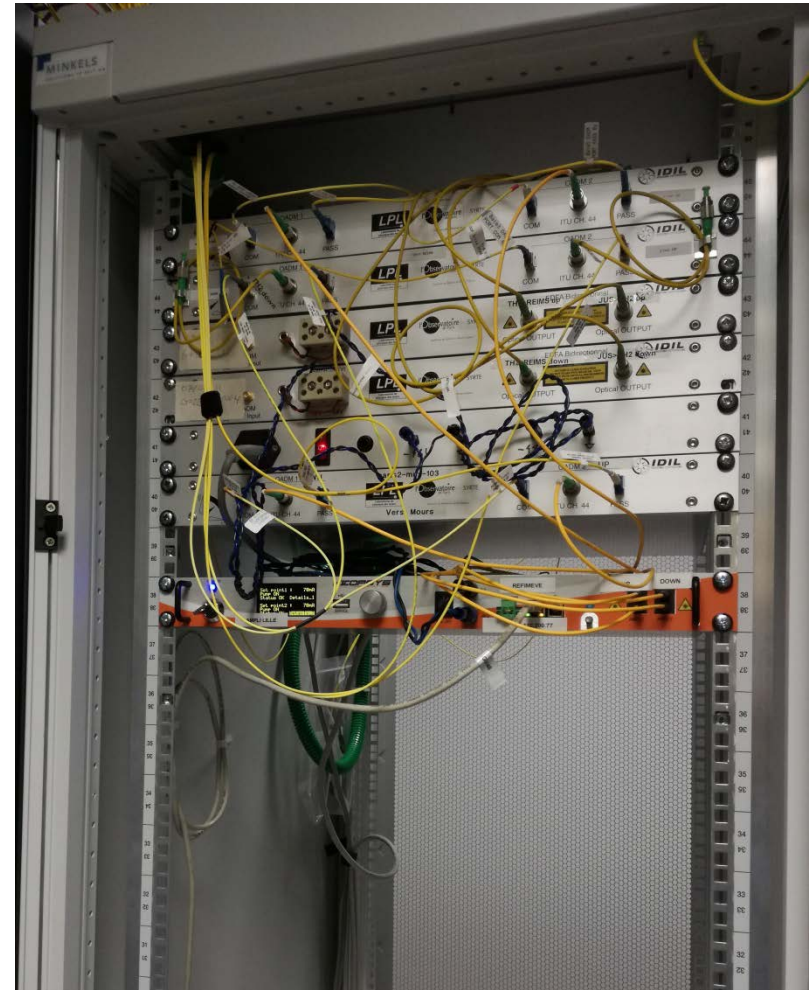
Les limites de ce transfert

- Délai de propagation $T=c/nL=v/L$ (0,5 ms pour 100 km)
 - Bande passante de correction limitée à $\approx 1/(4T)$ (500 Hz pour 100 km)
 - Amplitude de réjection du bruit limitée $\approx 1/(2\pi fT)^2$ (-55 dB @1 Hz pour 100 km)
- Bruits non réciproques
 - Correction efficace pour les bruits réciproques
 - Les chemins optiques non réciproques doivent être minimisés
 - Effets de polarisation ou puissance non réciproques : négligeables
 - Effet relativiste : la phase Sagnac change de signe avec le sens de propagation
 - Non corrigée par notre dispositif
 - Effets des marées terrestres attendus vers quelques 10^{-20}



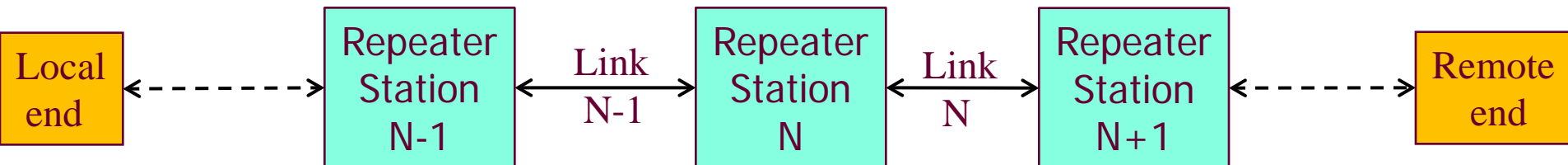
Développement de lien optique longue-distance

- Principales difficultés
 - Le bruit de la fibre : il peut varier de 2 ordres de grandeur selon l'environnement de la fibre (enterrée ou non)
 - Atténuation : des amplificateurs bidirectionnels sont nécessaires (Erbium-doped fiber amplifiers (EDFA) ou Brillouin amplifiers)
 - L'accès à la fibre et le coût !



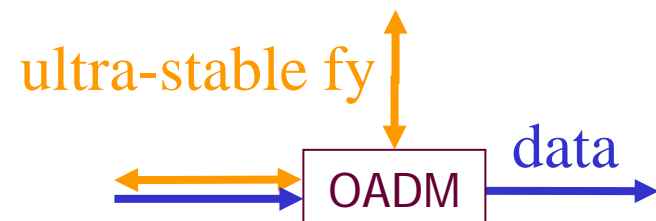
Lien optique longue distance

- Séparation du lien en plusieurs segments cascades
 - délai de propagation + court
 - meilleure réjection du bruit
- Développement de station régénératrice
 - Station Repeater N : envoie le signal vers la station N-1, amplifie et filtre le signal, corrige le bruit du lien suivant

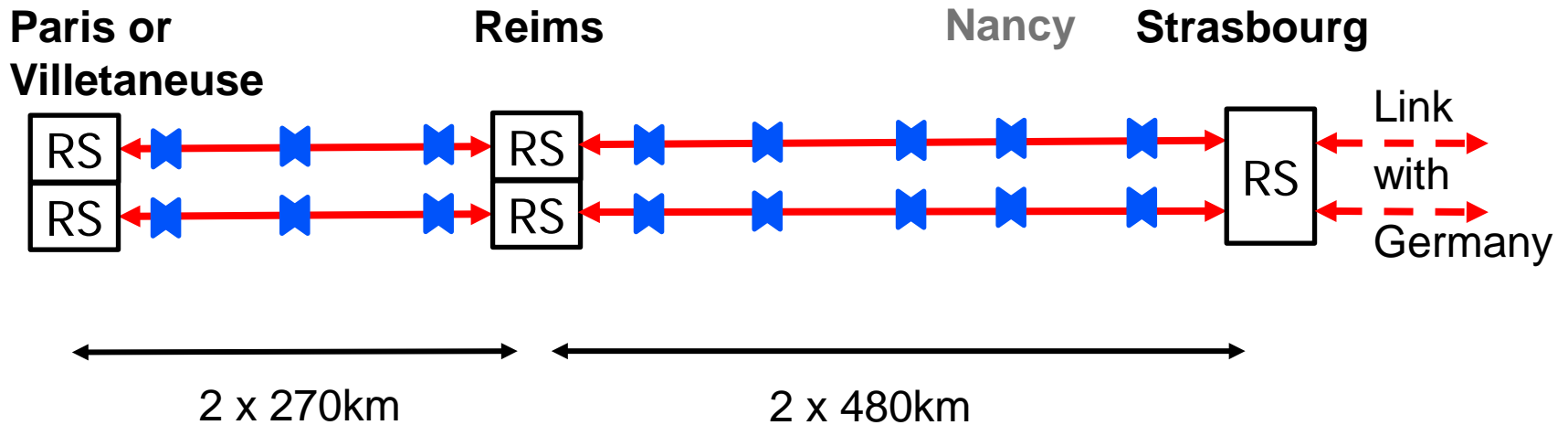


Accès au réseau académique national

- Utilisation d'un réseau public de télécommunications
 - Moins coûteux à long terme, car partage de la fibre avec d'autres utilisateurs
 - Transmission simultanée du signal métrologique et du flux de données numériques par Multiplexage en longueur d'onde (DWDM)
- Collaboration avec RENATER : le réseau académique national
- Des multiplexeurs de type OADM (optical add drop multiplexer) sont utilisés pour insérer et extraire le signal ultrastable du flux DWDM



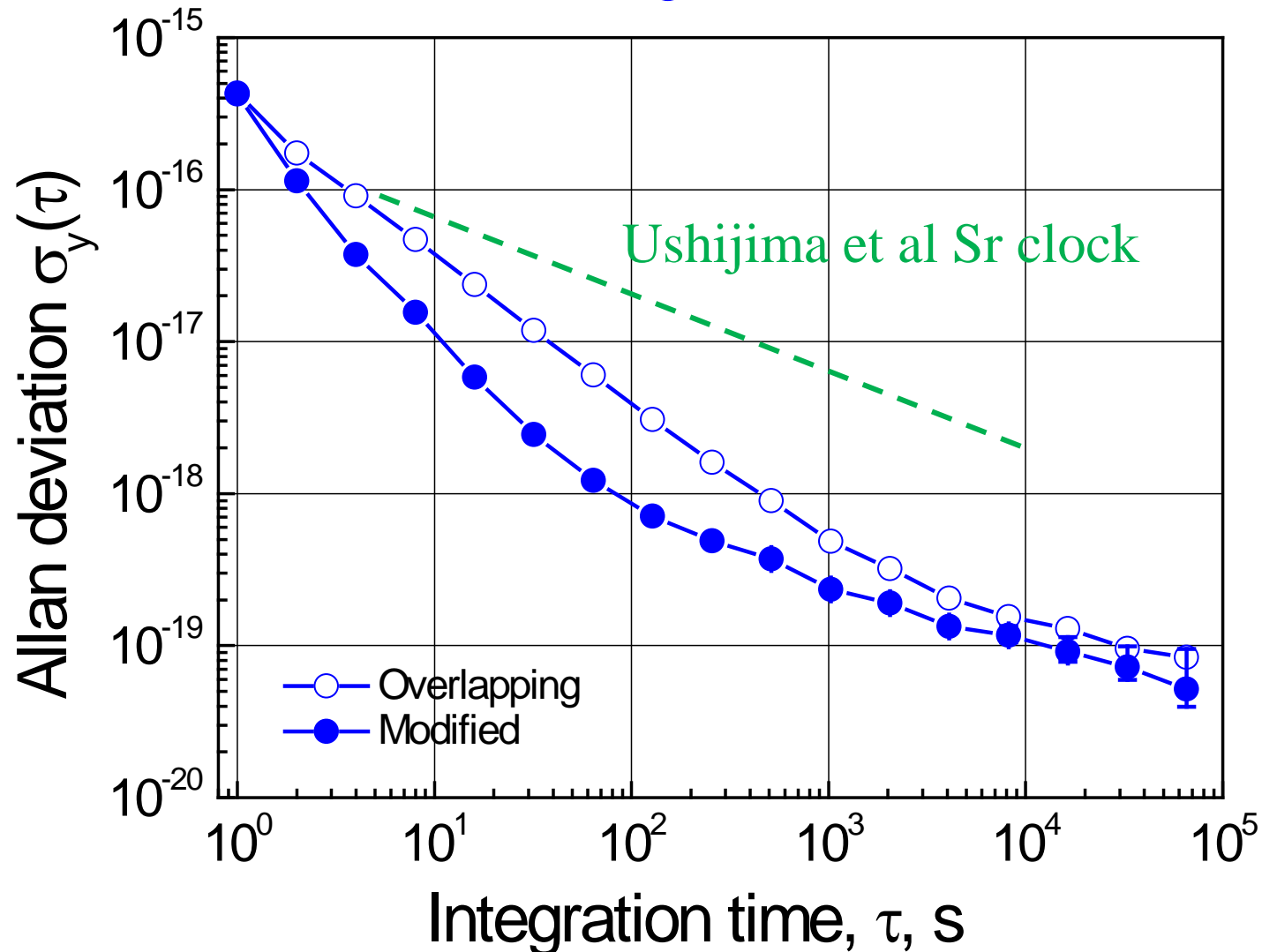
Un exemple : lien cascadié de 1500 km Paris-Strasbourg-Paris



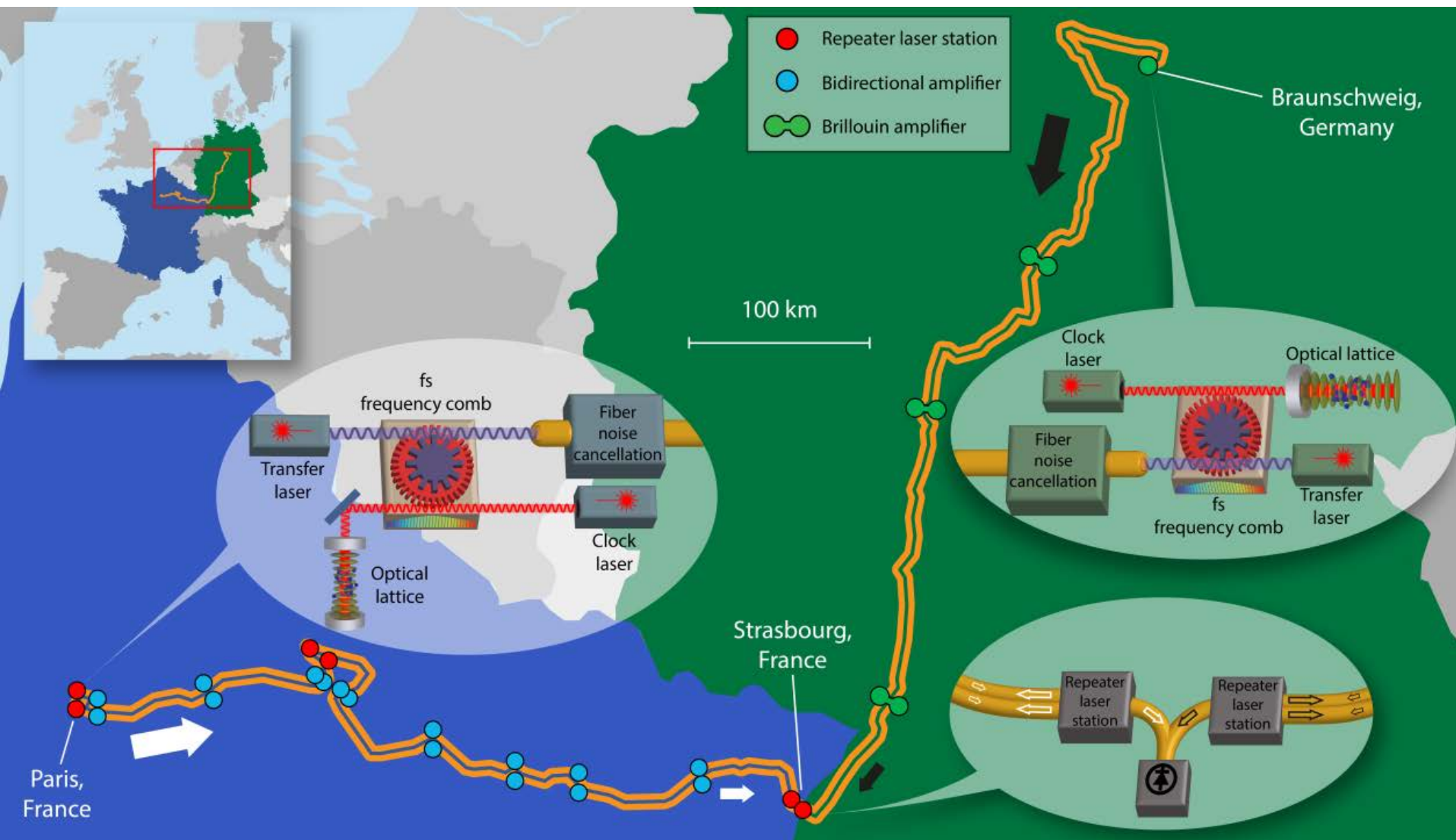
- **4 liens cascadiés avec 5 stations de régénération**
- Transmission sur un réseau de telecommunication actif :
 - Metrological signal at 1542,14 nm, on ITU 44
 - Data at 1542.94 & 1543.73 nm, on ITU 43 & 42
- 40 multiplexeurs OADMs + 16 amplificateurs bidirectionnels

Instabilité due au lien optique

Paris-Strasbourg-Paris - 1500-km



SYRTE-PTB Sr-clocks comparison



C. Lisdat, G. Grosche, N. Quintin, C. Shi, S.M.F. Raupach, C. Grebing, D. Nicolodi, F. Stefani, A. Al-Masoudi, S. Dörscher, S. Häfner, J.-L. Robyr, N. Chiodo, S. Bilicki, E. Bookjans, A. Koczwara, S. Koke, A. Kuhl, F. Wiotte, F. Meynadier, E. Camisard, M. Abgrall, M. Lours, T. Legero, H. Schnatz, U. Sterr, H. Denker, C. Chardonnet, Y. Le Coq, G. Santarelli, A. Amy-Klein, R. Le Targat, J. Lodewyck, O. Lopez, P.-E. Pottie

Développement de réseaux météorologiques en France et en Europe

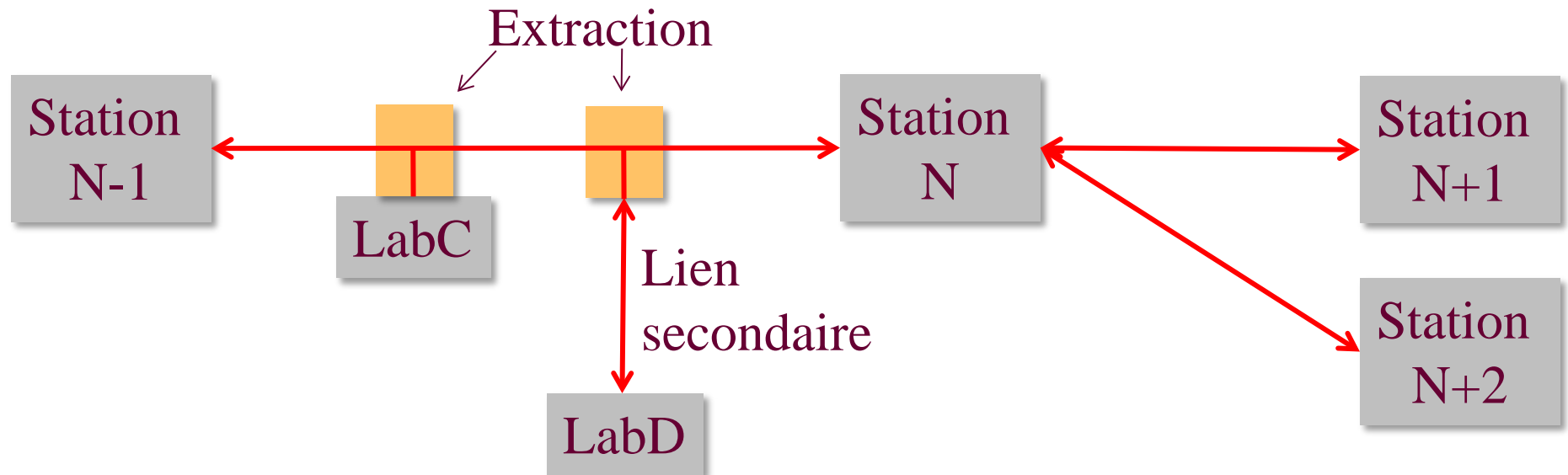


En France
Refimeve+
Remif (IdF)
PI: C. Chardonnet

En Europe :
OFTEN
Funded 2016
PI: H Schnatz
CLONETS
Funded 2017
PI: P Tuckey

Distribution vers plusieurs utilisateurs

- Vers une architecture de réseaux métrologiques
 - Distribution simultanée à plusieurs utilisateurs
 - Extraction le long d'un lien principal
 - Station de distribution vers plusieurs liens secondaires



Transfert de temps par fibre optique

- (Protocoles réseaux)
- Transfert de temps avec correction active du délai
 - jusqu'à 1000 km, compatible avec DWDM (AGH Poland)
exactitude ~ 7 ps, stabilité(1 d) ~ 0.3 ps
- Transfert de temps 2 voies sur fibre optique
 - Similaire à la méthode 2-voies utilisée avec les satellites
 - Avec démodulation optique : stabilité (qq h) $\sim 0,4$ ps

Conclusion

- Vers un réseau de liens optiques fibrés en Europe
 - Technique de comparaison très sensible
 - Très bien adaptée aux comparaisons nationales et européennes
- Les premières applications
 - Comparaison des horloges anglaises, allemandes et françaises
 - Stabilisation de lasers et spectroscopie de précision : mesures de raies atomiques et moléculaires (en particulier H)
 - Distribution d'une référence de fréquence ultrastable pour la radioastronomie (VLBI)
 - Synchronisation de grands instruments
- Perspectives
 - Géodésie relativiste, test de la relativité, test de physique fondamentale au-delà du modèle standard...

Laboratoire de Physique des Lasers

Olivier Lopez

Christian Chardonnet

Nicolas Quintin

Anthony Bercy

Fabio Stefani

Etienne Cantin

Merci à

LNE-SYRTE

Giorgio Santarelli*

Paul-Eric Pottie

P. Tuckey

Won-Kyu Lee

Dan Xu

* Now at LP2N, Bordeaux