

Distribution et utilisation du signal REFIMEVE sur le site de Sorbonne Université

Bérengère Argence

Laboratoire Kastler Brossel, Sorbonne Université, CNRS,
ENS-Université PSL, Collège de France, Paris, France

Plan

- Réception et distribution du signal ultra-stable à Sorbonne Université
 - Présentation succincte des expériences utilisant le signal
- Utilisation du signal ultra-stable
 - Les peignes au LKB
- Focus : Spectroscopie haute résolution de HCOOH en préparation de la spectroscopie de H₂⁺ pour la détermination de m_p/m_e (L. Hilico)

Lien LNE-SYRTE - Sorbonne Université

- Milieu 90's : Lien historique transfert RF, fibre dédiée

Lien 100 MHz référencé aux masers utilisé pour générer du 10 MHz

- Signal optique depuis 2015
 - Boucle SYRTE-LKB-UP Cité
 - Boucle courte : faible accumulation de bruit de phase
 - Compensation du bruit de phase depuis déc. 2022
- 2 labos (LKB, LERMA) - 4 manip reliés au signal optique ultra-stable + plateforme TP laser + 1 labo (LPNHE) relié au signal White Rabbit

Plan du campus Jussieu

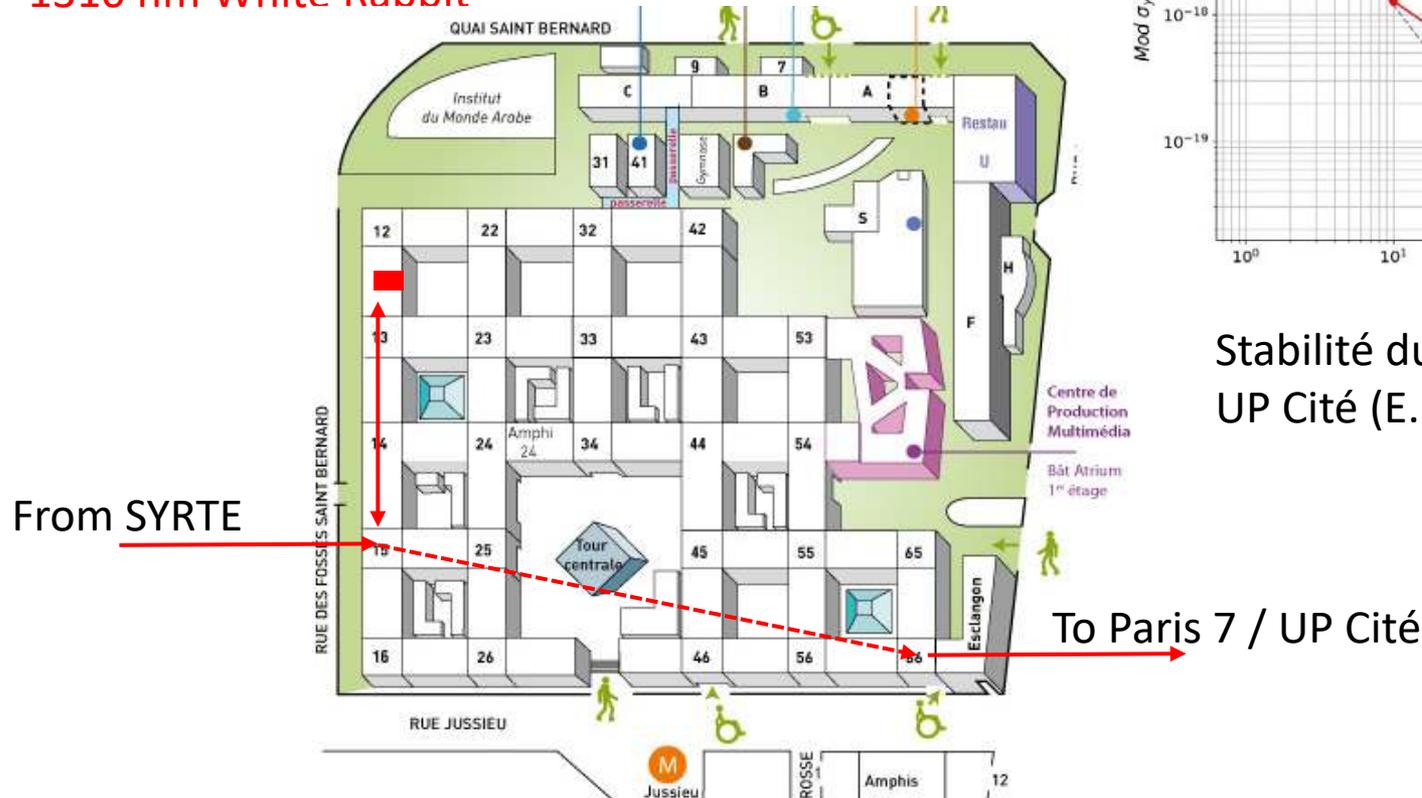
Tour 12-13 219 F. Nez

Extraction & Distribution

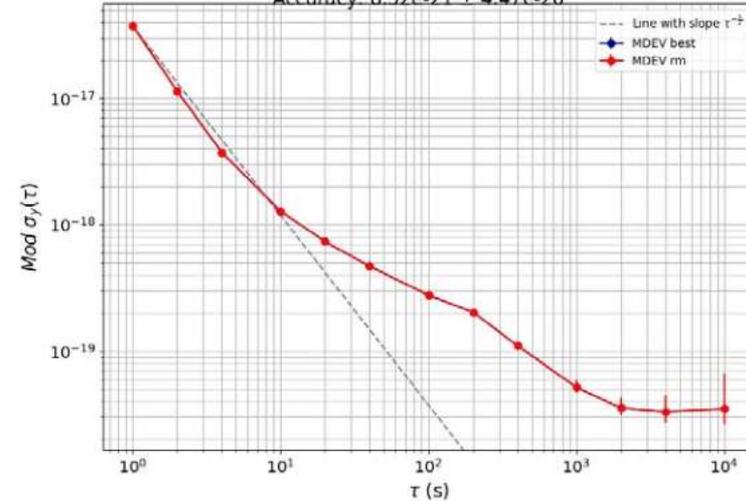
1542 nm Ultra-Stable signal

1310 nm AM 100 MHz

1310 nm White Rabbit

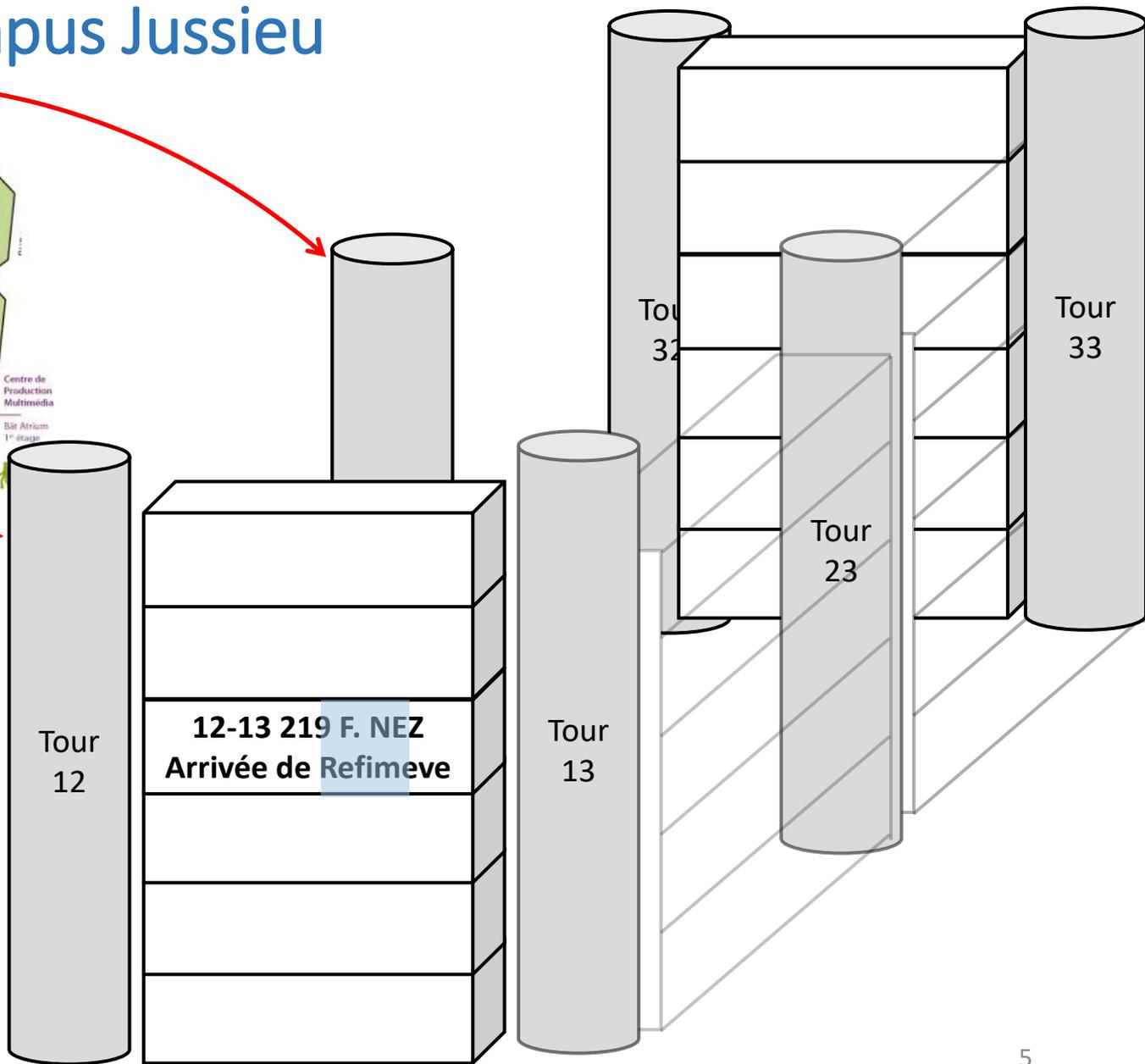
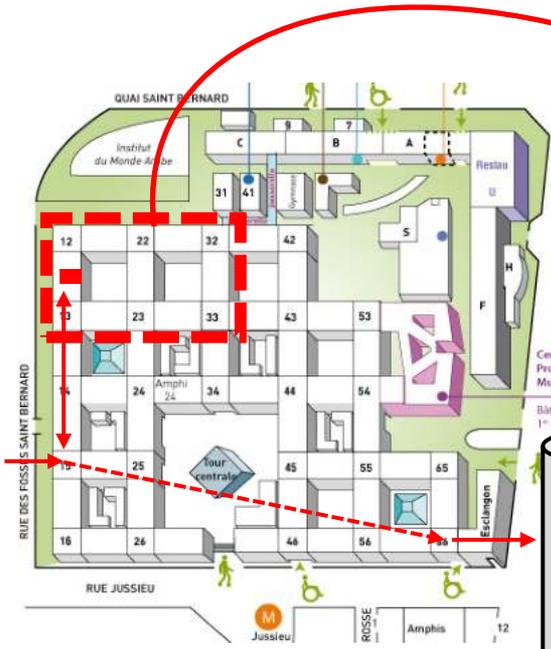


End to end SYRTE - Jussieu - APC
05/12/2022 - 06/12/2022
Accuracy: $8.52e-21 + 4.47e-20$



Stabilité du lien SYRTE- LKB –
UP Cité (E. Cantin)

Plan du campus Jussieu



Spectroscopie de H, D (P. Yzombard, F. Nez)

- H : atome le plus simple, peut être calculé très précisément.

Une mesure très précise de son spectre permet de tester la théorie

$$E \approx -\frac{m_{red}}{m_e} hcR_\infty \left\{ \frac{1}{n^2} + \frac{1}{n^3} \left(\frac{m_{red}}{m_e} \right)^3 F(\alpha, \log \alpha) + \frac{1}{n^3} \left(\frac{m_{red}}{m_e} \right)^3 G \left(\frac{r_p^2}{a_0^2} \right) \right\}$$

$m_{red} = \frac{m_e m_p}{m_e + m_p}$
Bohr
>>
Quantum electrodynamics
>>
"proton radius"

QED 1S : + 8.2GHz
"r_p" 1S : + 0.0012 GHz

$$E \approx -\frac{R_\infty}{n^2} + L(n, r_p)$$

- La combinaison linéaire de plusieurs fréquences de transitions donne accès à la constante de Rydberg R_∞ et à $L^{experimental}(1S)$.

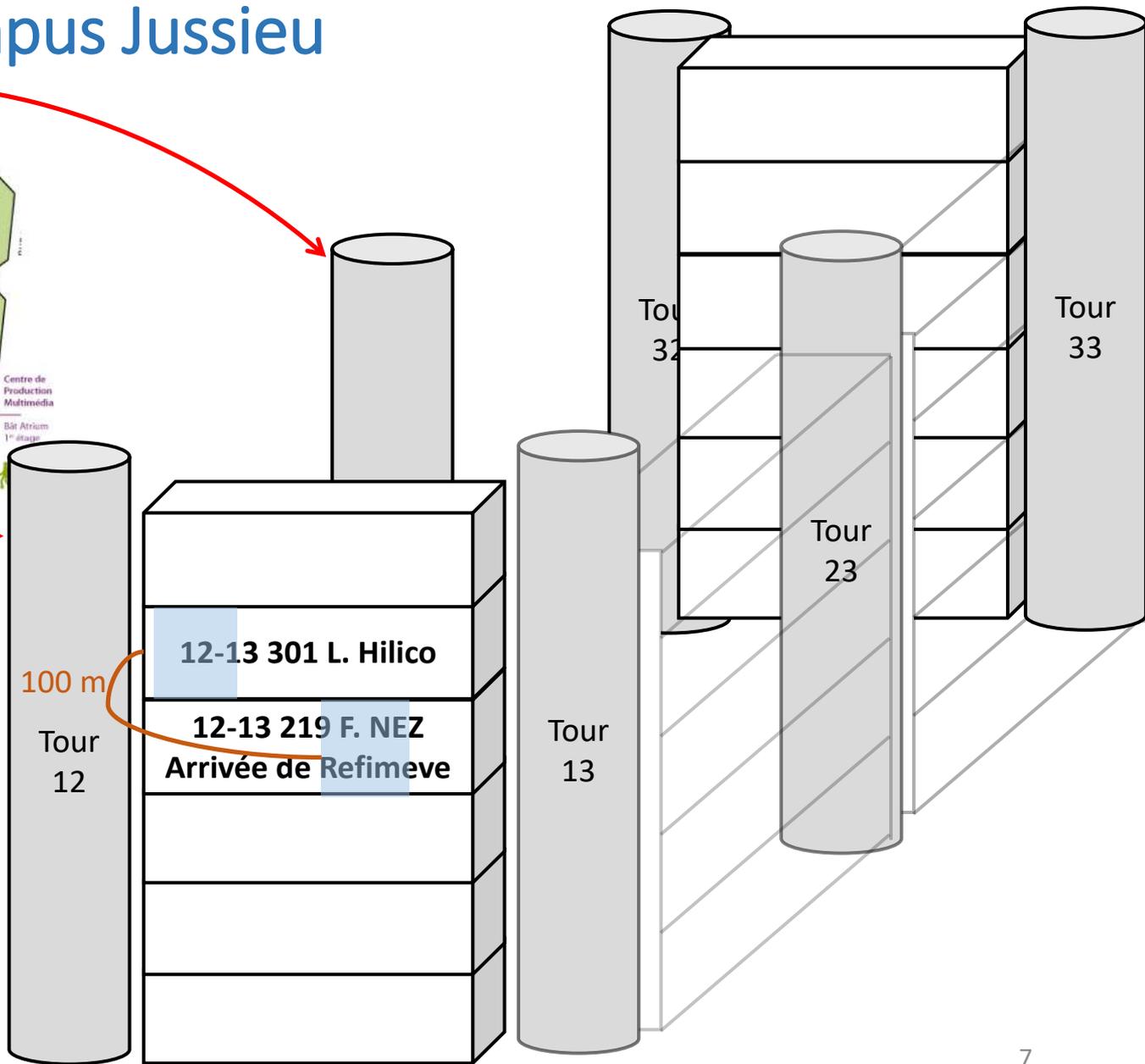
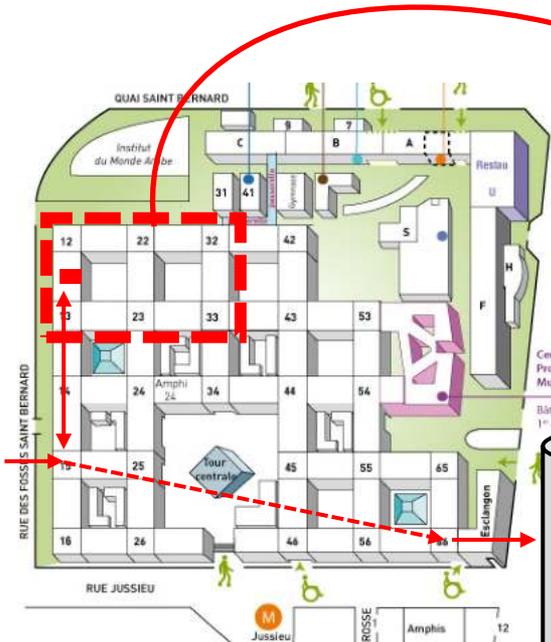
⇒ en supposant la QED exacte, on peut en déduire le rayon de charge du proton

⇒ en utilisant une autre détermination de r_p tester la QED

- Obj : Mesure de la transition 1S-3S à 10^{-13} => connaissance de la fréquence des lasers à 10^{-14}

Fleurbaey et al. PRL, 120, 183001 (2018)

Plan du campus Jussieu



— Canaux de 12 fibres monomodes FC/APC

LKB

100 m

Tour 12

12-13 301 L. Hilico

12-13 219 F. NEZ

Arrivée de Refimeve

Tour 13

Tour 23

Tour 33

Spectroscopie de H_2^+ (L. Hilico)

- Mesure de m_p/m_e $\nu = cR_\infty \left[E_{nr}(\mu_{pe}) + A_{QED}(\alpha) + A^{fs} \left(\frac{r_p}{a_0} \right)^2 \right]$
- Obj : gagner un ordre de grandeur sur incertitude CODATA $\Rightarrow 10^{-12}$ (30 Hz à 30 THz)

- Méthode expérimentale :

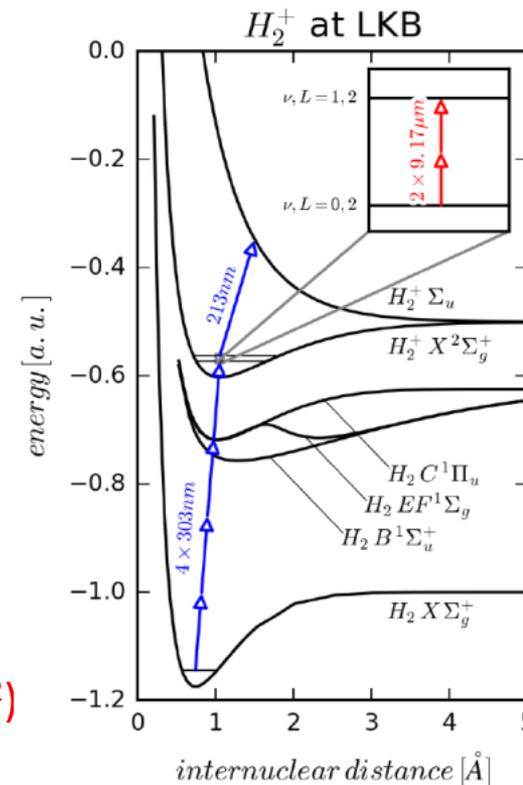
- Préparation de H_2^+ : Ionisation à (3+1) photons des molécules H_2 (REMPI) 303 nm
- Piégeage des ions : Piège de Paul linéaire
- Refroidissement sympathique par B_e^+ refroidis 313nm



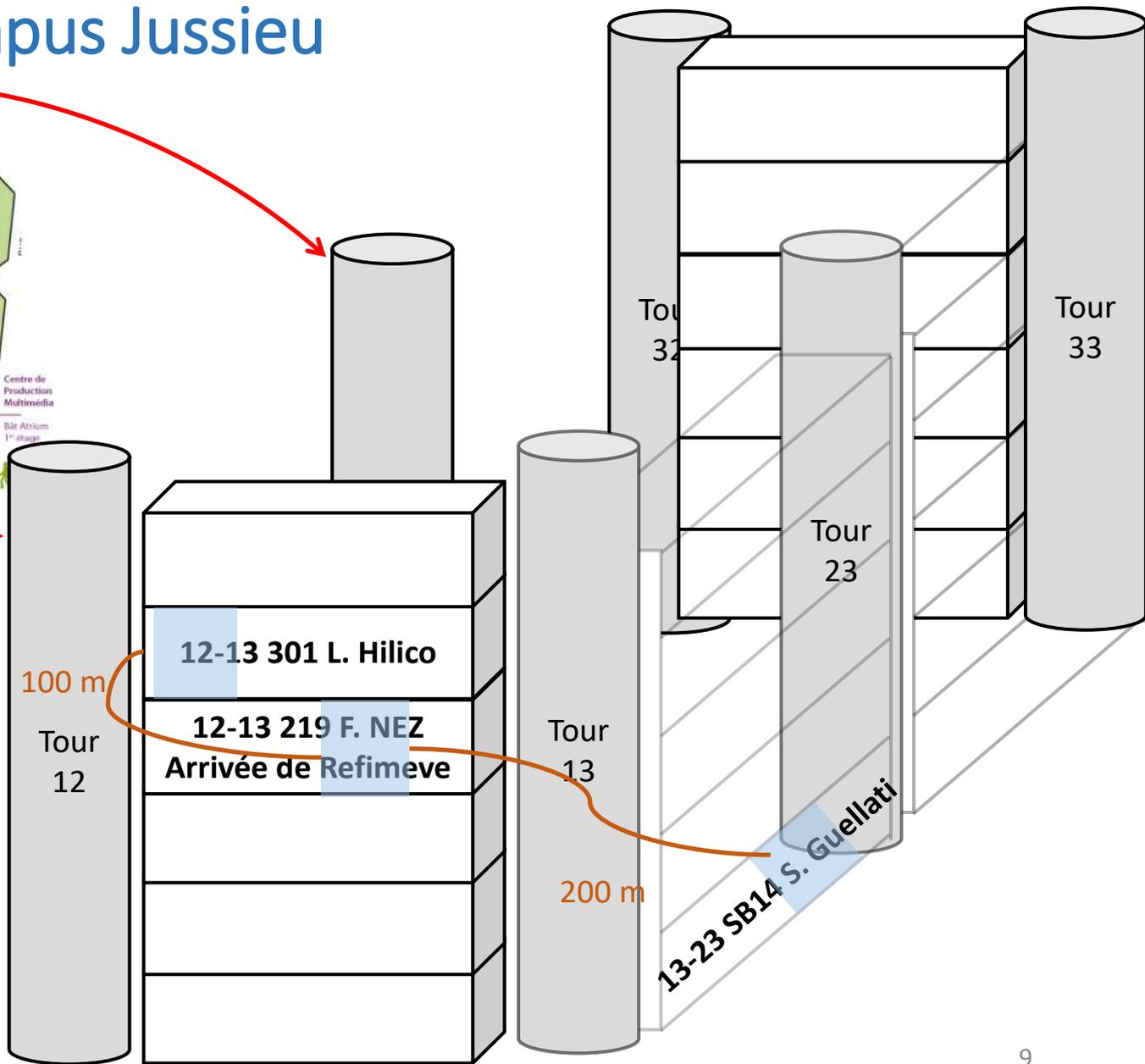
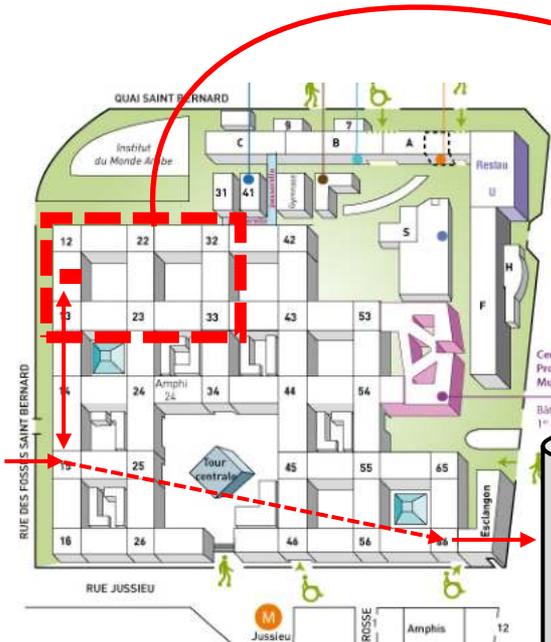
Cristal d'ions

- Spectroscopie RMPD :

- Excitation à 2 photons @9.17 μ m (QCL) ($\Delta\nu/\nu < 10^{-12}$)
- Dissociation à 213nm : Détection de la transition



Plan du campus Jussieu

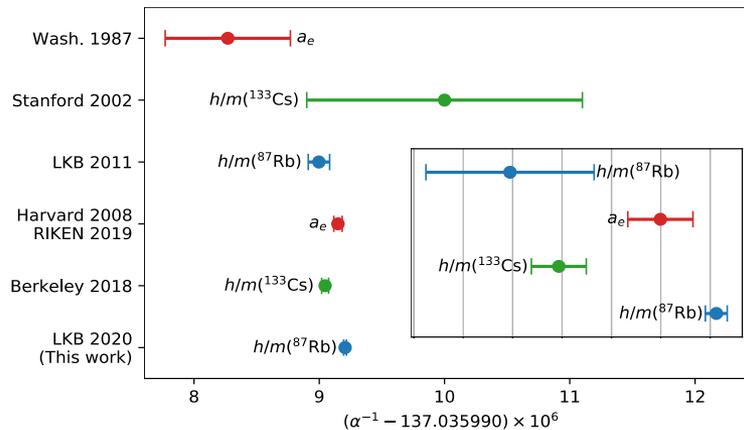


— Canaux de 12 fibres monomodes FC/APC

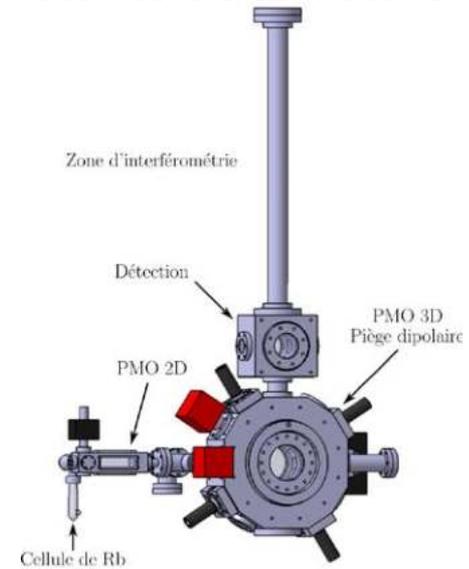
LKB

Interférométrie atomique (P. Cladé / S. Guellati)

- Mesure de la **constante de structure fine α** par l'intermédiaire de la mesure de la vitesse de recul d'un atome qui absorbe un photon
- Détermination la plus précise au monde de la constante de structure fine

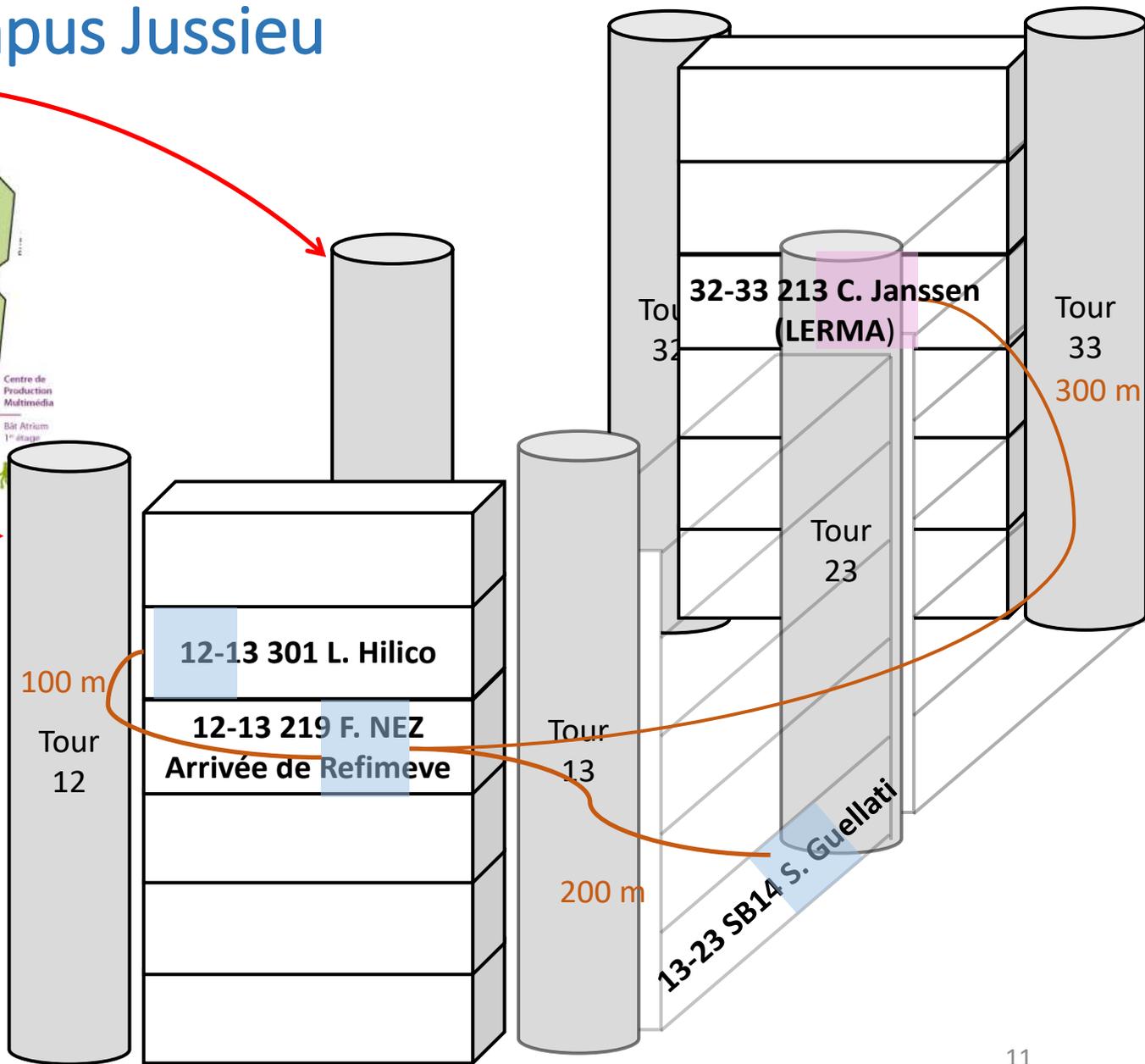
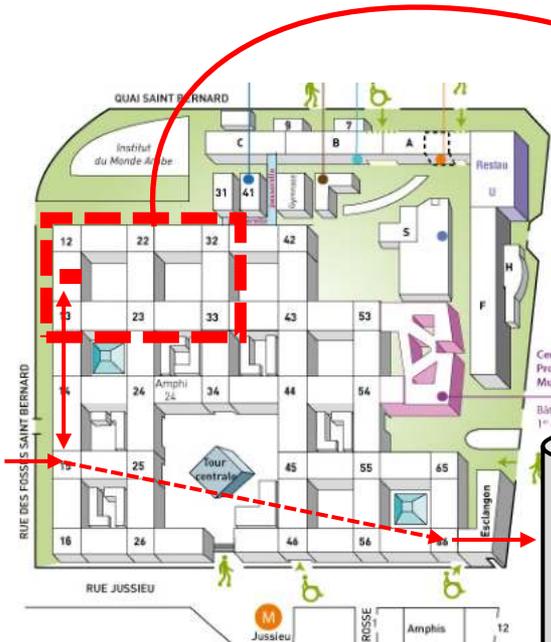


L. Morel et al, Nature 588, 61-68 (2020)

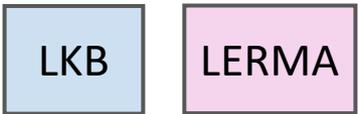


- Fréquences optiques : stabiliser et mesurer deux lasers à 780 nm (environ 60 GHz de la transition D1 du rubidium). Fonctionnement 24/7. Précision relative de 10^{-11} / $3 \cdot 10^{-12}$ pour les lasers

Plan du campus Jussieu



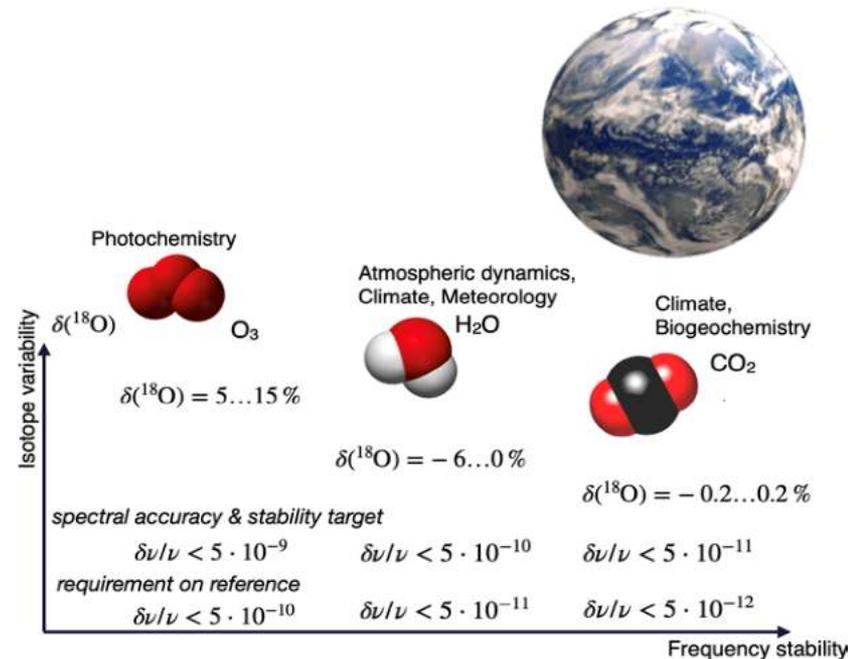
— Canaux de 12 fibres monomodes FC/APC



Spectroscopie pour des applications atmosphériques : O₃, ... (C. Janssen – LERMA)

Mesures très précises des paramètres de raies moléculaires pour des bases de données atmosphériques et astrophysiques :

- fréquence centrale des raies & shift par pression
- élargissement par pression
- intensité des raies
- profil des raies

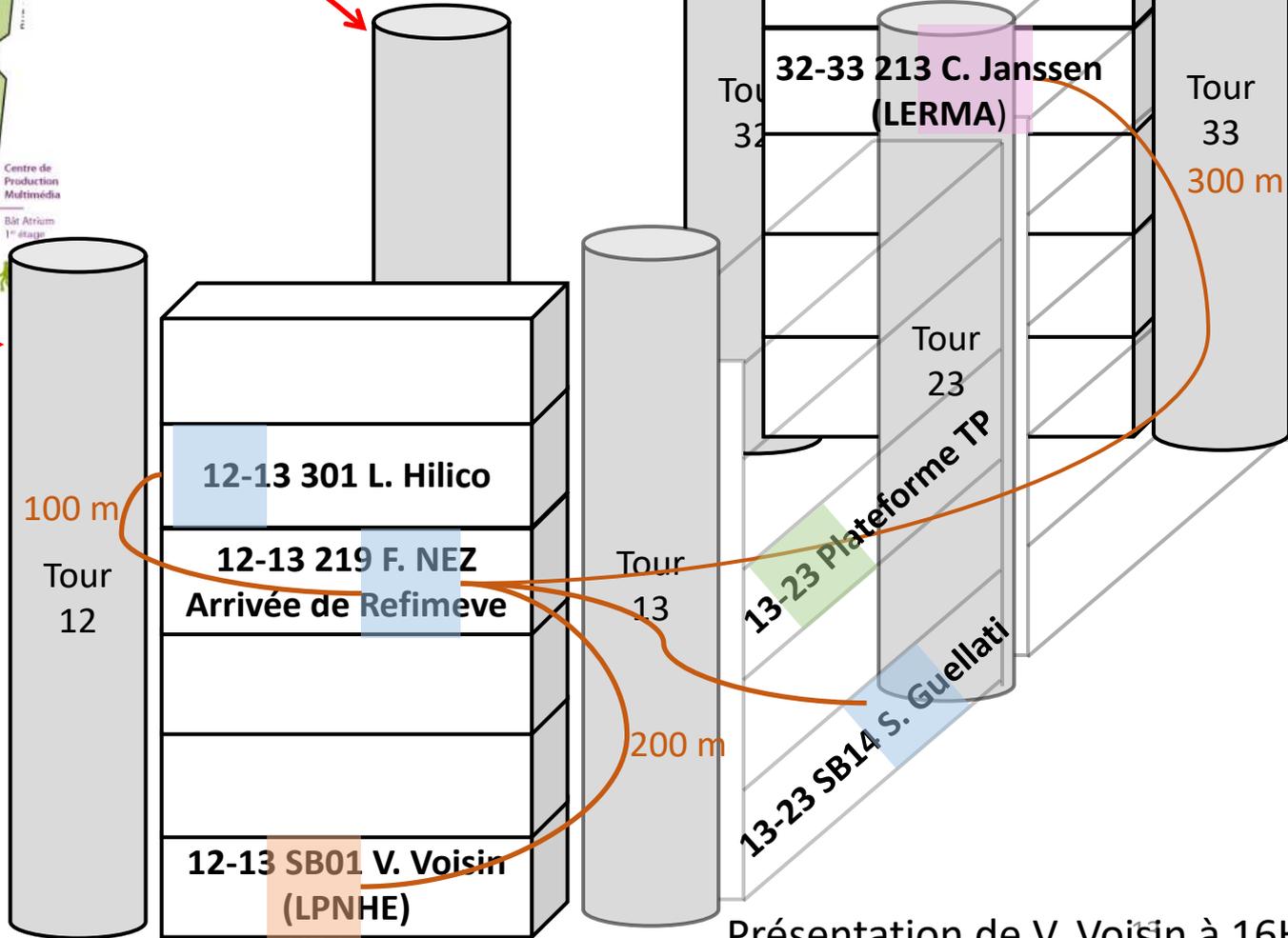
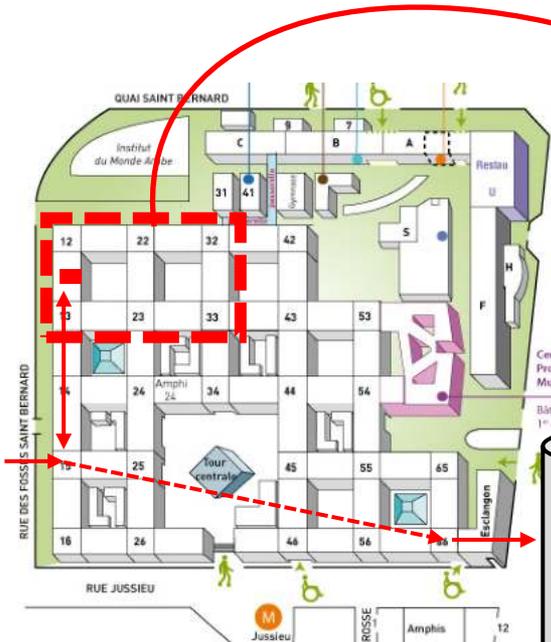


Spectroscopie sub-Doppler de raies de l'ozone à 31.4 THz (9.55 μm)

=> Amélioration de l'incertitude sur la fréquence centrale de presque 3 ordres de grandeurs / HITRAN

Line	Position / MHz (LERMA) $\nu = 0.050$ MHz	Position / MHz (HITRAN) $\nu = 30$ MHz	Diff. / kHz (HITRAN-LERMA)
1	31 438 444.717	31 438 444.88	160
2	31 449 119.145	31 449 119.23	90
3	31 449 193.254	31 449 193.31	60
4	31 449 246.076	31 449 246.22	140
5	31 461 655.885	31 461 656.01	130

Plan du campus Jussieu

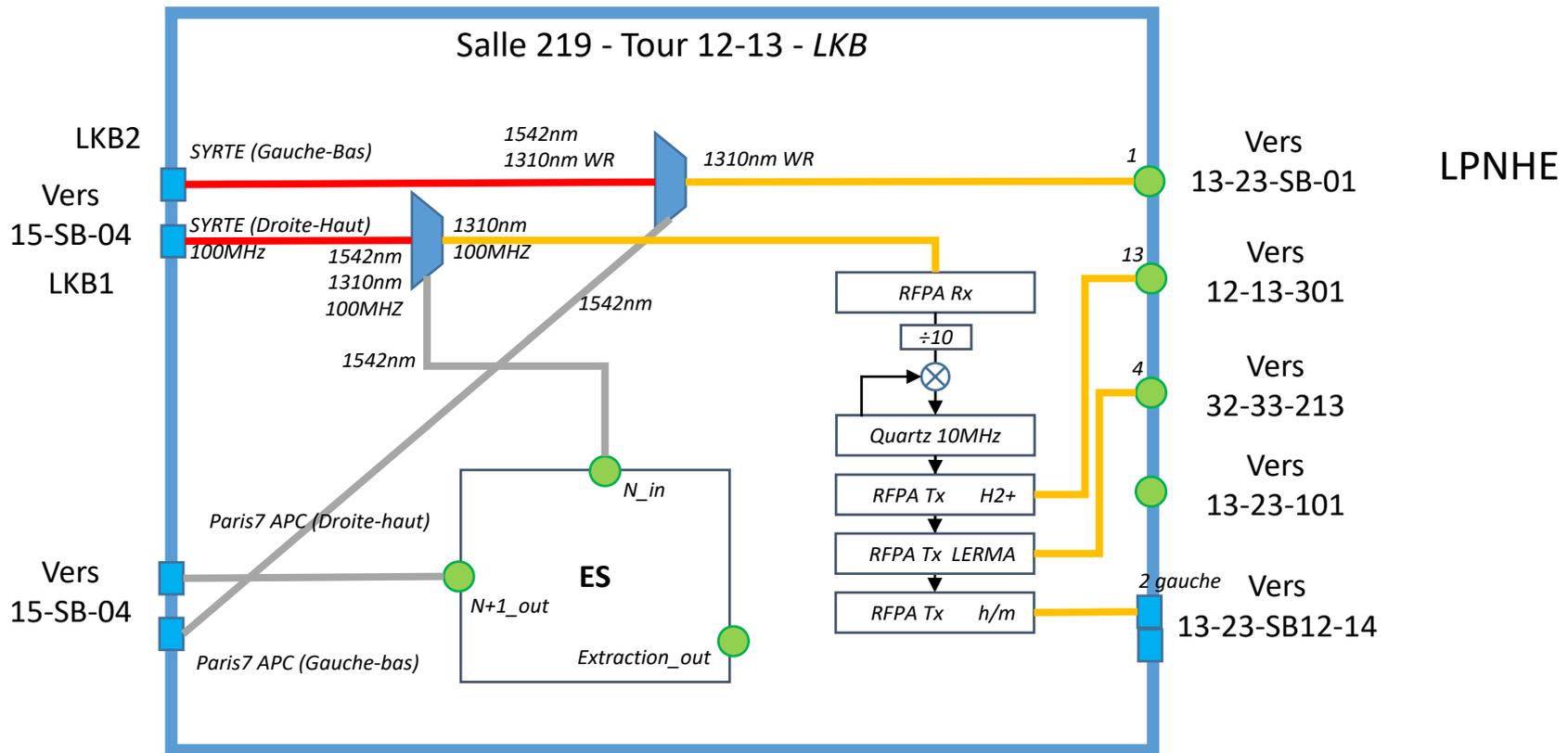
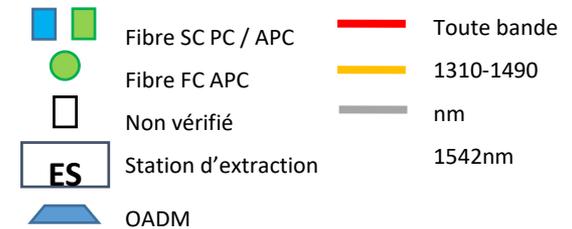


— Canaux de 12 fibres monomodes FC/APC

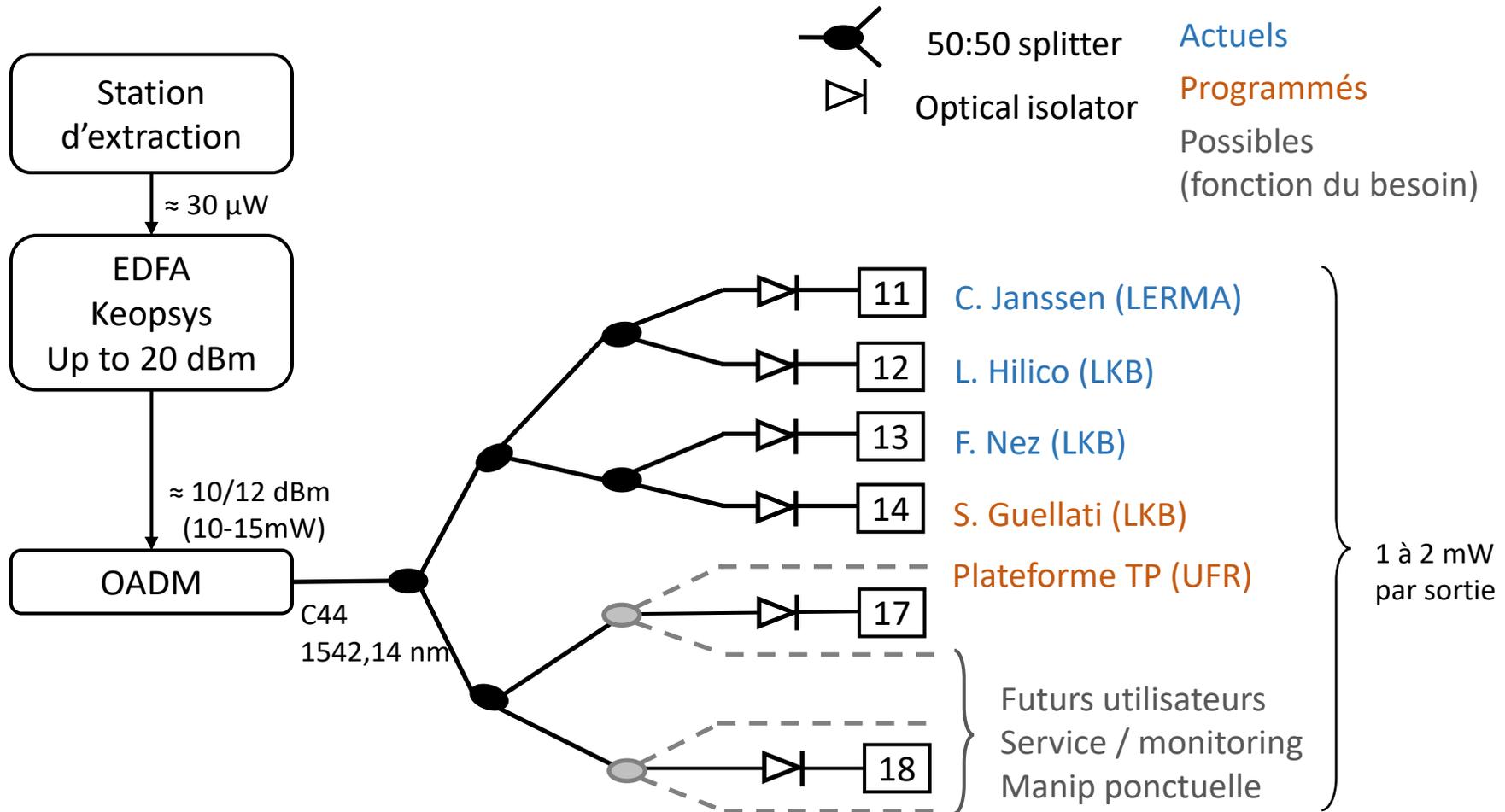
- LKB
- LERMA
- TP
- LPNHE

Salle 219 / Tour 12-13 (E. Cantin)

LEGENDE:



Distribution du signal (schéma)

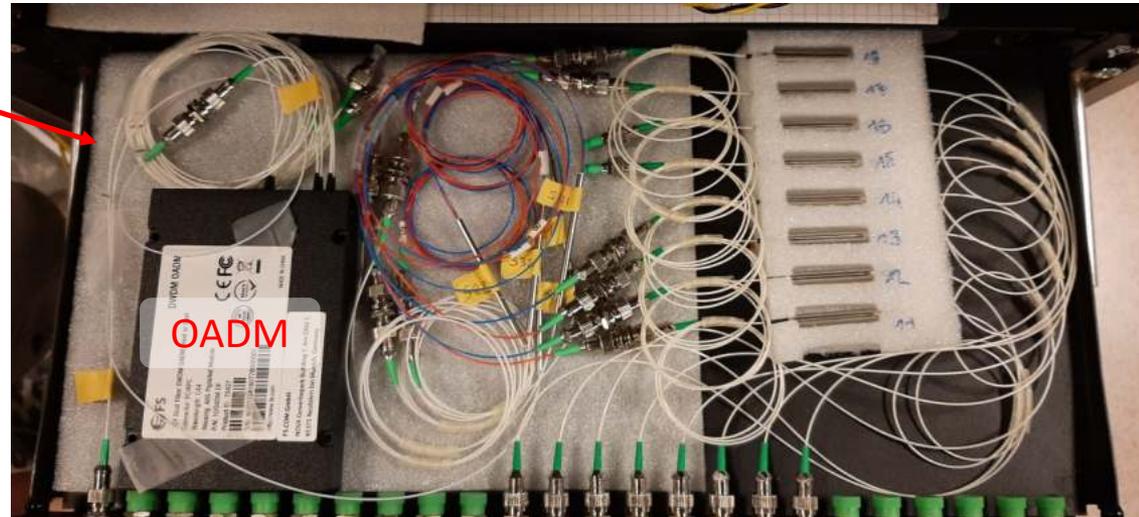
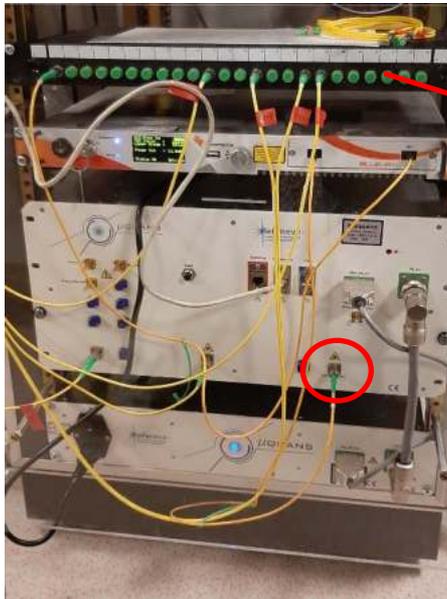


Distribution du signal (photo)

Distribution
box →

EDFA →

Extraction
station →



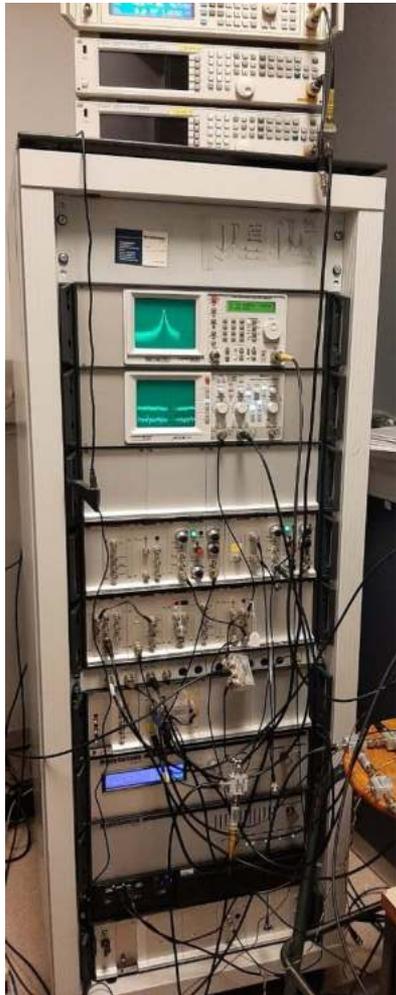
↑
From EDFA

↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
Outputs

Plan

- Réception et distribution du signal ultra-stable à Sorbonne Université
 - Présentation succincte des expériences utilisant le signal
- Utilisation du signal ultra-stable
 - Les peignes au LKB
- Focus : Spectroscopie haute résolution de HCOOH en préparation de la spectroscopie de H_2^+ pour la détermination de m_p/m_e (L. Hilico)

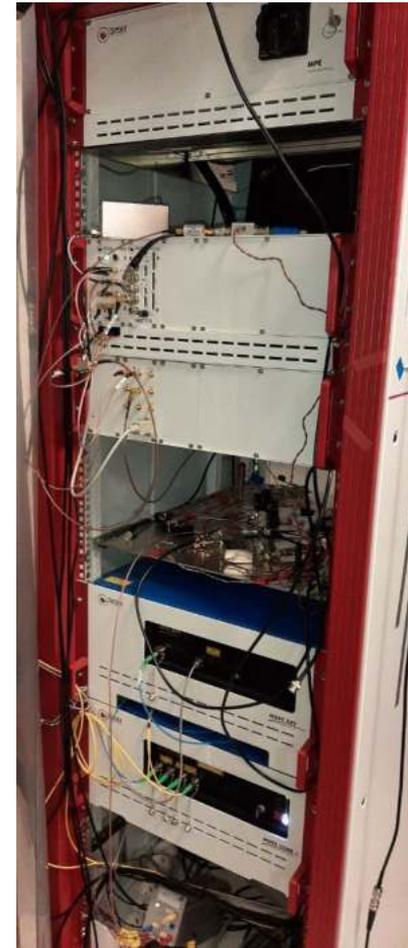
Peignes des équipes de F. Nez et L. Hilico



François Nez **MenloSystems (2011)**
Erbium laser 1560 nm (1490 – 1590 nm)
Repetition rate 250 MHz
Linewidth 100 kHz
Extensions à 1064 nm et 780 nm

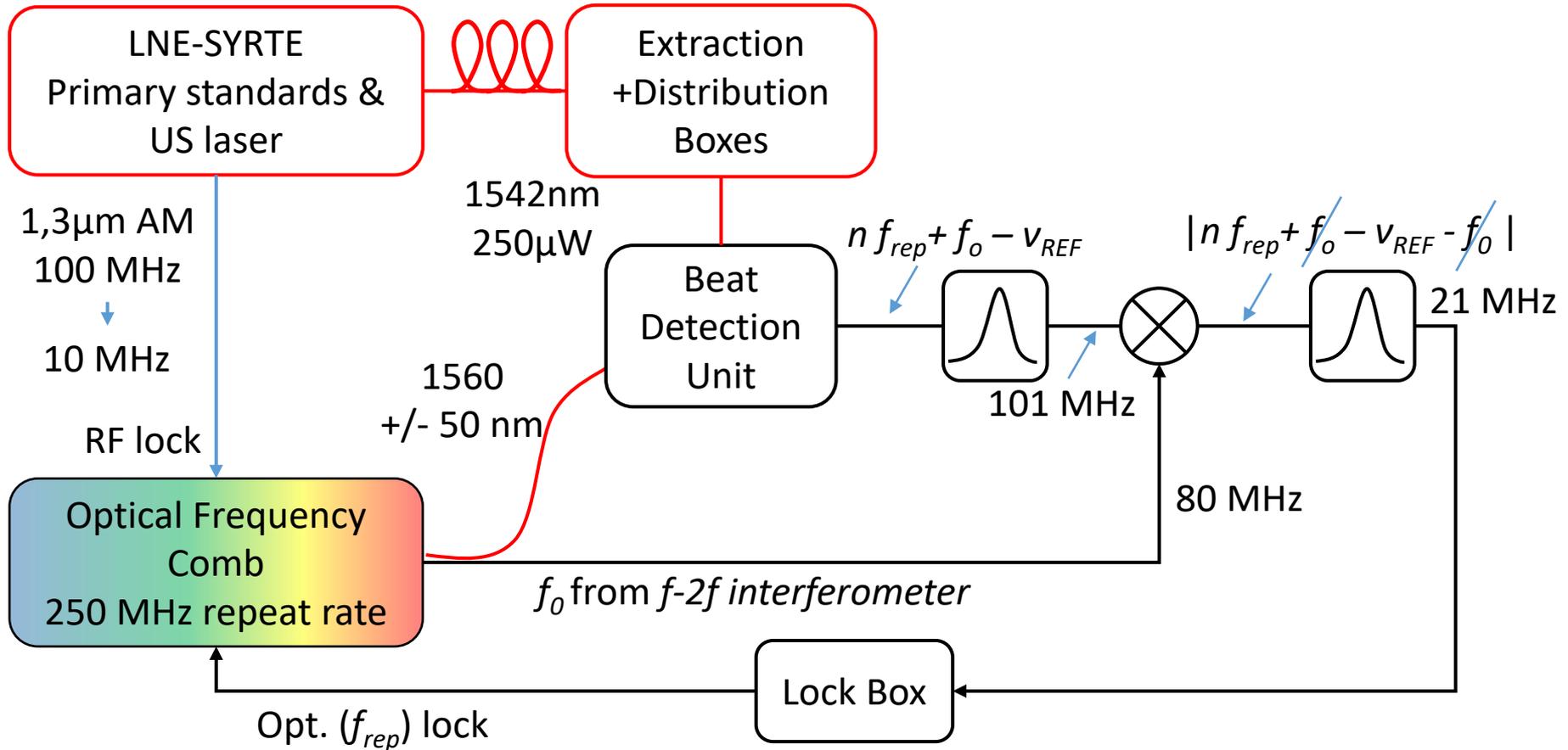


Laurent Hilico **Toptica (2020)**
Erbium laser 1560 nm +/- 20 nm
Repetition rate 200 MHz
Linewidth 30 kHz
Extensions à 1895 nm,
prochainement à 1050 nm
 f_{ceo} free (DFG), monté en rack



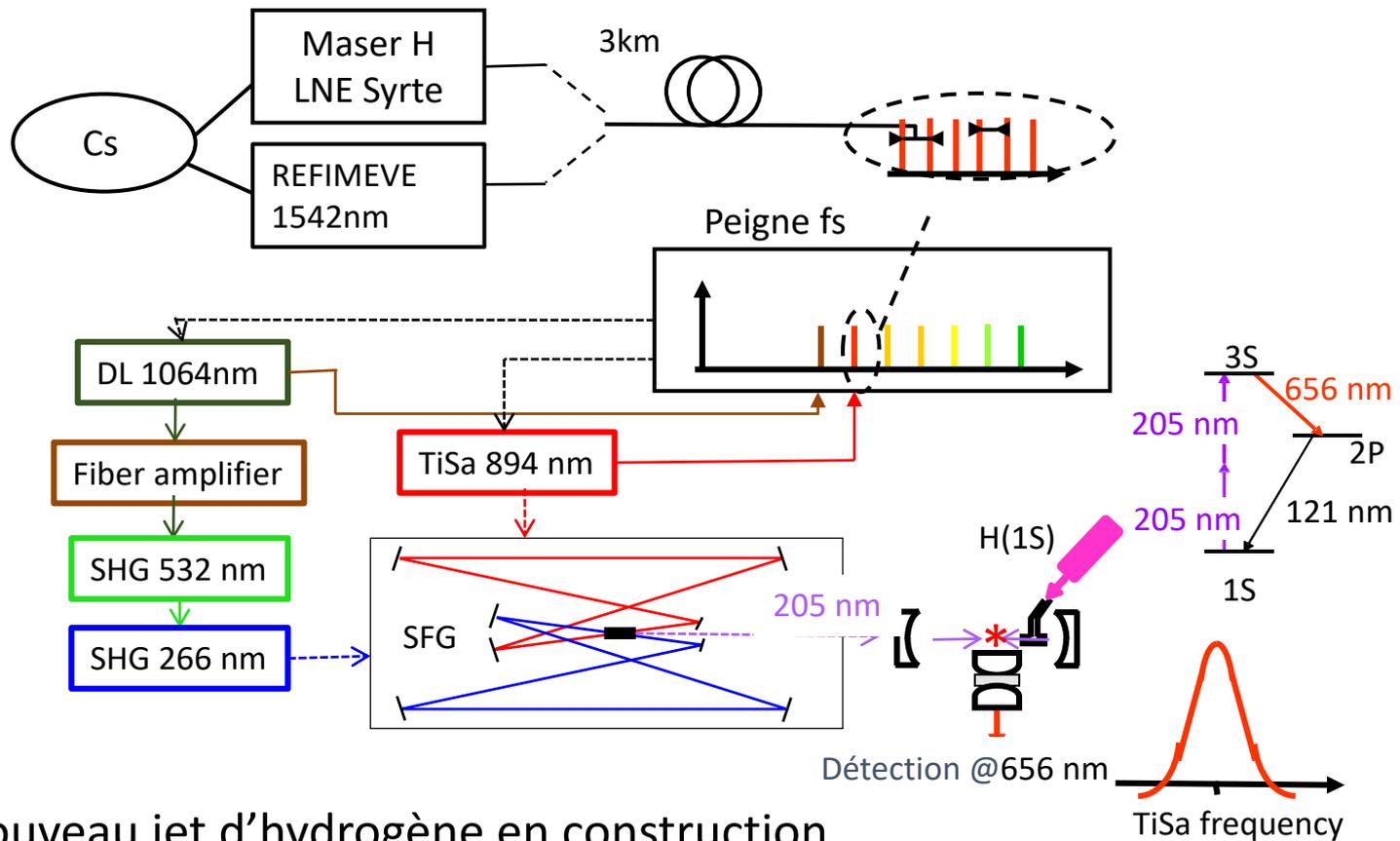
Asservissement du peigne MenloSystems de F. Nez

- Mis en place début 2023



Spectroscopie H, D (2023) (P. Yzombard, F. Nez)

- Asservissement des lasers sur le peigne référencé sur REFIMEVE 1542 nm

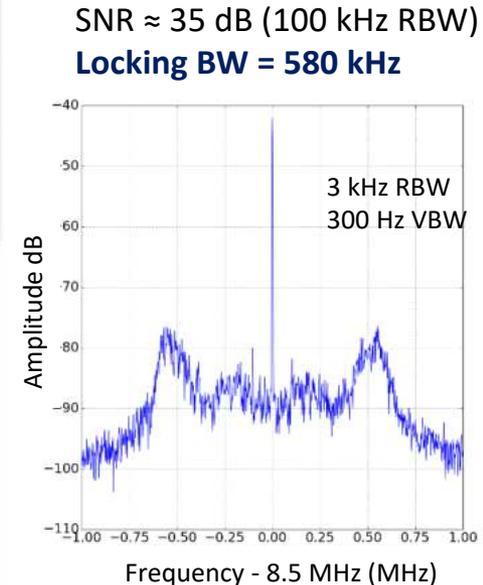
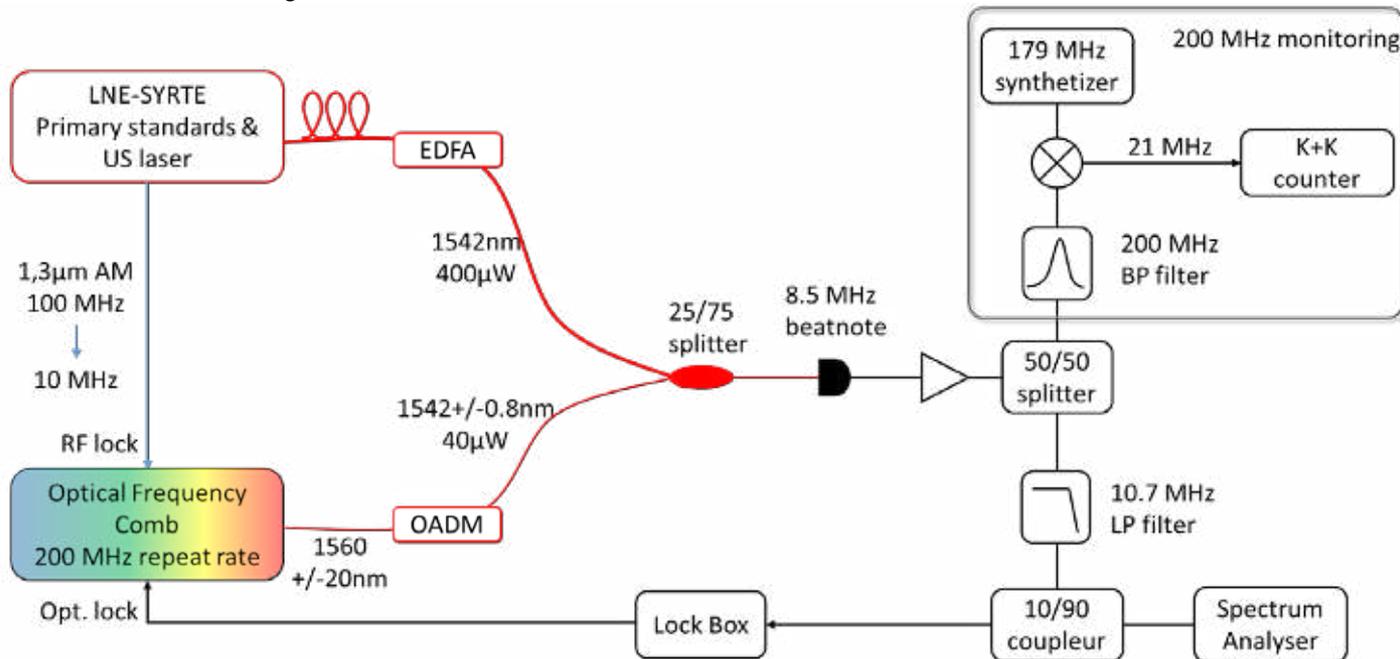


- Nouveau jet d'hydrogène en construction

Asservissement peigne f_{ce0} free de L. Hilico

REFIMEVE @Jussieu : $194\,400\,008.5\text{ MHz} = 972\,000 \times 200 + 8.5\text{ MHz}$

BDU remplacée par OADM + Contrôleur de Polarisation + photodiode
Pas de f_0 à supprimer / asservir



Perspective : Asservir les lasers à 1051 + 1549 \rightarrow 626 nm puis par SHG 313 nm
Sur le signal REFIMEVE (actuellement 626 nm asservi sur un lambdamètre WS7)

Caractérisation des stabilités des peignes

- Objectif : mesurer stabilité à 10^{-14}
- Pas de meilleure référence au LKB que le signal REFIMEVE
- Asservissement des peignes en optique puis mesure de la stabilité de f_{rep}
- Asservissement de f_{rep} sur le signal RF (10 MHz) puis mesure de la stabilité du battement REFIMEVE-peigne

⇒ *même stabilité observée*

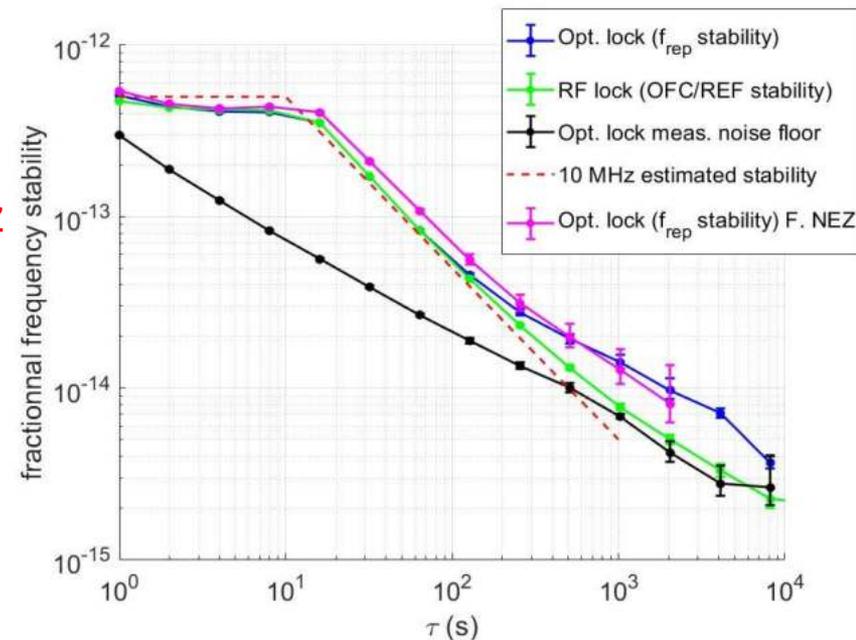
Lock RF ou optique

⇒ on est **limité par la stabilité du 10 MHz**

Référence à 10 MHz :

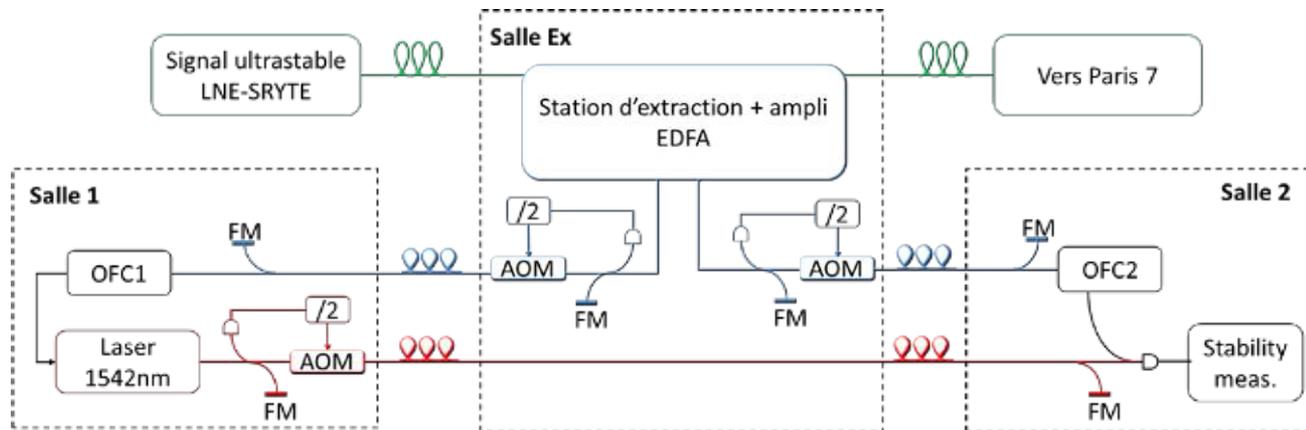
Quartz asservi sur le 100 MHz du Syrte
stabilité : $5 \cdot 10^{-13}$ de 1-10 s (data sheet)

Puis décroît en τ^{-1}



Perspectives

- Caractérisation de la stabilité des peignes :
 - 1/ a/ Mesure + compensation éventuelle du bruit de phase
b/ Battement Peigne/Peigne via laser intermédiaire

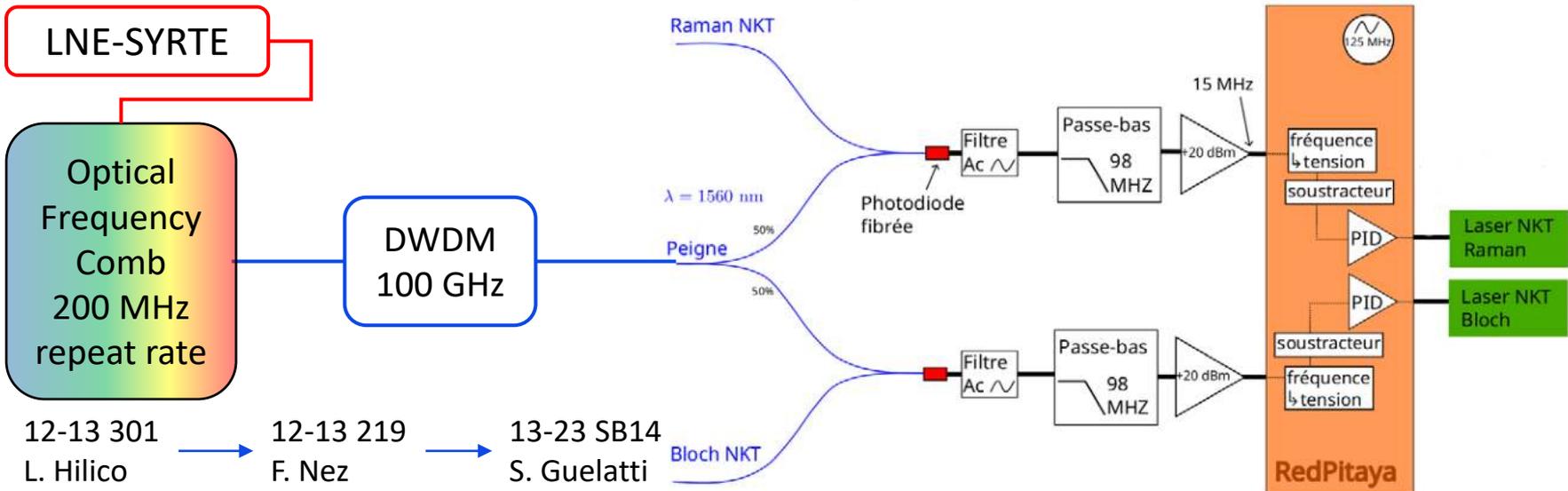


2/ Battement Peigne / Laser ultra-stable 2

- MultiBranch Laser Station (MLS) à Jussieu ?

Mesure des fréquences optiques (P. Cladé / S. Guellati)

- Ne dispose pas encore d'un peigne, achat prévu
- Ancien schéma : stabilisation sur une cavité de transfert elle-même stabilisée sur une référence à deux photons du Rb à 778 nm + mesure du batt. avec le peigne de fréquence de F. Nez (référencé en RF par le lien AM historique).
- Nouveau schéma (mi 2022) : laser à 1.5 μm doublé en fréquence. Asservissement directement sur un peigne.



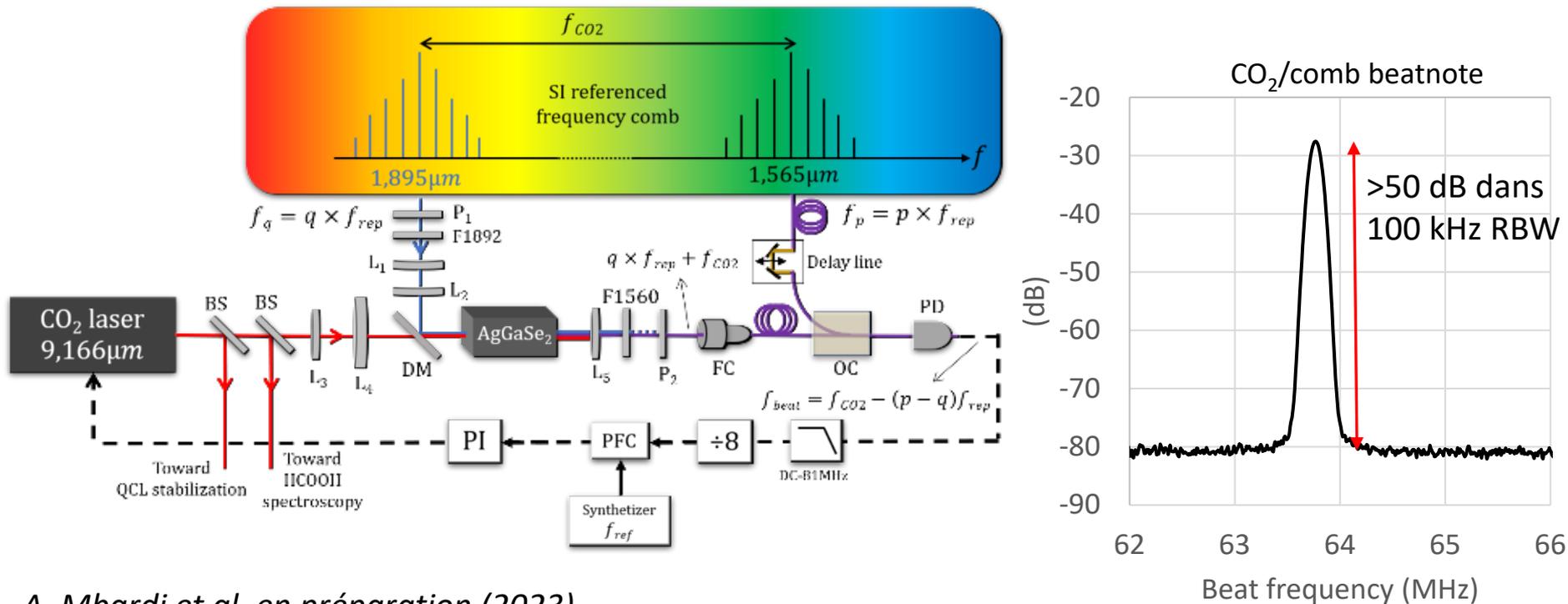
- Futur projet : interférométrie sur transition optique avec l'Ytterbium (C. Solaro)

Plan

- Réception et distribution du signal ultra-stable à Sorbonne Université
 - Présentation succincte des expériences utilisant le signal
- Utilisation du signal ultra-stable
 - Les peignes au LKB
- Focus : Spectroscopie haute résolution de HCOOH en préparation de la spectroscopie de H_2^+ pour la détermination de m_p/m_e (L. Hilico)

SI referenced spectrometer at 9.17 μm (32.7 THz)

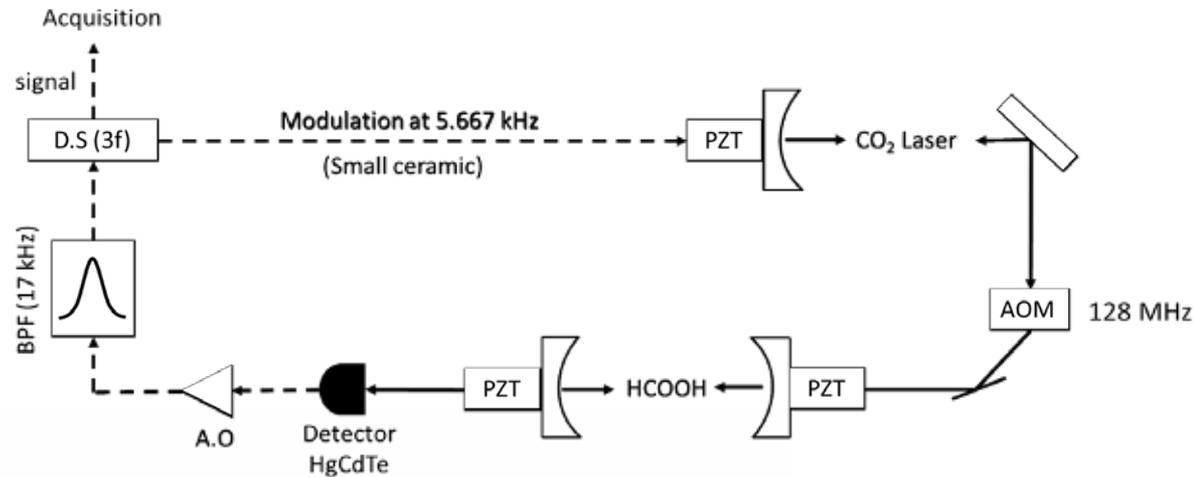
- Résultats récents (L. Hilico) : stabilisation d'un laser CO2 sur le signal REFIMEVE via le peigne de fréquence (schéma inspiré du LPL)



A. Mbardi et al. en préparation (2023)

First test HCOOH high resolution spectroscopy

- Spectroscopie de HCOOH
- Absorption saturée dans une cavité Fabry-Perot
- Détection à l'harmonique 3



Modèles de forme de raies étudiés =

- S_3 : dérivée 3^{ème} de lorentzienne modulée en amplitude

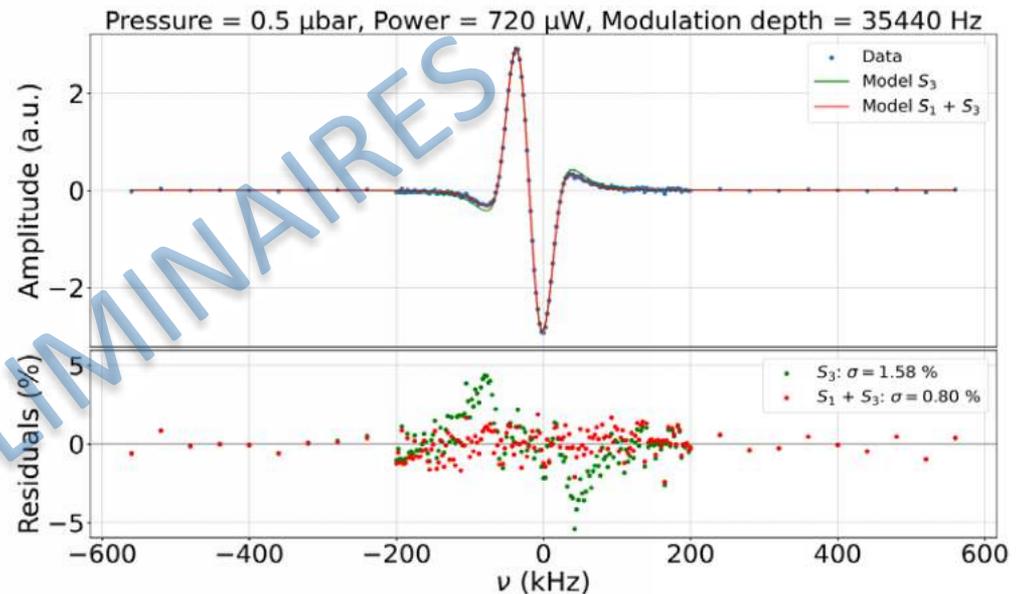
=> effet de la profondeur de modulation – modulation de fréquence

R. Arndt. J. Appl. Phys, 1965.

- $S_1 + S_3$: dérivée 1^{ère} et 3^{ème} de lorentzienne modulée

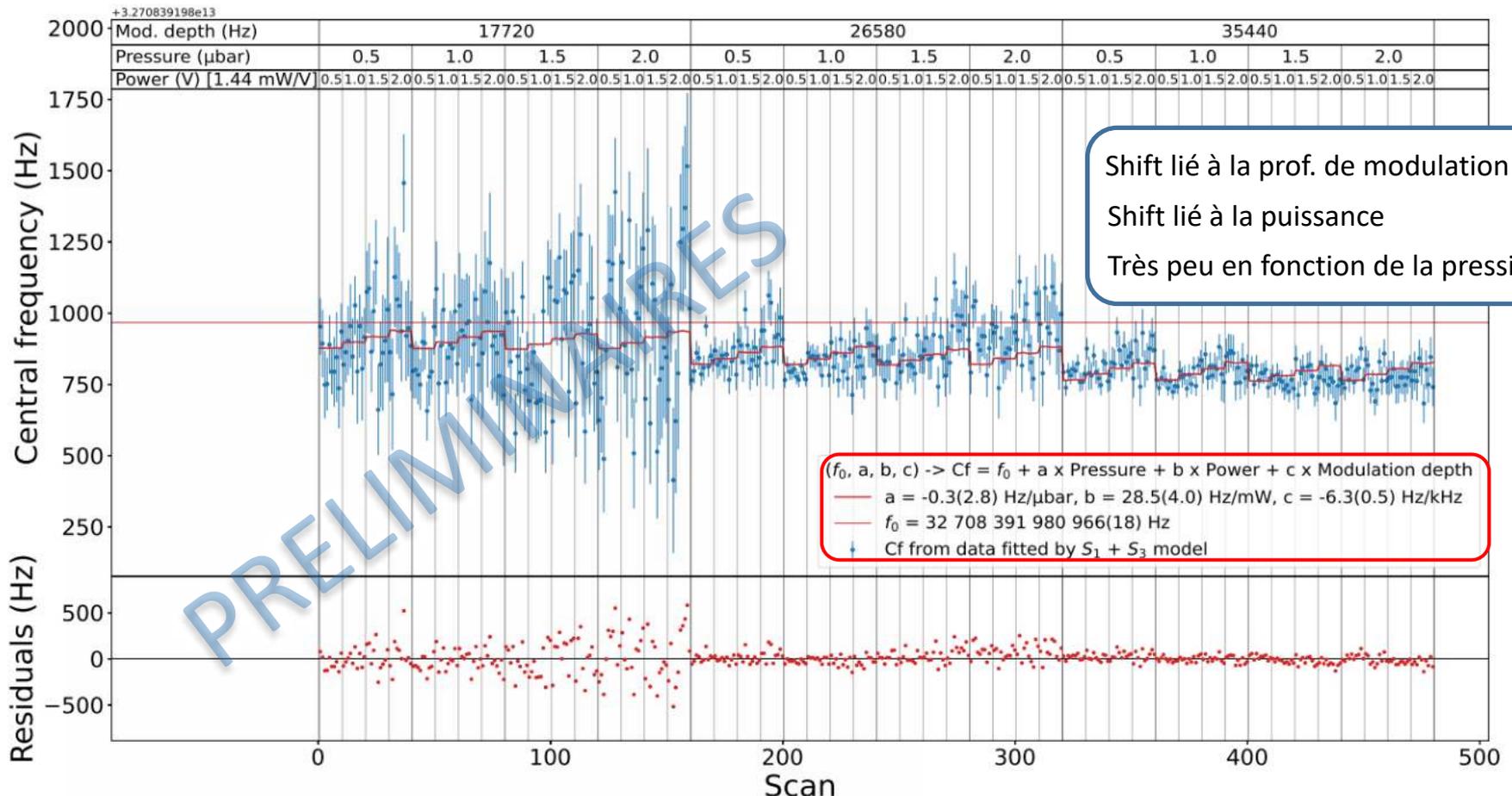
=> effet de la transmission de la cavité – modulation de l'intensité

S. Schilt, Appl. Opt. (2003)



First test HCOOH high resolution spectroscopy

- T-REFIMEVE permet des études d'effets systématiques – fréquence centrale
- Pression (4) – Puissance (4) – Modulation depth (3) x 10 scans = 480 scans



First test HCOOH high resolution spectroscopy

- Etude équivalente pour les effets sur la largeur de raie :
 - Pas d'effet de modulation résiduelle
 - Elargissement par pression
 - Elargissement par puissance

M. Leuliet et al. en préparation (2023)

- Conclusions :
 - Analyse des shifts et élargissements
 - Précision sur la fréquence centrale ≈ 20 Hz
=> $< 10^{-12}$ à 32 THz limitée par HCOOH
 - Spectromètre prêt pour H_2^+

Conclusion / Perspectives

- Mise en place de la distribution du signal ultra-stable très simple (facilitée par l'aide des acteurs de REFIMEVE – A. Amy-Klein, O. Lopez, E. Cantin)
- 2 peignes déjà asservis au LKB / 3 expériences utilisant le signal REFIMEVE
- Attentes / Perspectives :
 - Conserver le lien 100 MHz historique
 - Pouvoir caractériser la stabilité de nos peignes:
 - En local, comparaison de peignes
 - A l'aide d'un second signal ultra-stable (mesure indépendante)
 - Accès au site web en préparation pour suivi de la qualité du signal reçu

Merci !



- Abdessamad Mbardi, Maxime Leuliet, Laurent Hilico
- Paul Martin, Pauline Yzombard, François Nez
- Clément Debavelaere, Pierre Cladé, Saïda Guellati
- N. Cahuzac, H. Elandaloussi, C. Rouille, P. Marie-Jeanne, T. Zanon-Willette, C. Janssen
- L'équipe T-REFIMEVE ! (Etienne, Anne, Olivier, Paul-Eric, Rodolphe, Michel ...)

