Foton
CNRS UMR 6082
Fonctions Optiques pour les Technologies de l'informatiON

synthèse photonique de 0 à 550 GHz avec une largeur de raie de 30 Hz

François Bondu, A. Hallal, S. Bouhier, G. Loas, L. Frein

Équipe DOP, INSTITUT FOTON
CNRS / Université de Rennes 1,
Campus de Beaulieu F-35042, Rennes CEDEX, France

plan

I. Dispositif expérimental

synthèse optique dans un dispositif fibré
stabilité
asservissements de fréquences des diodes laser

II. Résultats

Bruit de phase à 2, 10, 18, 40, 92 GHz
dérive de fréquence

III. Conclusion et perspectives

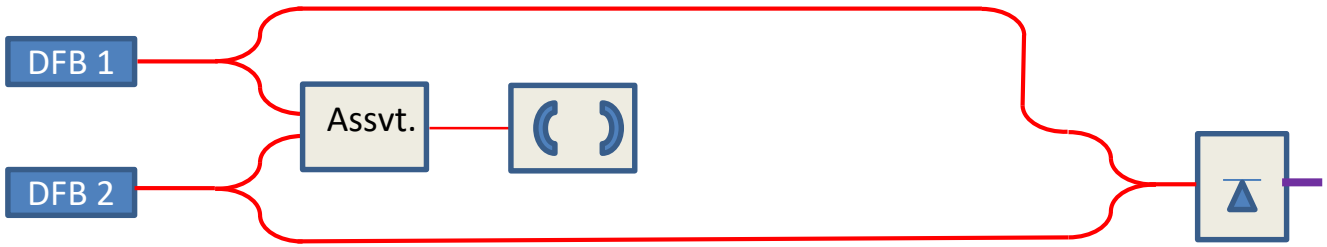
Synthèse continue
Utilisation pour la spectroscopie
Bruit de phase « ultimate » ?

Dispositif expérimental

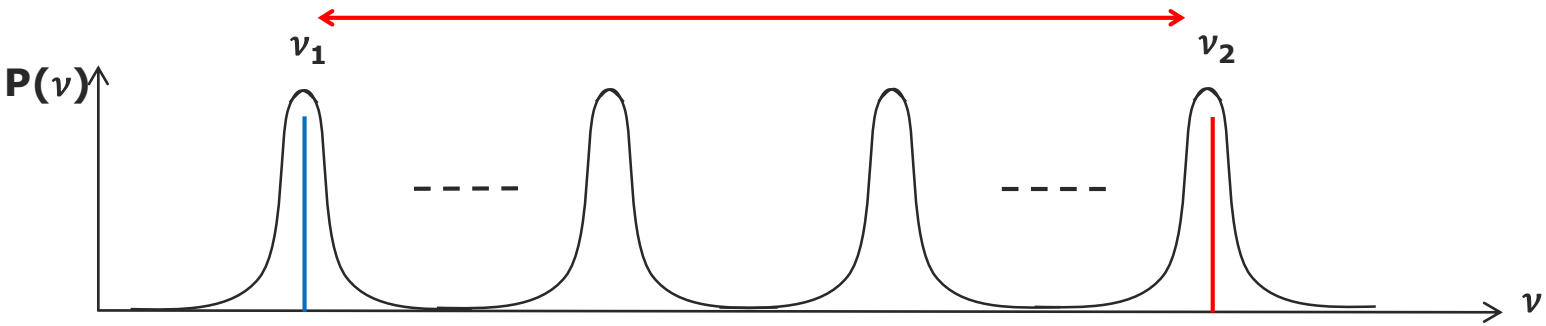
Battement de porteuses optiques sur un photomélangeur

deux lasers verrouillés en polarisations orthogonales sur une cavité

FR 2960354

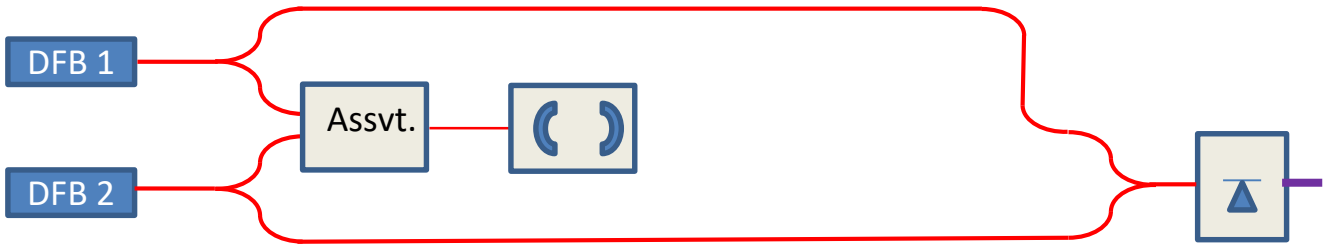


$\Delta\nu$ = fréquence mmw = multiple de l'intervalle spectral libre



Dispositif expérimental

Battement de porteuses optiques sur un photomélangeur



Stabilité dimensionnelle de la cavité $\tilde{\ell}$ (m/√Hz)

Avec un asservissement idéal :

$$\frac{\tilde{\nu}_1}{\nu_1} = \frac{\tilde{\ell}}{L}$$

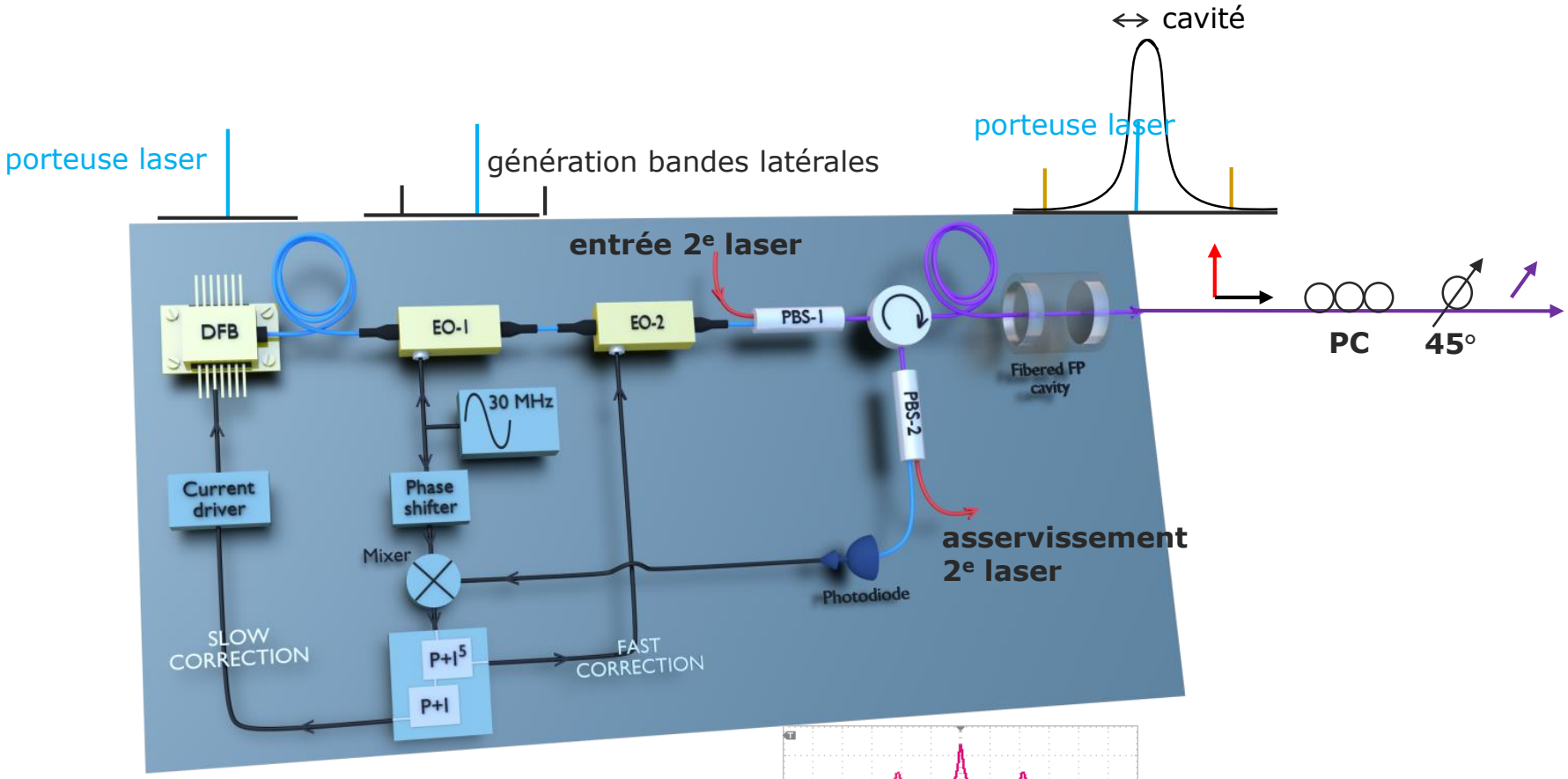
$$\frac{\tilde{\nu}_2}{\nu_2} = \frac{\tilde{\ell}}{L}$$

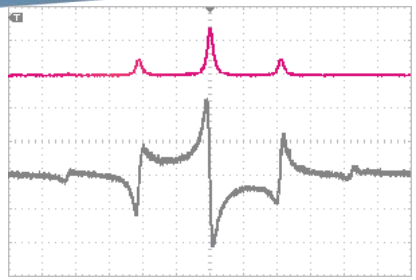
$$\frac{\tilde{\nu}_1 - \tilde{\nu}_2}{\nu_1 - \nu_2} = \frac{\tilde{\ell}}{L}$$

Stabilité dimensionnelle relative reportée sur la stabilité relative de fréquence

Dispositif expérimental

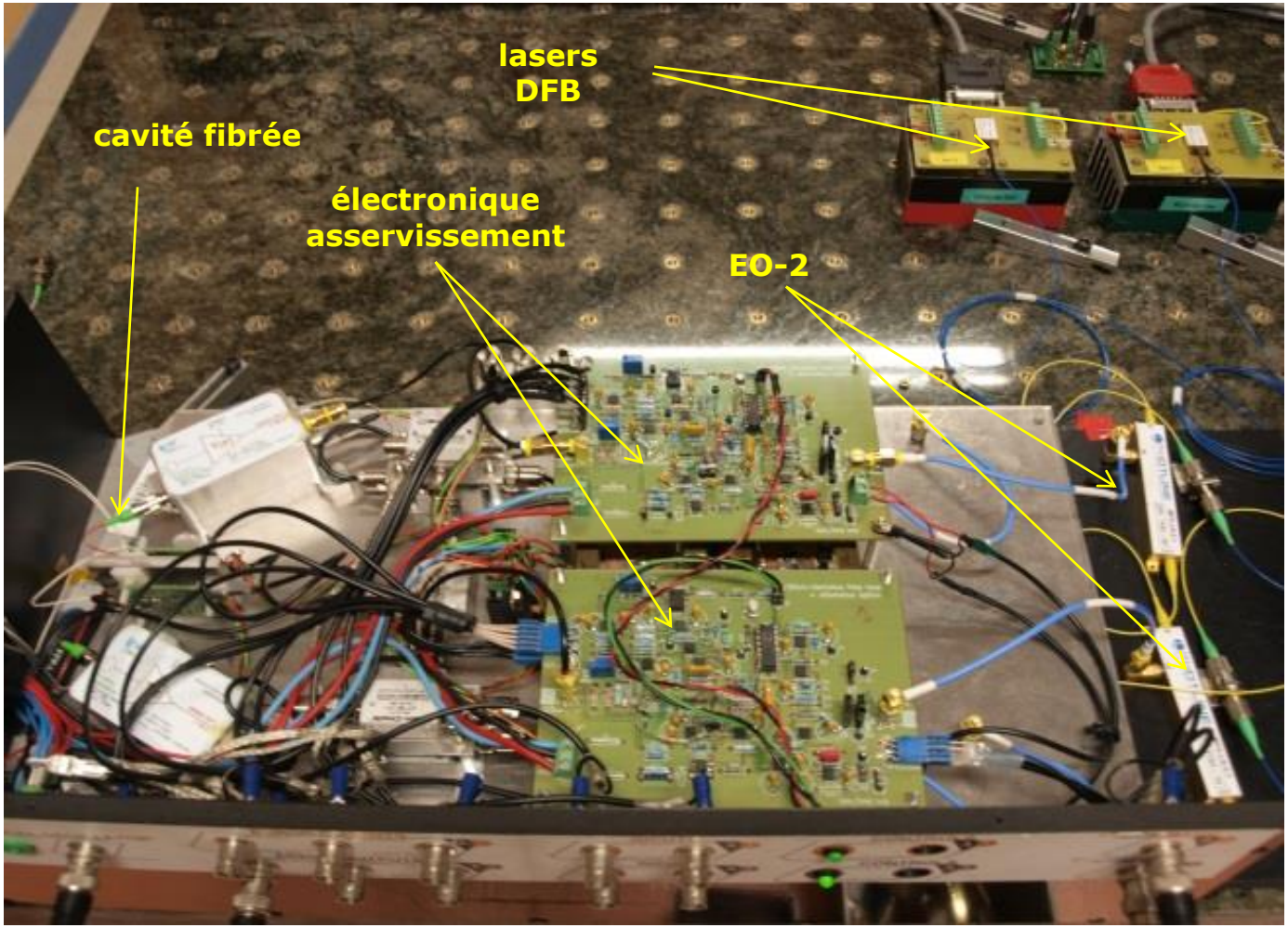
Génération du signal d'erreur : technique Pound-Drever-Hall





Signal d'erreur :
plage de linéarité
≈ largeur de raie

Dispositif expérimental



Dispositif compact, robuste, composants télécommunications optiques

Dispositif expérimental

Composants de boucle

EBLANA

λ sur grille ITU, 1550 nm

largeur de raie 100 kHz

plage d'accord réelle > 4 nm

P = 4 mW

≈ 20 GHz / K

Vescent

< 100 nA/√Hz

Stabilisation de température à 0.1 mK

Extrêmement stable

MICRON OPTICS

Largeur 1 MHz

ISL 1 GHz

Foton

Fréquences obtenues répétables, simples et robustes

Dispositif expérimental

Asservissement

Électronique :

maintenir signal d'erreur < valeur pic

- très grande bande passante
- très peu de « retard pur »

Conception :

+ version 40 fois plus rapide que celle de Virgo
+ modèle LTspice
+ fréquence gain unité intrinsèque 42 MHz

Thèse Ayman HALLAL 2017
Université Rennes 1

Cavité :

Plus la cavité est étroite, plus l'asservissement est aisé !

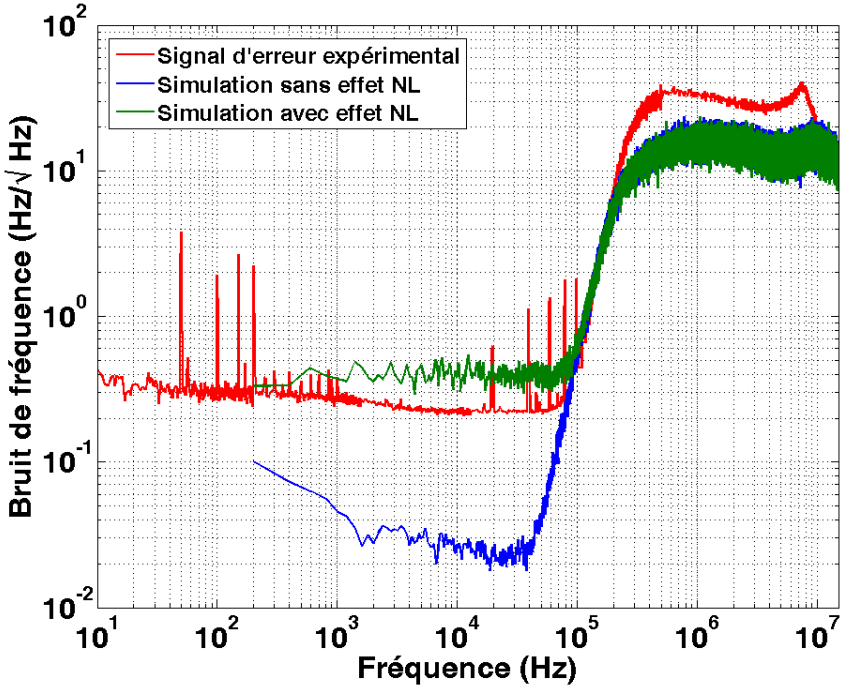
Boucle :

fréquence gain unité : ≈ 10 MHz (retard pur : longueur de fibres et câbles)

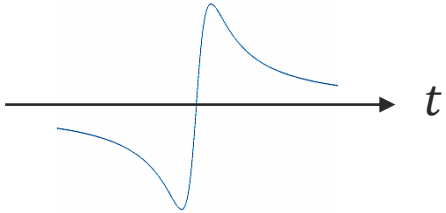
Pas de saturations électroniques : performances

Résultats

Porteuse optique : effets non linéaires sur le signal d'erreur



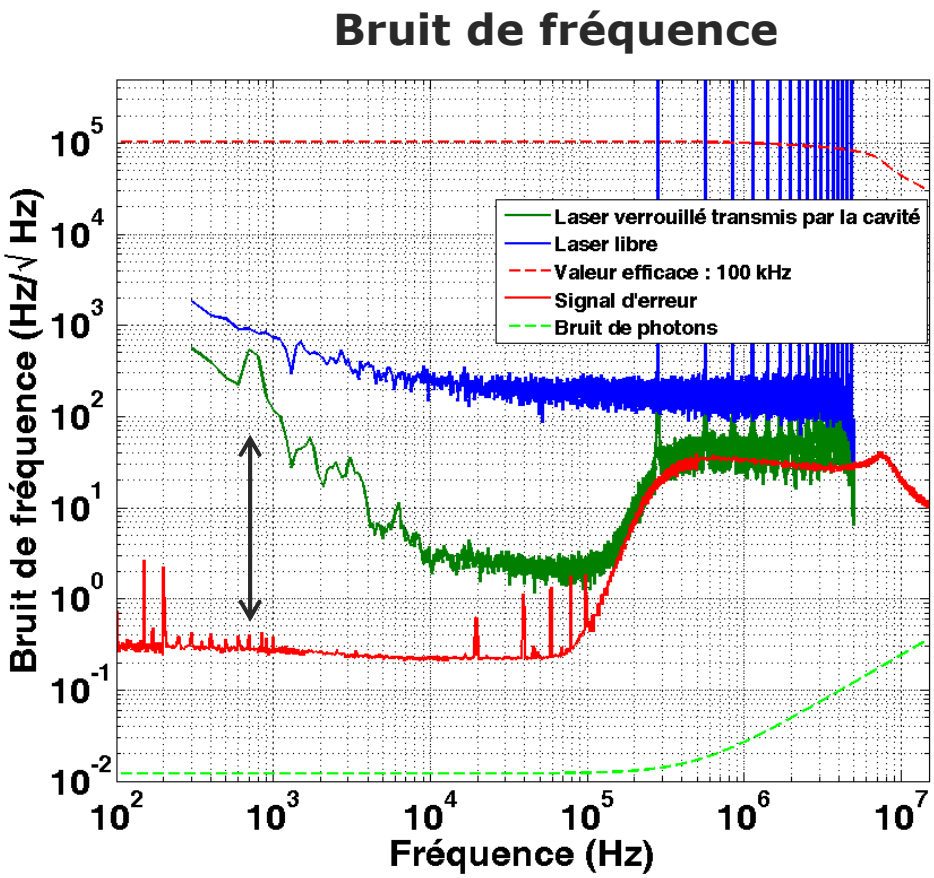
- Simulation à partir des données temporelles
- Fonction non linéaire du signal d'erreur PDH :
- $$\frac{\nu(t)}{(1+\frac{\nu(t)^2}{f_p^2})}$$



où $\nu(t)$ = Signal d'erreur
f_p = demi-largueur de raie de la cavité

Résultats

Porteuse optique : résultats sur la stabilisation de fréquence

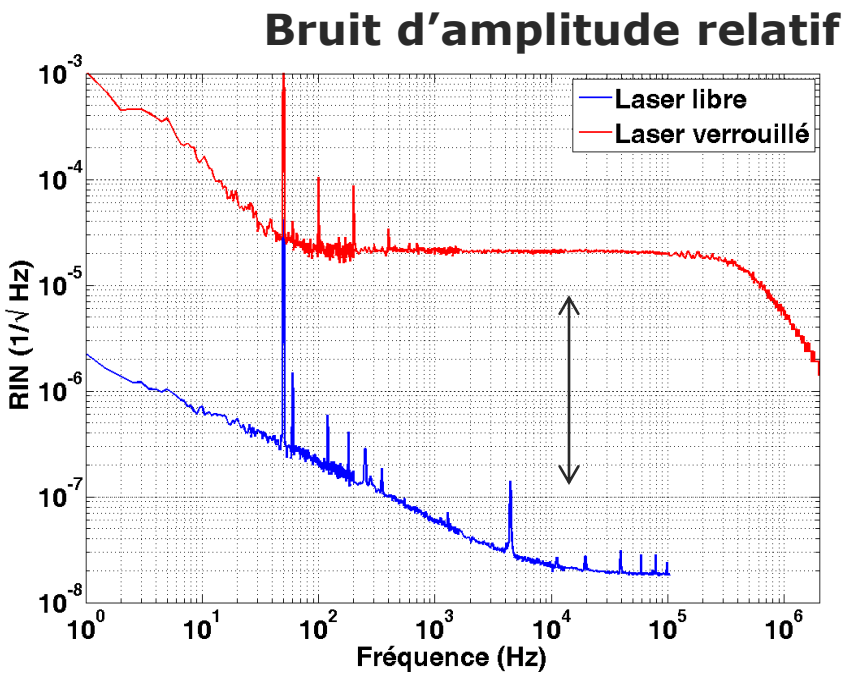


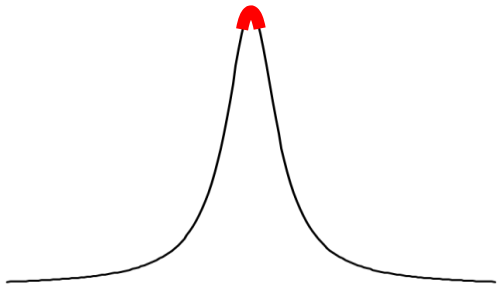
Dégradation :

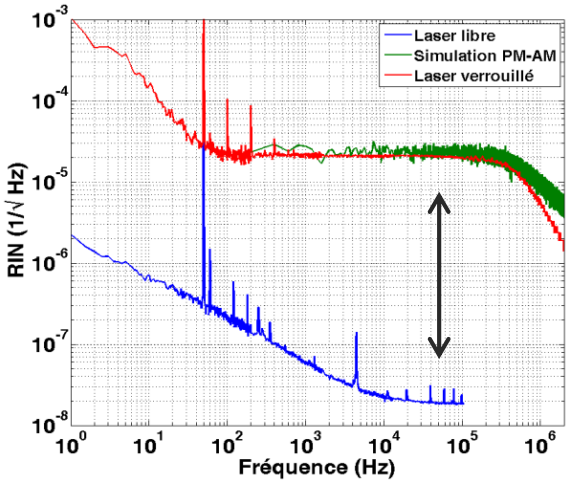
effets opto-thermiques

Excellentes performances pour une porteuse optique

Porteuse optique : résultats sur la puissance





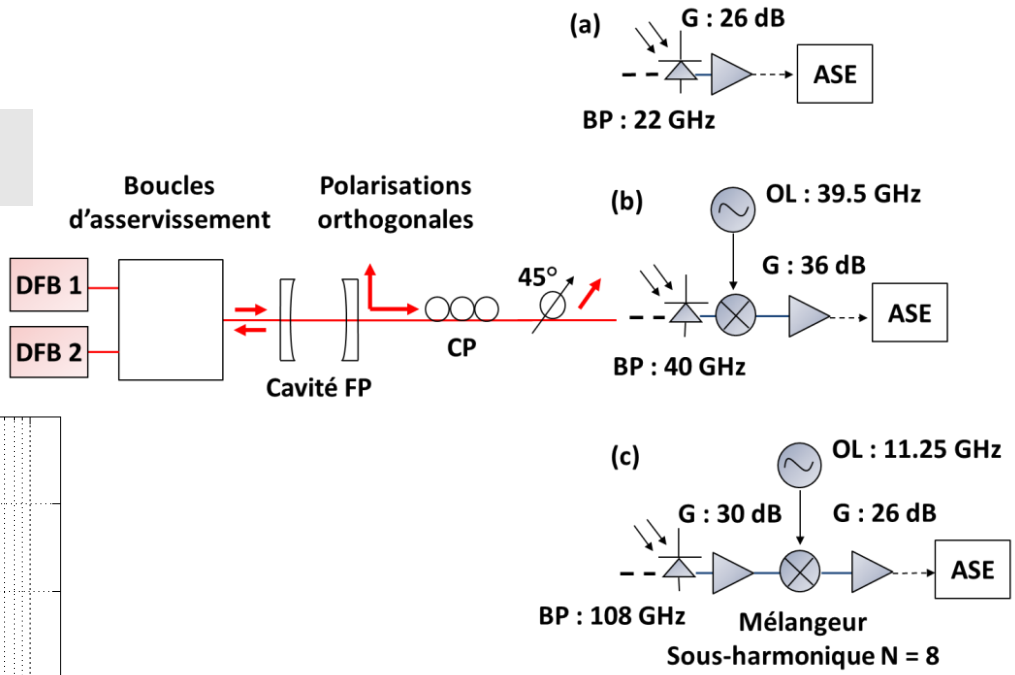


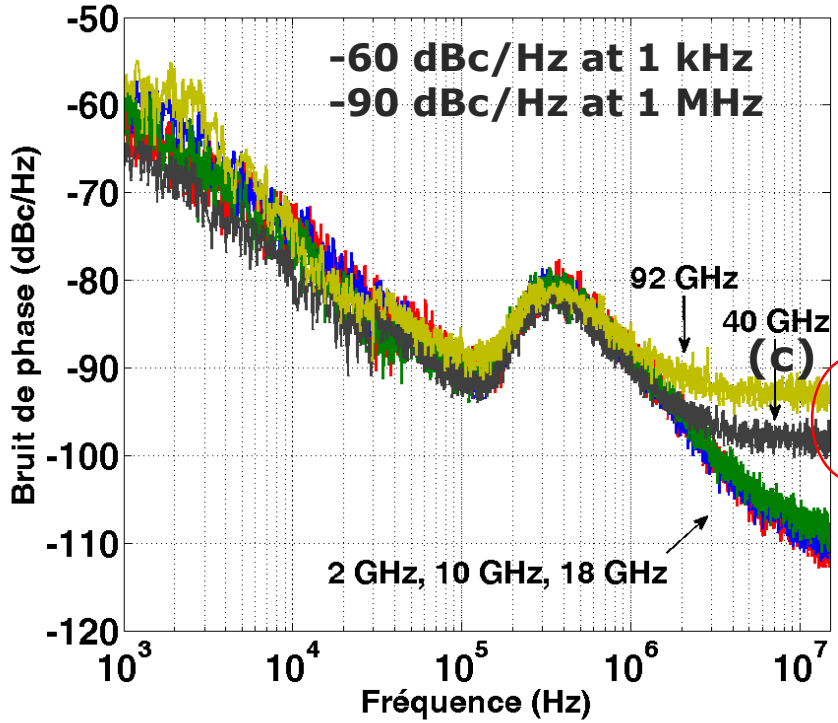
Dégradation du bruit d'amplitude modélisée

Résultats

Bruit de phase du battement

A. Hallal et al, IEEE TMTT 2017
'Synthesis of a 30 Hz linewidth wave tunable over 500 GHz'





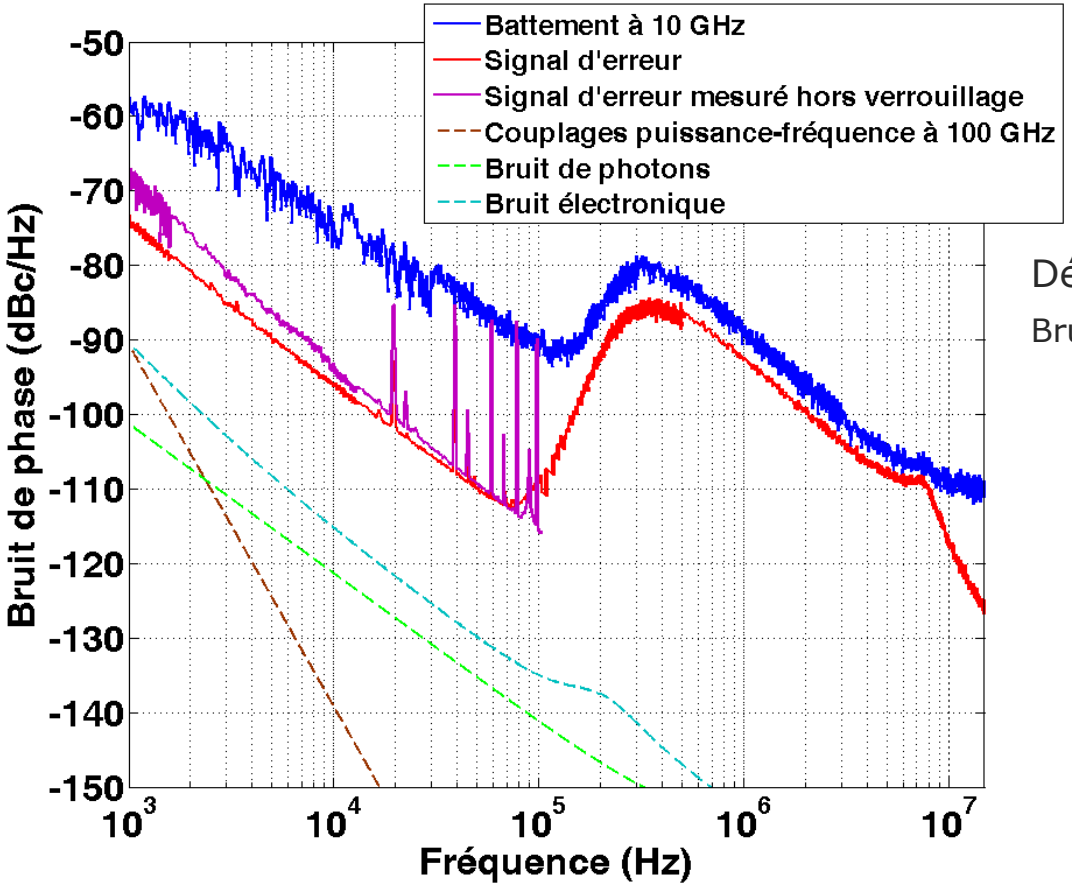
Limite: bruit thermique électrique

Puissance optique du battement : -17 dBm

Performances de bruit de phase

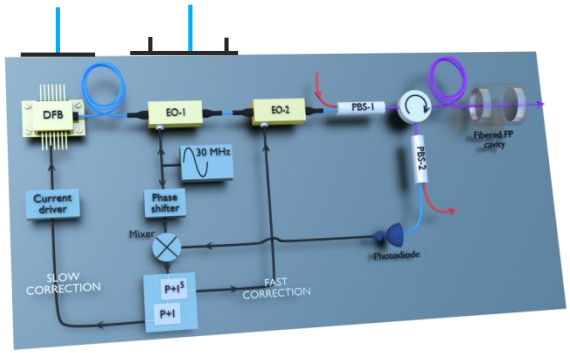
Résultats

Bruit de phase du battement



Dégradation :

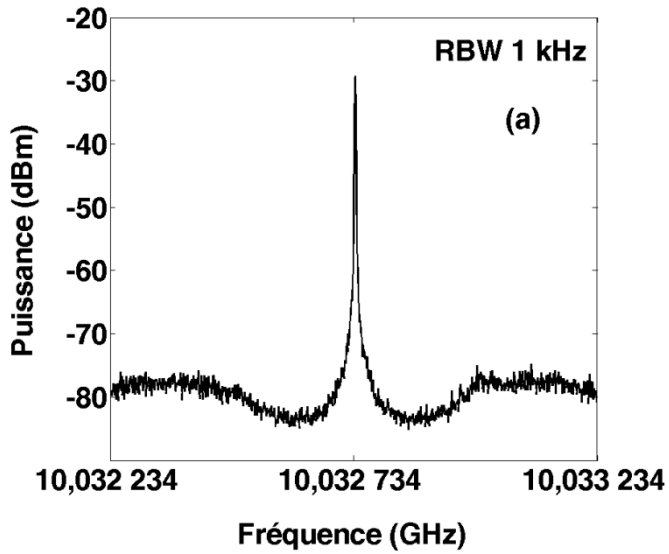
Bruits autour de la fréquence de modulation

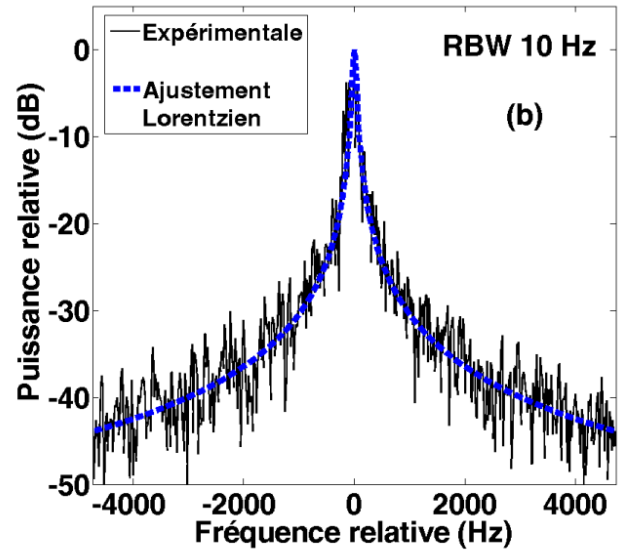


Performances de bruit de phase

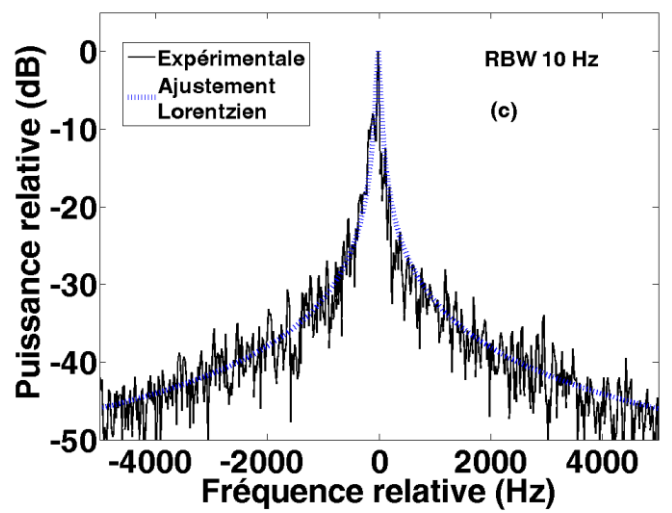
Résultats

« largeur de raie »





Fréquence intermédiaire à 1 GHz du battement à 92 GHz



Largeur de raie de battement

à 10 GHz : **30 Hz**

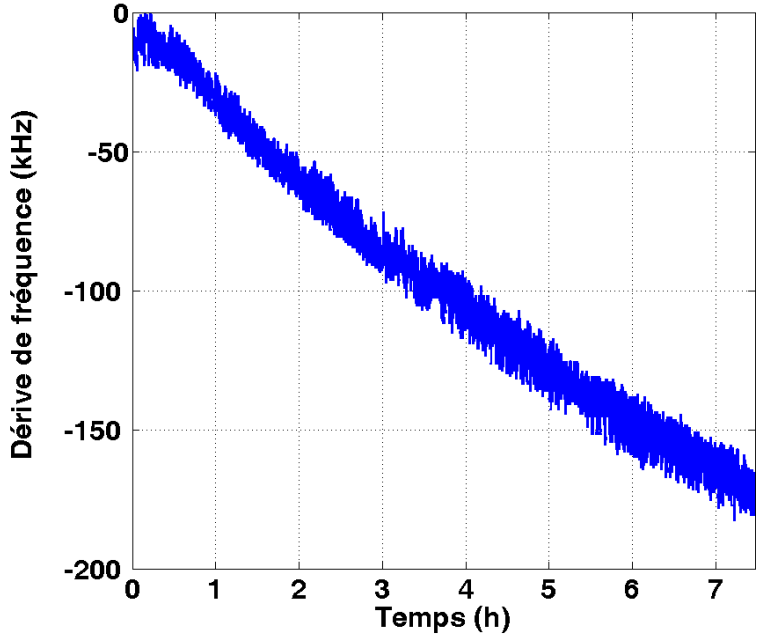
à 92 GHz : **25 Hz**

OK pour mesure en spectroscopie moléculaire, à T. ambiante

Résultats

Dérive de fréquence

Dérive à long terme du battement à 10 GHz



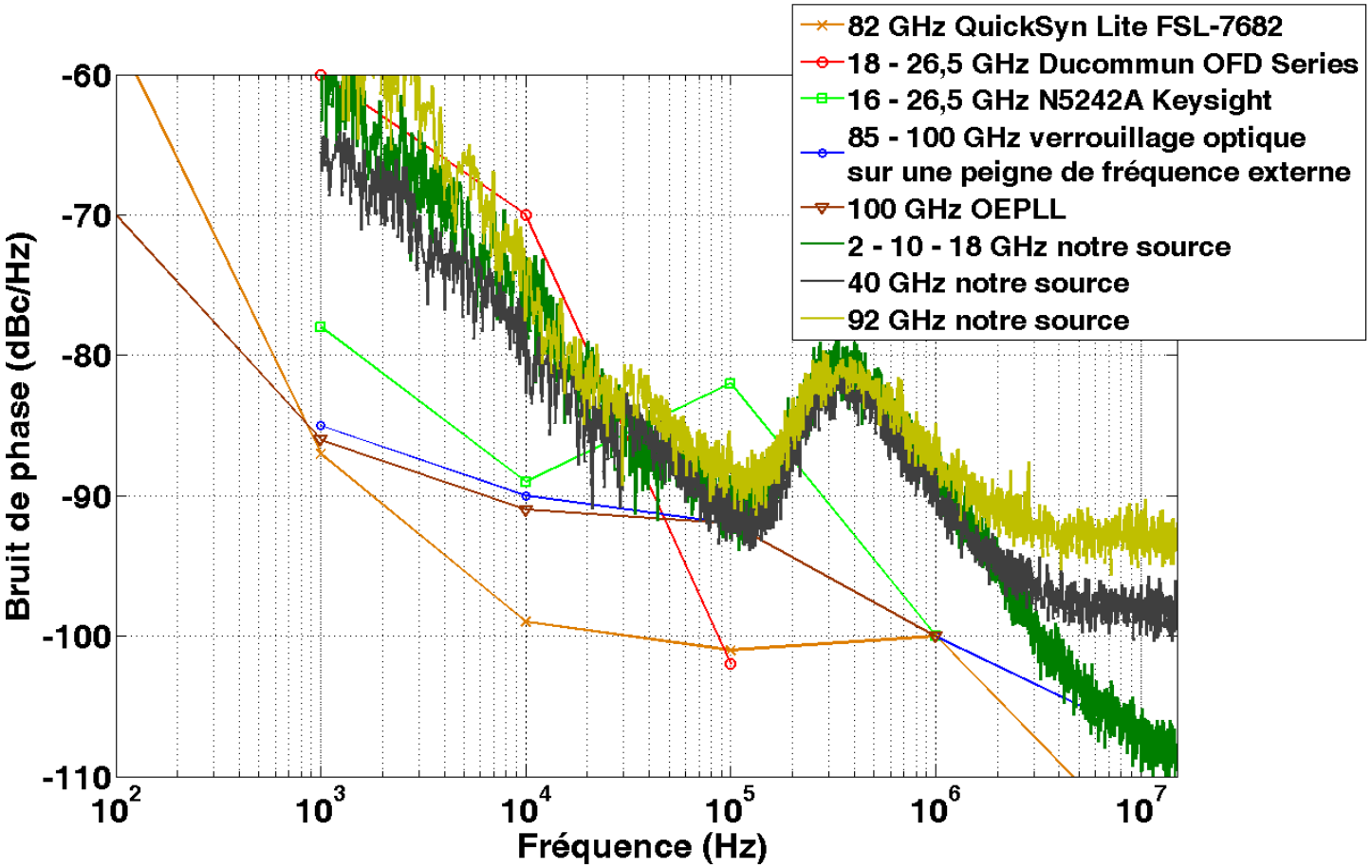
Stabilité dimensionnelle de la cavité

- Pas d'isolation thermique
- Pas de contrôle de température

Performances de bruit de phase

Résultats

Comparaisons



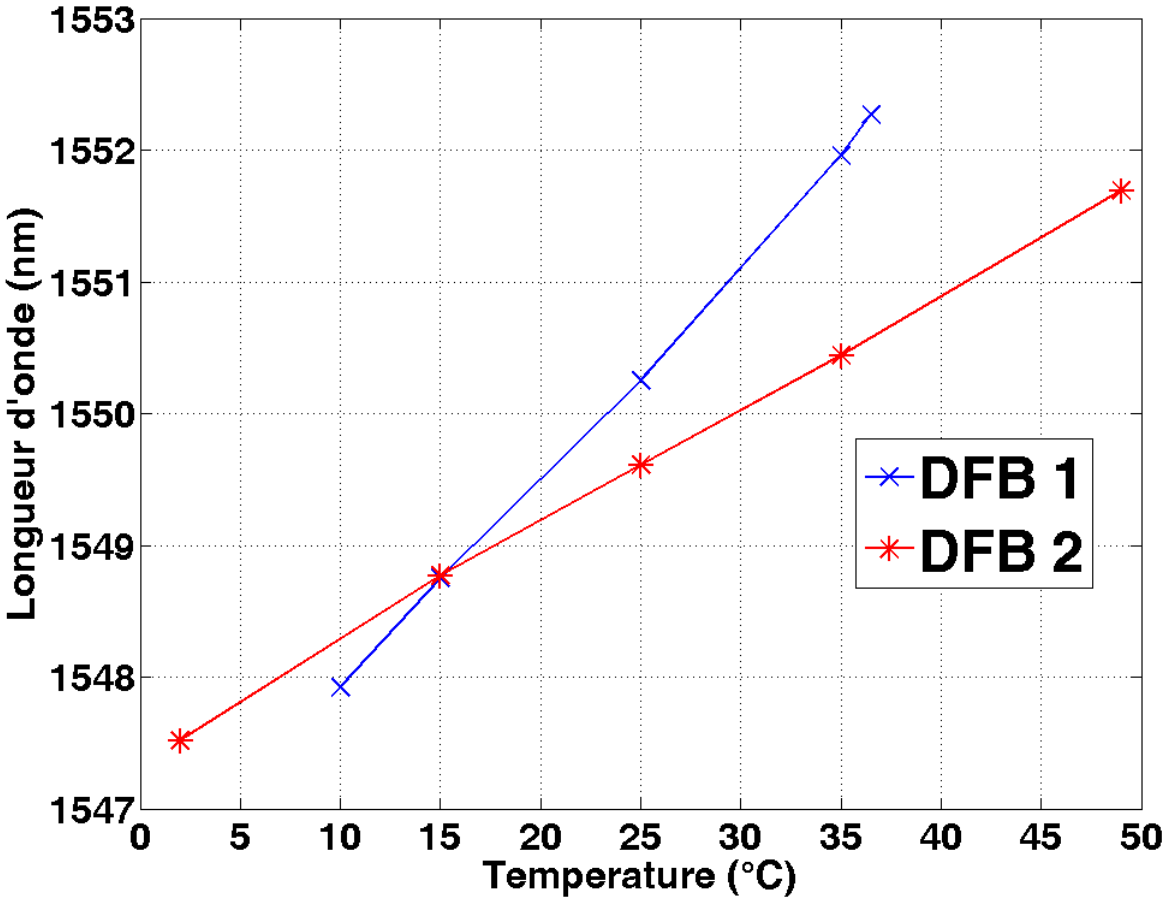
Performances OK produits commerciaux… extrapolables à plus haute fréquence

Résultats

Extrapolation

Lasers DFBs utilisés pour la génération du battement :

→ 590 GHz max d'écart



Accessibilité :
Photodiodes « décalées »

Performances extrapolables à plus haute fréquence

plan

I. Dispositif expérimental

synthèse optique dans un dispositif fibré
stabilité
asservissements de fréquences des diodes laser

II. Résultats

Bruit de phase à 2, 10, 18, 40, 92 GHz
dérive de fréquence

III. Conclusion et perspectives

Synthèse continue
Utilisation pour la spectroscopie
Bruit de phase « ultimate » ?

Conclusions

+ 1ère stabilisation de lasers très accordables sur une cavité fibrée
+ source accordable de DC à 550 GHz par pas de ≈ 1 GHz
+ Excursion de fréquence sans aucun changement dans le dispositif
  (température des diodes lasers)
+ asservissement fiable et robuste
+ fréquences reproductibles à paramètres (T° lasers) identiques
+ effets de dégradations par rapport à situation idéale modélisés
+ bruit de phase ≈ sources commerciales
+ bruit de phase ok pour spectroscopie à basse pression, à température ambiante

+ Oscillateur Local pour la radioastronomie submillimétrique ?

Performance OK produits commerciaux… extrapolables à plus haute fréquence

Perspectives

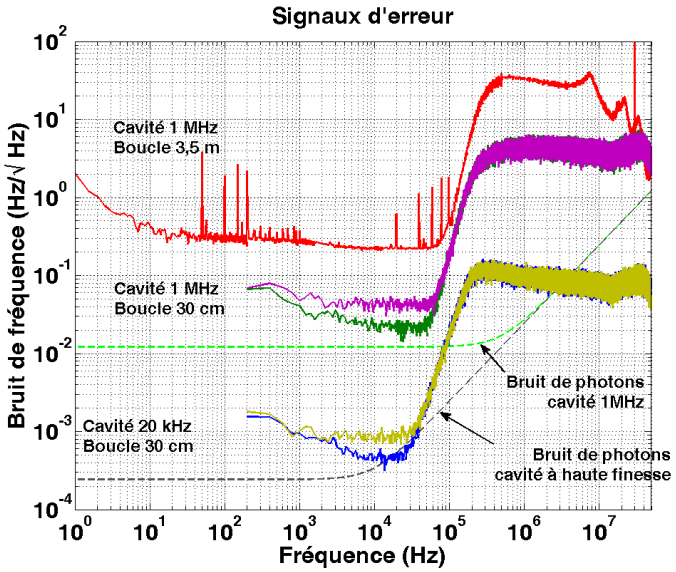
Sur ce dispositif

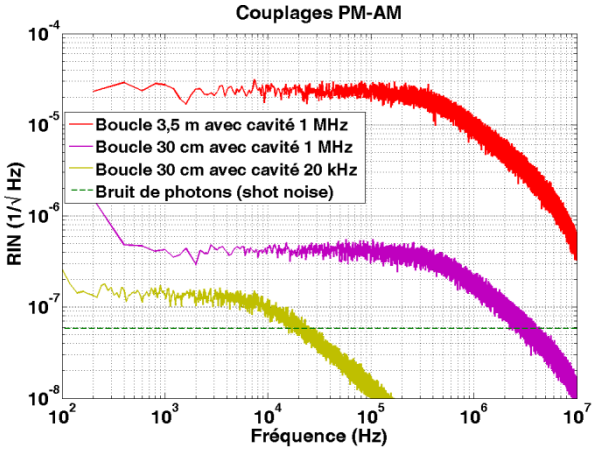
+ boucle améliorée :

- Longueur 30 cm :
  - 22 MHz de fréquence de gain unité

- Cavité de largeur 20 kHz
  - Meilleur filtrage,
  - Moins d'effets non linéaires
  - Moins de couplage PM-AM

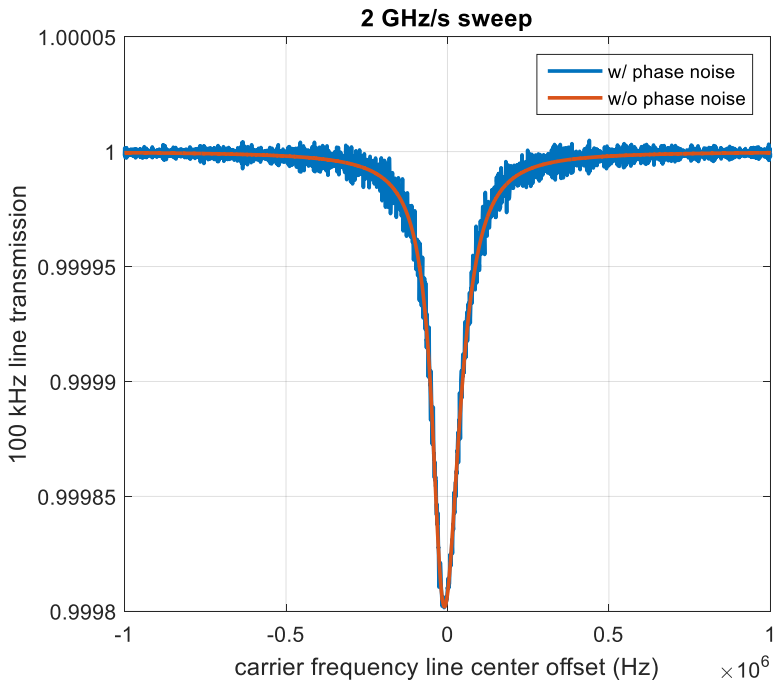
- Cavité isolée thermiquement
  et asservie en température





Résultats

Bruit de phase et spectroscopie moléculaire



Bruit de phase :

Signal temporel DSP = DSP mesurée

+ ajout d'une dérive de fréquence

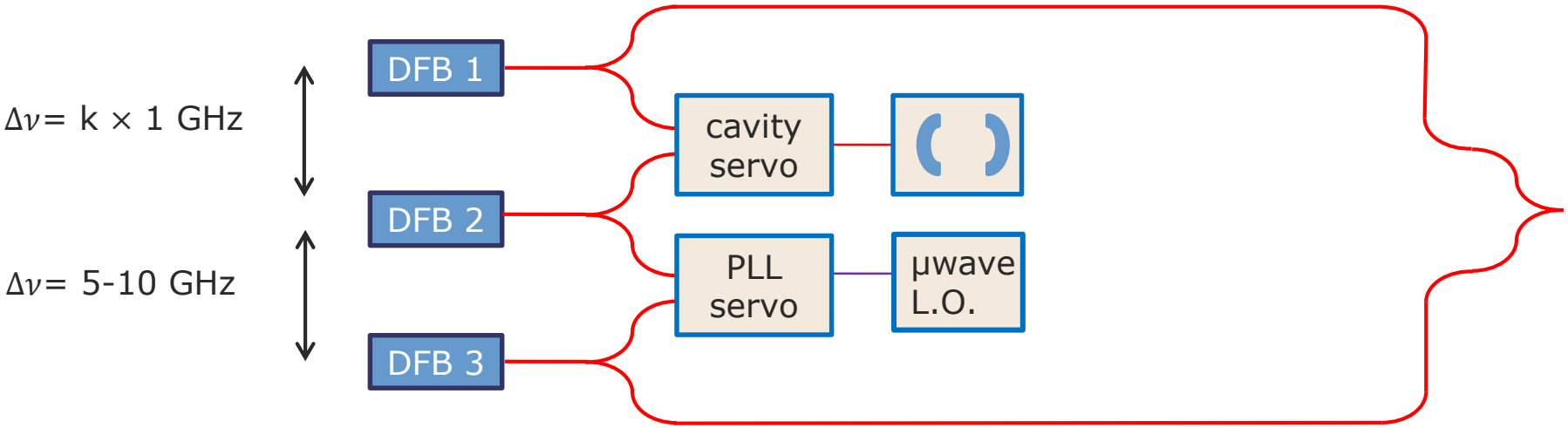
résultat sur une mesure d'amplitude en transmission d'une résonance de 100 kHz

OK pour mesure en spectroscopie moléculaire, (largeur Doppler)

Bruits de phase plus bas possibles… mais pour quoi ??

Perspectives

Synthétiseur de fréquence

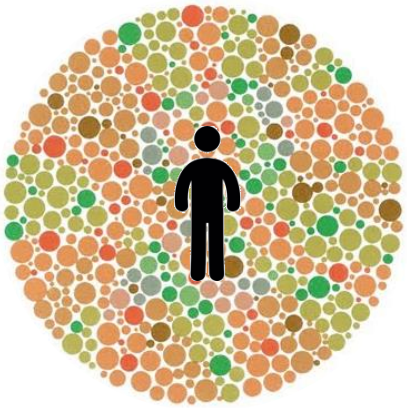


En cours de réalisation

Un effet « vernier » avec une PLL

Perspectives

Spectroscopie pour la mesure du métabolisme des microorganismes



Microbiote humain

Mycorhizes

Détection quorum

Fermentation

Métabolomique pour la biologie intégrative

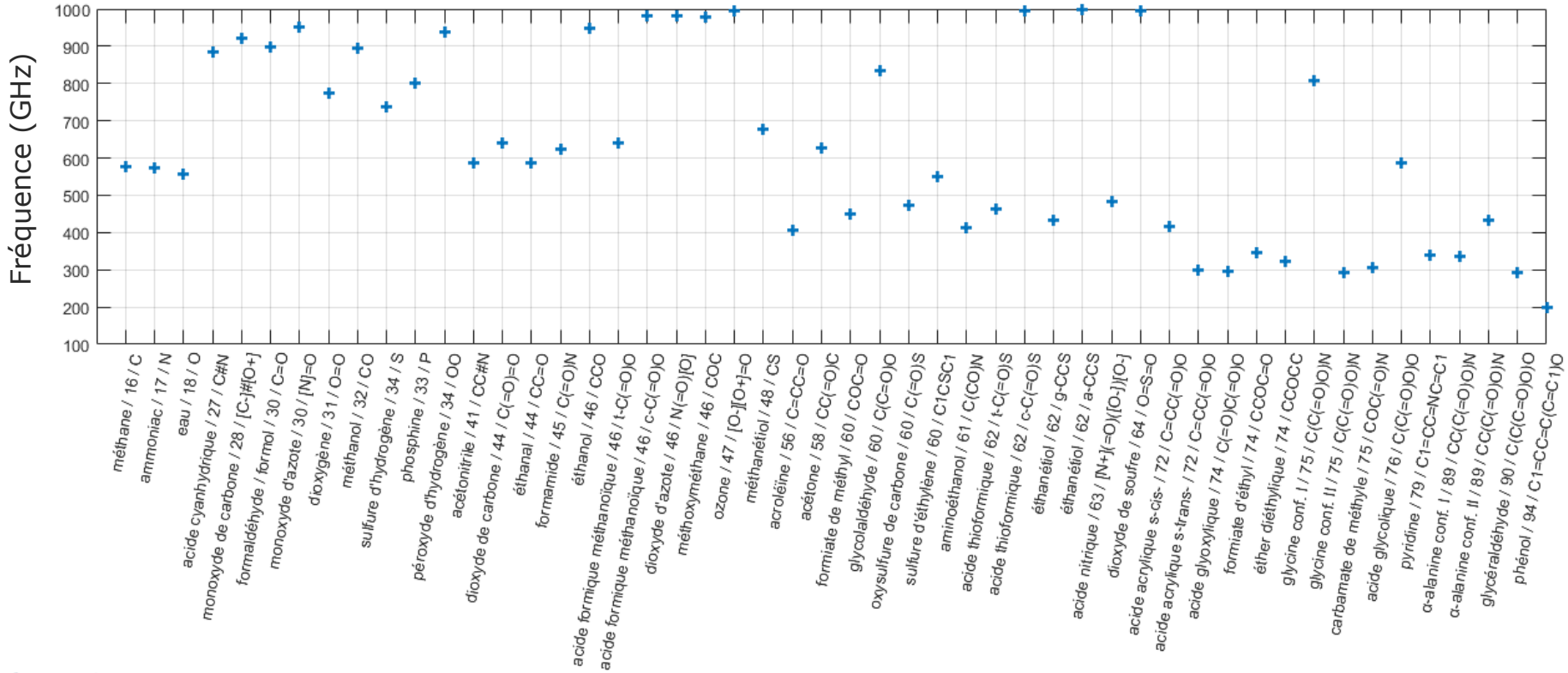
Perspectives

Spectroscopie pour la mesure du métabolisme des microorganismes

Molécules H, O, C, N
Bases de données HITRAN, JPL, CDMS, …

Raie la plus intense dans la bande 100 GHz – 1 THz

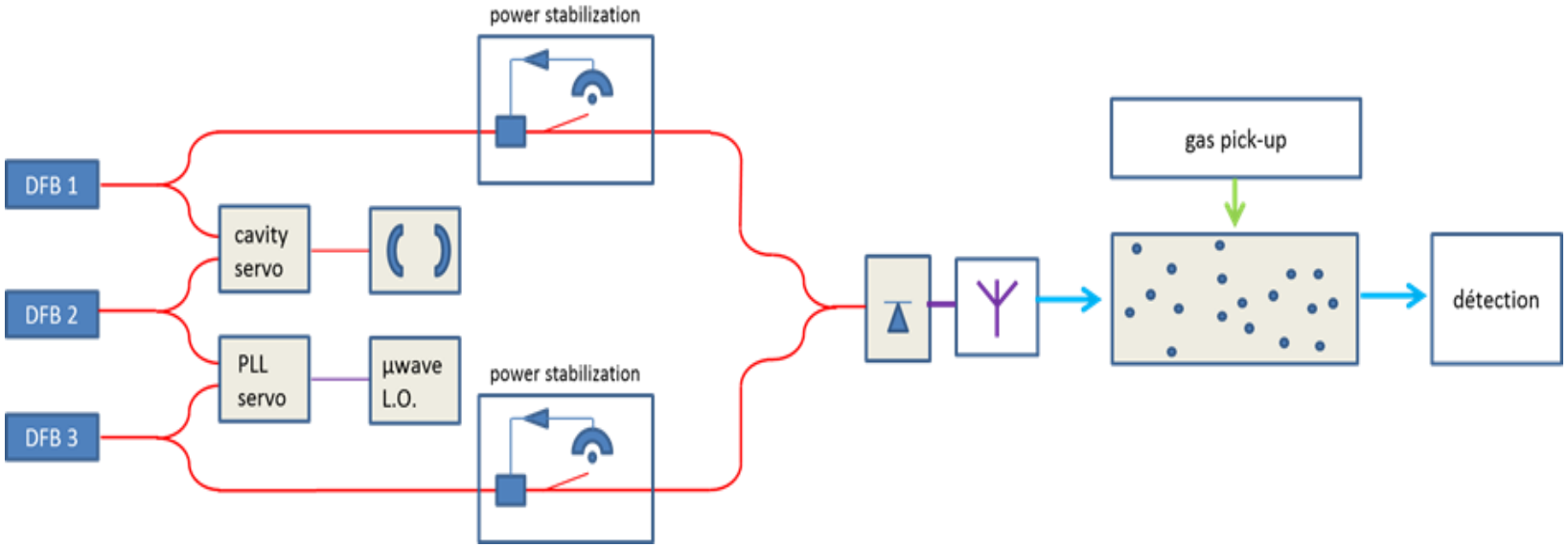
8 cm⁻¹ ⇔ 250 GHz ⇔ 1.2 mm



Excursion de fréquence ←→ Exhaustivité des métabolites

Perspectives

Spectroscopie pour la mesure du métabolisme des microorganismes



Source photonique, optique fibrée

Photodiode UTC + antenne IEMN

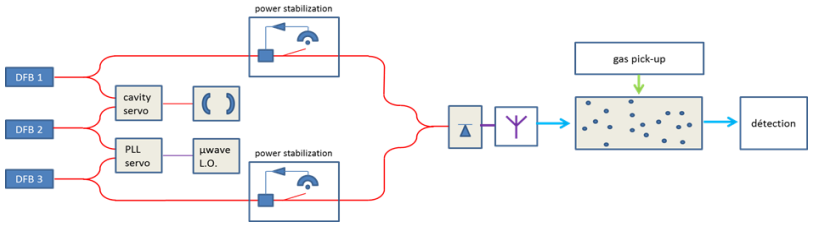
Cellule à basse pression : grande résolution (qq 100 kHz), molécules intactes

Détection électro-optique auto-hétérodyne : basse bande de bruit

Système à base d'optique fibrée

Perspectives

Spectroscopie pour la mesure du métabolisme des microorganismes



Seuil (sur air initial N_2,O_2)

$$q_{lim} = 44.10^{-6}\left(\frac{LoD}{3}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{v_{sweep}}{200\ \mathrm{kHz}}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{S_0}{10^{-16}\ /\mathrm{Hz}}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{50\ \mathrm{cm}}{L}\right)\left(\frac{1\ \mathrm{mbar}}{P}\right)\left(\frac{10\ \mu\mathrm{W}}{P_{THz}}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{1\ \mathrm{mm}}{w_{THz}}\right)\left(\frac{\sigma_\nu}{197\ \ \mathrm{kHz}}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{8.2\ 10^{-23}\ \mathrm{cm}^{-1}/(\mathrm{mol.cm}^{-2})}{S}\right)$$

analyse — instrument — molécule (formiate d'éthyl)

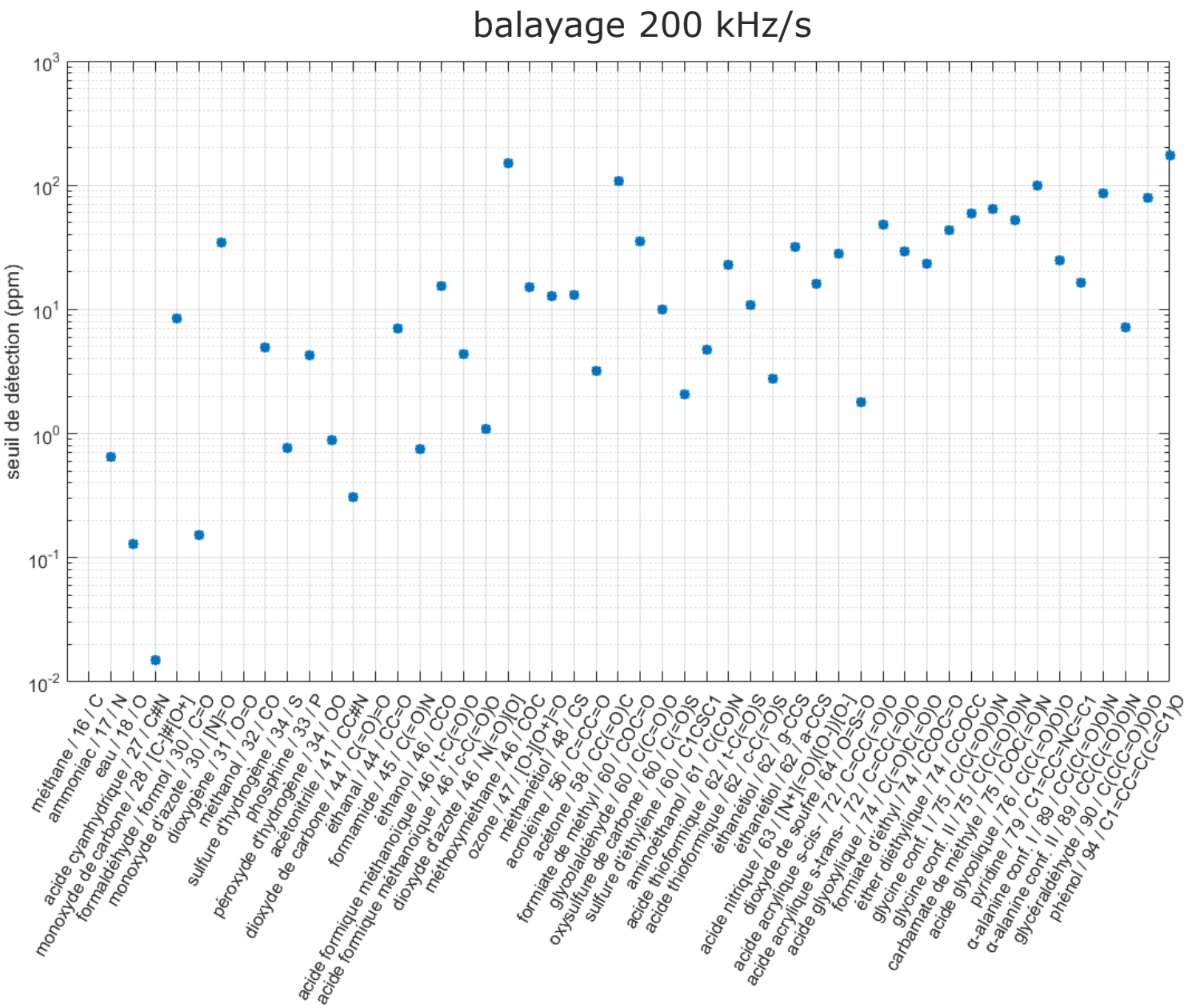
excursion de 100 GHz à 1 THz, à 2 GHz/s :
seuil 4.4 10^{-3}, temps de mesure 7.5 minutes

Sensibilité ⇔ Stratégie d'analyse :

- analyse apriori (molécule donnée)
- analyse ciblée
- analyse non ciblée

Accord sensibilité et stratégie d'analyse

Perspectives



Perspectives

Des révolutions en biologie amenées par la génomique et la métabolomique

y participer

un instrument compact, accessible

démontrer une pertinence par rapport à

- la chromatographie (LC-MS, GC-MC)
- la NMR
- la spectroscopie infrarouge (groupes fonctionnels)
- les sources électroniques

- Seulement les molécules polaires

  Gaz de pollution ?

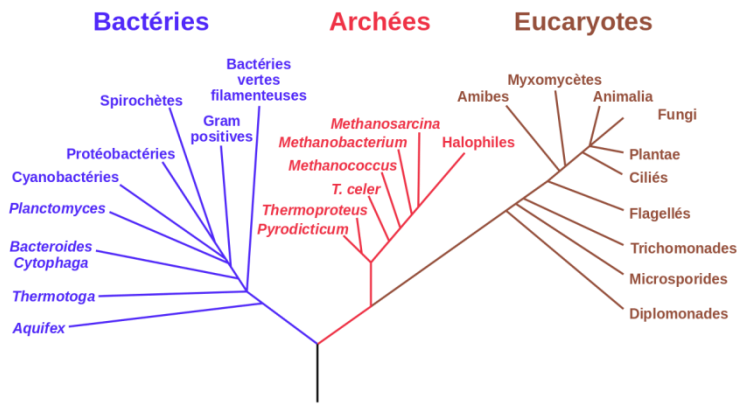
- Un instrument source de développements de sous-systèmes « THz »

  avec un grande cohérence spectrale

Foton
CNRS UMR 6082

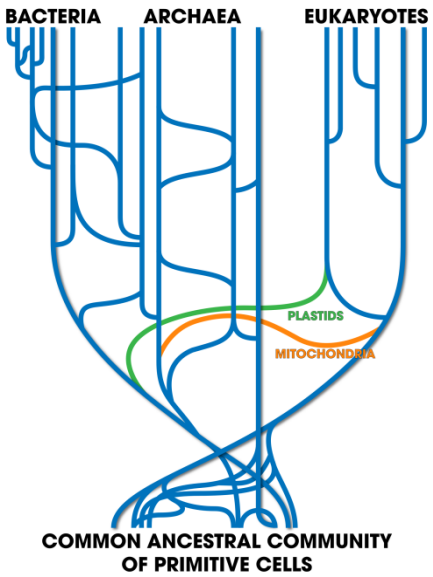
Diversité du vivant

Arbre phylogénétique de la vie



D'après C. Woese, 1977 / PNAS 1990

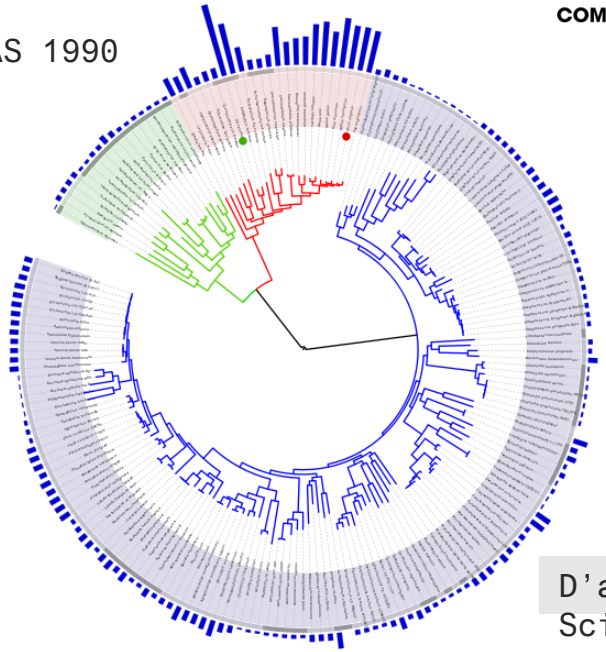
Transfer latéral de gènes



M. Syvanen, J. theor. biol.

Test of LUCA
Last Universal Common Ancestor

D. Theobald, Science 2010



D'après F. Ciccarelli, Science 2006