



HAL
open science

Interférométrie à dérive de fréquence pour la mesure de la lumière parasite cohérente sur l'instrument spatial LISA, Laser Interferometer Space Antenna

Amaël Roubeau-Tissot, Michel Lintz, Mikhael Pichot, Jean-Pierre Coulon,
Marco Nardello

► To cite this version:

Amaël Roubeau-Tissot, Michel Lintz, Mikhael Pichot, Jean-Pierre Coulon, Marco Nardello. Interférométrie à dérive de fréquence pour la mesure de la lumière parasite cohérente sur l'instrument spatial LISA, Laser Interferometer Space Antenna. OPTIQUE Nice 2022, Jul 2022, Nice, France. , 2022. hal-03761524

HAL Id: hal-03761524

<https://hal.science/hal-03761524>

Submitted on 26 Aug 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Abstract :

La lumière parasite cohérente constitue naturellement, sur une instrumentation optique, un écueil à bien des égards. Elle affecte l'exactitude ou la résolution des mesures, ou leur dynamique, ou encore la résolution des images. Des méthodes existent pour la mesure de la lumière parasite au niveau composant (réflectométrie, diffusométrie). Mais la mesure de la lumière parasite au niveau système peut poser des difficultés une fois le système assemblé (impossibilité d'introduire, par exemple, une instrumentation de mesure de la lumière diffusée).

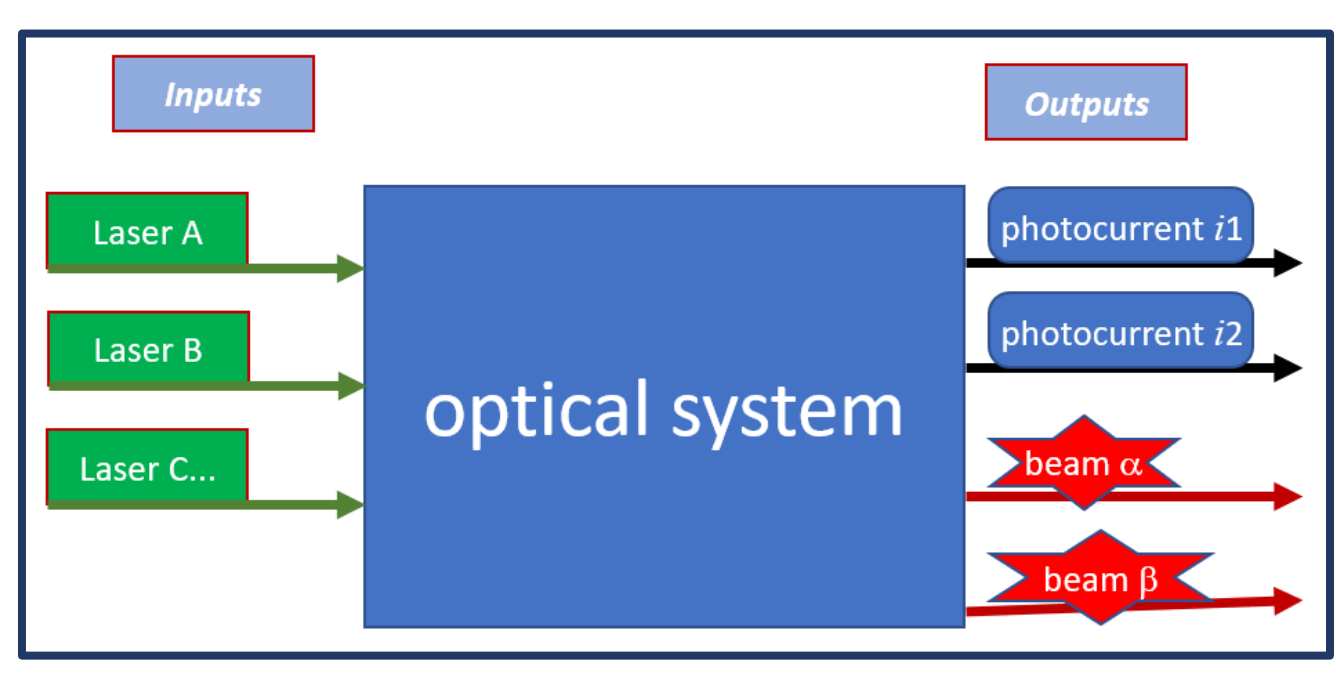
Nous développons une méthode générale de mesure de la lumière parasite cohérente au niveau système, permettant de déterminer quelles sont, à l'intérieur d'un système à tester (SAT), les différentes sources de lumière parasite, et la fraction de lumière parasite qui leur correspond. Les méthodes de type "temps de vol" injectent des impulsions courtes dans le système, et on mesure des signaux rapides traduisant, outre l'impulsion de lumière nominale, les "échos" associés aux différentes sources de lumière parasite, et les retards associés. Cela implique que les détecteurs du SAT soient suffisamment rapides (\approx picosecondes) et par ailleurs que leur dynamique permette de détecter de très petites impulsions: $\approx 10^{-12}$ si on souhaite détecter une amplitude optique parasite de 10^{-6} comparée à l'amplitude nominale.

Plutôt qu'utiliser des impulsions courtes nous utilisons une source laser monomode dont la fréquence optique est balayée, et nous détectons tous les signaux sortants (optiques comme électriques). Sur chacun des signaux, l'observation d'un comportement de type frange d'interférence indique la présence de lumière parasite, interférant avec le faisceau nominal. La différence de chemin nominal/parasite est indiquée par la fréquence de ces franges d'interférence, comme en réflectométrie FMCW. Leur mesure ne requiert aucune détection rapide.

Méthode générale :

Hypothèses: le système à tester (SAT)
 - reçoit les faisceaux de différents lasers (A, B, ...)
 - comporte différents photorécepteurs (1, 2, ...)
 - et/ou émet différents faisceaux (α, β, \dots)

Méthode pour la mesure de lumière parasite: simultanément,
 - injecter laser A et scanner sa fréquence optique
 - enregistrer les photocourants $i_1(t), i_2(t), \dots$
 - enregistrer les puissances $P_{\alpha}(t), P_{\beta}(t), \dots$
 - chercher dans les spectres de ces signaux les traces (franges) d'interférences dues à des sources localisées de lumière parasite



Puis idem en injectant Laser B, Laser C, ...

La méthode utilise la dérive de fréquence de la réflectométrie FMCW, mais l'applique à une source quelconque de lumière parasite.

Le plancher visé pour l'amplitude fractionnaire de lumière parasite impose le plancher de bruit sur les signaux enregistrés.

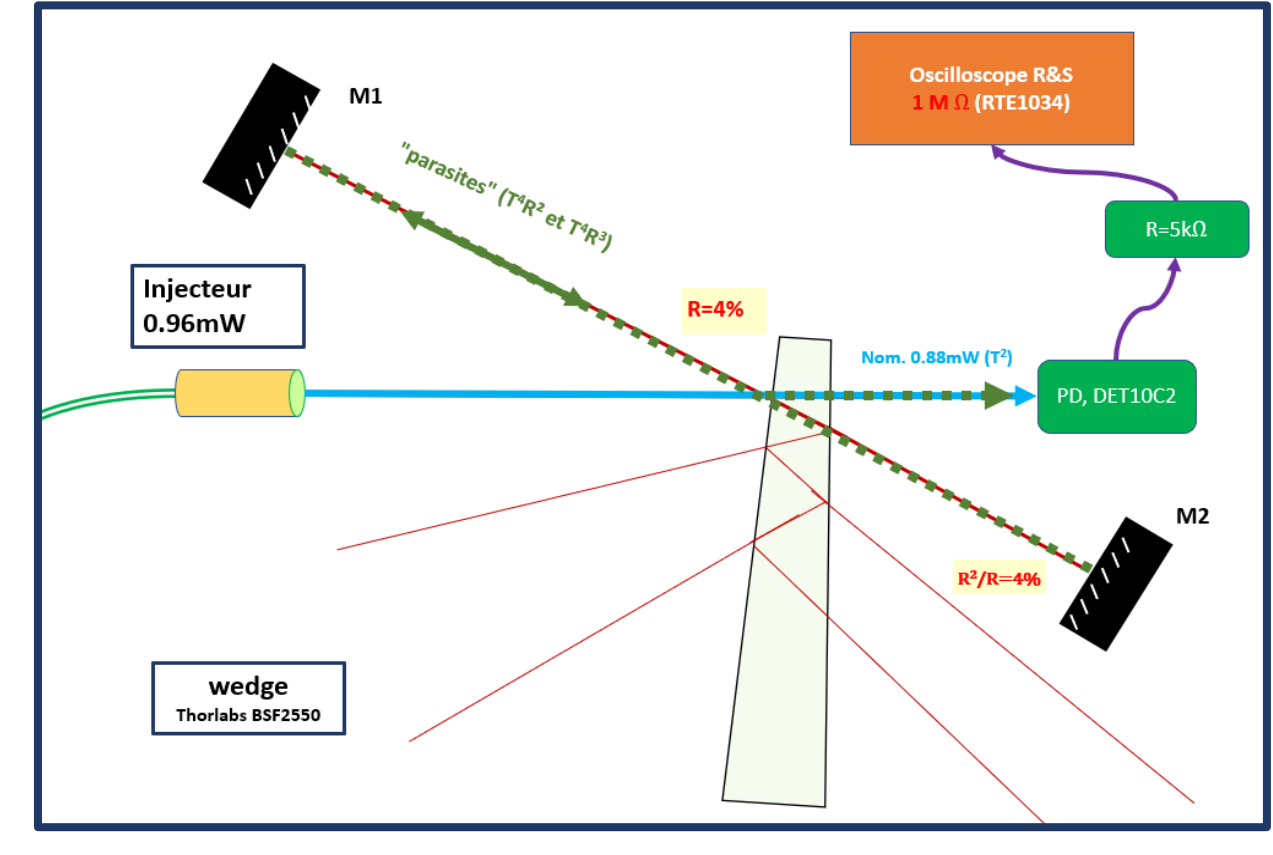
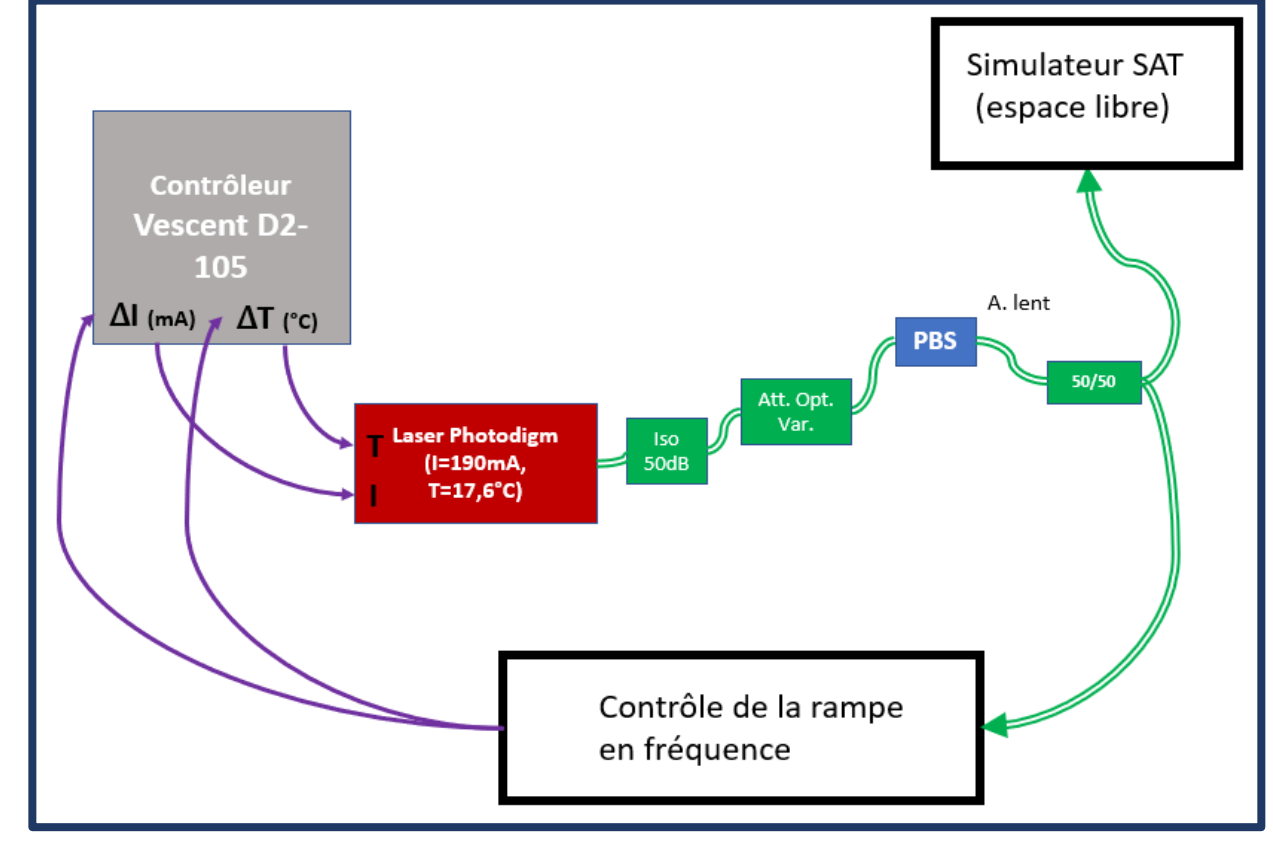
L'instrumentation de mesure de la lumière parasite au niveau système :

L'instrumentation à développer doit, pendant que la fréquence optique du laser injecté est balayée linéairement, enregistrer tous les photosignaux du SAT. L'analyse spectrale de l'enregistrement du photo-signal permet d'établir la liste [amplitude vs position] des différentes contributions de lumière parasite pour ce faisceau injecté et ce photodétecteur. Si une frange d'interférence est observée à la fréquence f_{itf} , elle est attribuée à un chemin de lumière parasite de longueur L_{paras} , avec

$$f_{itf} = \frac{\Delta L \Delta \nu_{opt}}{c \Delta t}$$

où $\Delta L = L_{paras} - L_{nom}$, différence de chemin parasite/nominal, et $\frac{\Delta \nu_{opt}}{\Delta t}$ la vitesse de rampe en fréquence du laser

- Laser à balayage de fréquence :** Diode laser fibrée 1064 nm devant être balayée sur au moins 1 nm (fréquence optique balayée $\Delta \nu_{opt} = 265$ GHz) permettant une résolution de 1mm sur ΔL . Notre laser Photodigm peut être balayé sur plus de 522 GHz par contrôle du courant et de la température.
- Contrôle de la rampe en fréquence :** Asservissement en phase décalé qui permet d'obtenir la dérive linéaire de fréquence optique $\frac{\Delta \nu_{opt}}{\Delta t}$ en utilisant un interféromètre Mach-Zehnder hétérodyne déséquilibré: $\frac{\Delta \nu_{opt}}{\Delta t} = \frac{c \Delta F}{n \Delta L_{MZ}}$, valant 5.22 GHz/s pour un décalage de fréquence de démodulation de $\Delta F = 580$ Hz, et pour le déséquilibre $n \Delta L_{MZ}$ introduit par une fibre de $\Delta L_{MZ} = 25$ m dans l'interféromètre Mach-Zehnder. (ref 1²)
- Tests sur un simulateur de SAT :** Mise en place d'un banc optique simulant la présence de multiple faisceaux parasites afin de tester les performances de l'instrumentation. Le banc est composé d'une lame prismatique à incidence normale nous permettant de générer de multiples réflexions/transmissions en $R \approx 4\%$ et $T=1-R$ (faisceaux parasites), des miroirs M1 et M2 renvoyant les faisceaux parasites: certaines réflexions arrivent finalement sur le photodétecteur placé sur le faisceau nominal et apparaissent donc comme des "faisceaux parasites". Dans notre cas:
 - Faisceau nominal: Première transmission en sortie de la lame (T^2)
 - Premier faisceau parasite (bras court): $\Delta L_{court} = 0.33$ m Rapport en puissance: $T^4 R^2$
 - Second faisceau parasite (bras long): $\Delta L_{long} = 1.40$ m Rapport en puissance: $T^4 R^2$
 - Cavité M1-M2 : Echos des 2 faisceaux parasites tous les 1.4m, Rapport en puissance après chaque aller-retour: T^2 (si on ignore la divergence du faisceau)



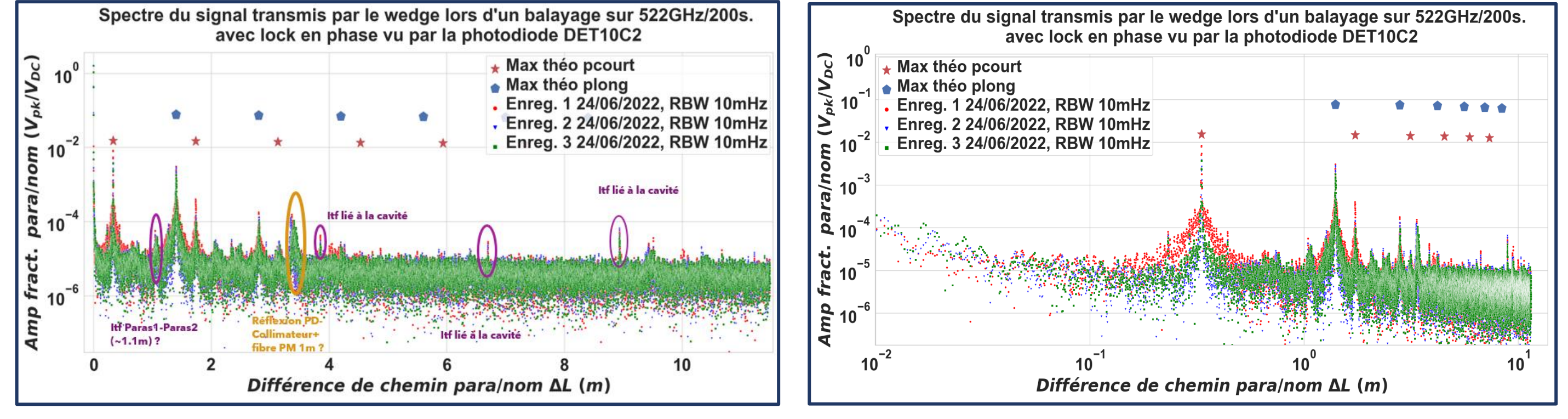
¹ H. Jiang, F. Kéfélian, P. Lemonde, et G. Santarelli, "Ultra-low frequency stabilization of a laser by locking to an optical fiber delay-line," *Opt. Lett.*, vol 34, pp. 914-916, 2009.
² N. Chiodo, K. Djerroud, O. Acef, A. Clairon et P. Wolf, "Lasers for coherent optical satellite links with large dynamics," *Appl. Opt.*, vol 52, pp. 7342-7351, 2013.

Résultats préliminaires; interprétation des signaux du simulateur de SAT :

Paramètres principaux de la mesure de lumière parasite :

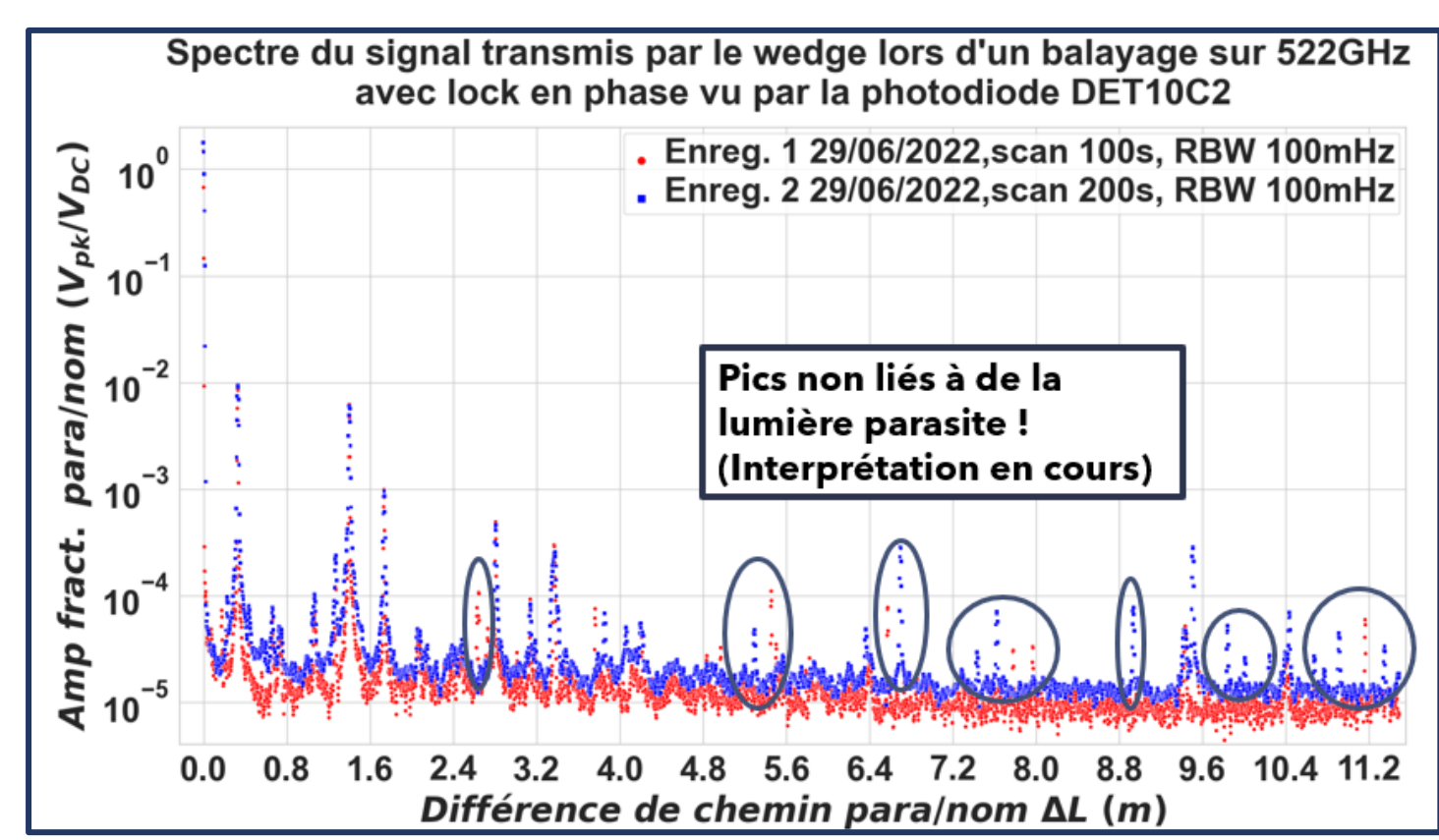
- Amplitude fractionnaire électrique entre le faisceau nominal et les faisceaux parasites : $A_{itf} (V_{pk}) / A_{nom} (V_{DC})$
- Différence de chemin optique entre le faisceau nominal et les faisceaux parasites : ΔL
- Balayage en fréquence (scan) du laser : **2.61 GHz/s** (522 GHz / 200 s.) et **5.22 GHz/s** (522 GHz / 100 s.)
- Résolution du spectre (RBW) : **10 mHz** et **100mHz**

Spectres des différentes contributions parasites sur le simulateur SAT:



Superposition de spectres de signaux en sortie du simulateur SAT lors d'un balayage en fréquence (2,61 GHz/s) du laser lock en phase avec la position/amplitude théorique (recouvrement parfait) des pics d'interférences parasites attendus en échelle log et log/log

- Présence de pics d'interférences aux ΔL estimés
- Présence de pics parasites supplémentaires (ex: "3.4m", "3.9m", "6.7m" et "8.8m")
- Perte d'un facteur 20 en amplitude après chaque aller-retour dans la cavité (la divergence du faisceau n'est pas encore contrôlée)
- Plancher de 10^{-5} en amplitude fractionnaire atteint à partir de $\Delta L = 10$ cm

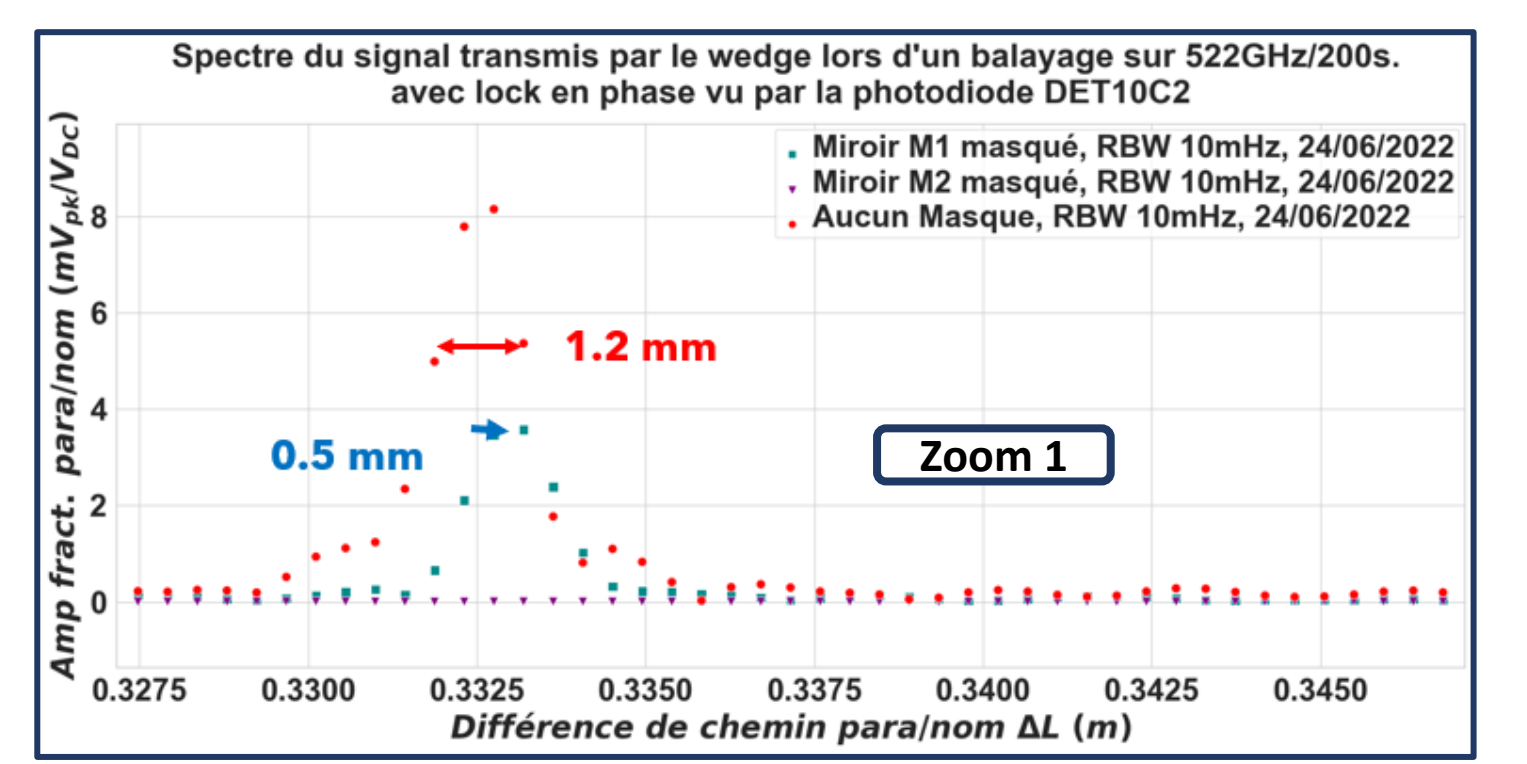


Superposition de spectres de signaux du simulateur SAT lors de 2 balayages en fréquence (2,61 GHz/s en bleu et 5,22 GHz/s en rouge) du laser

Zoom 1: résolution et stabilité sur la mesure:

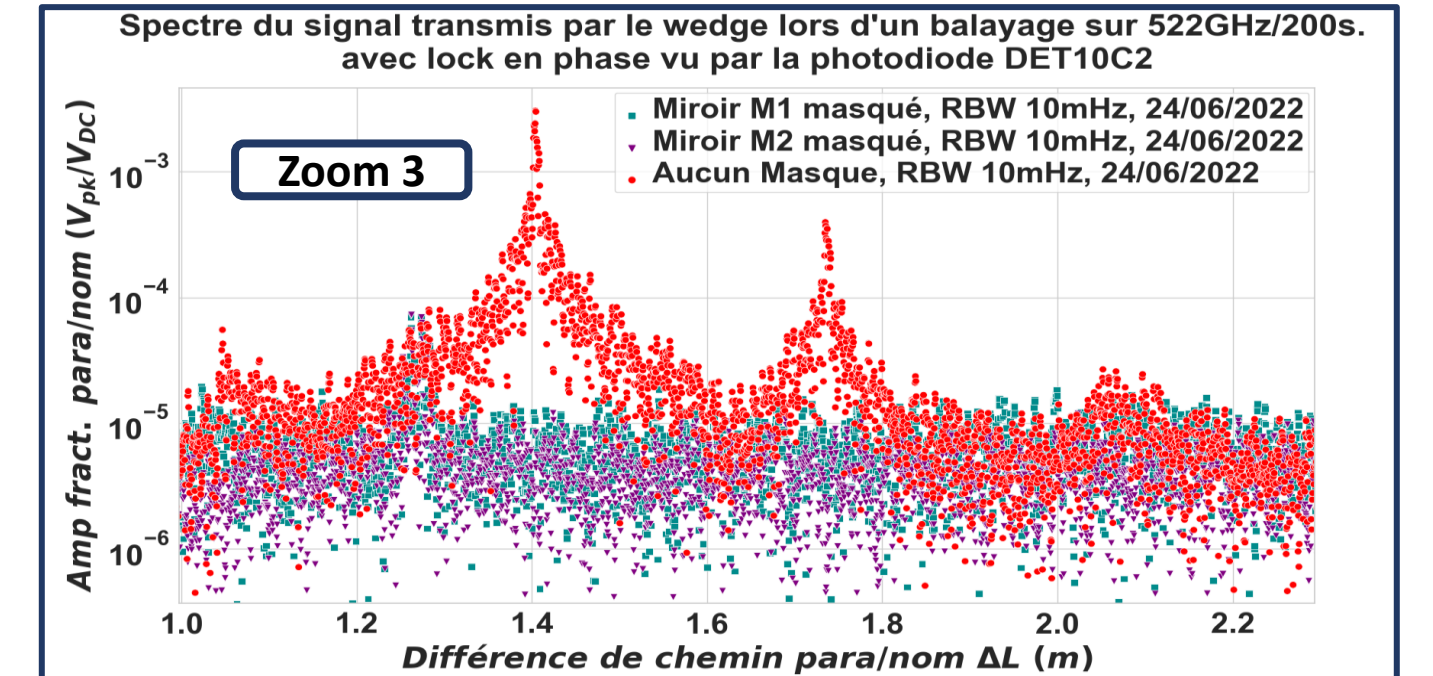
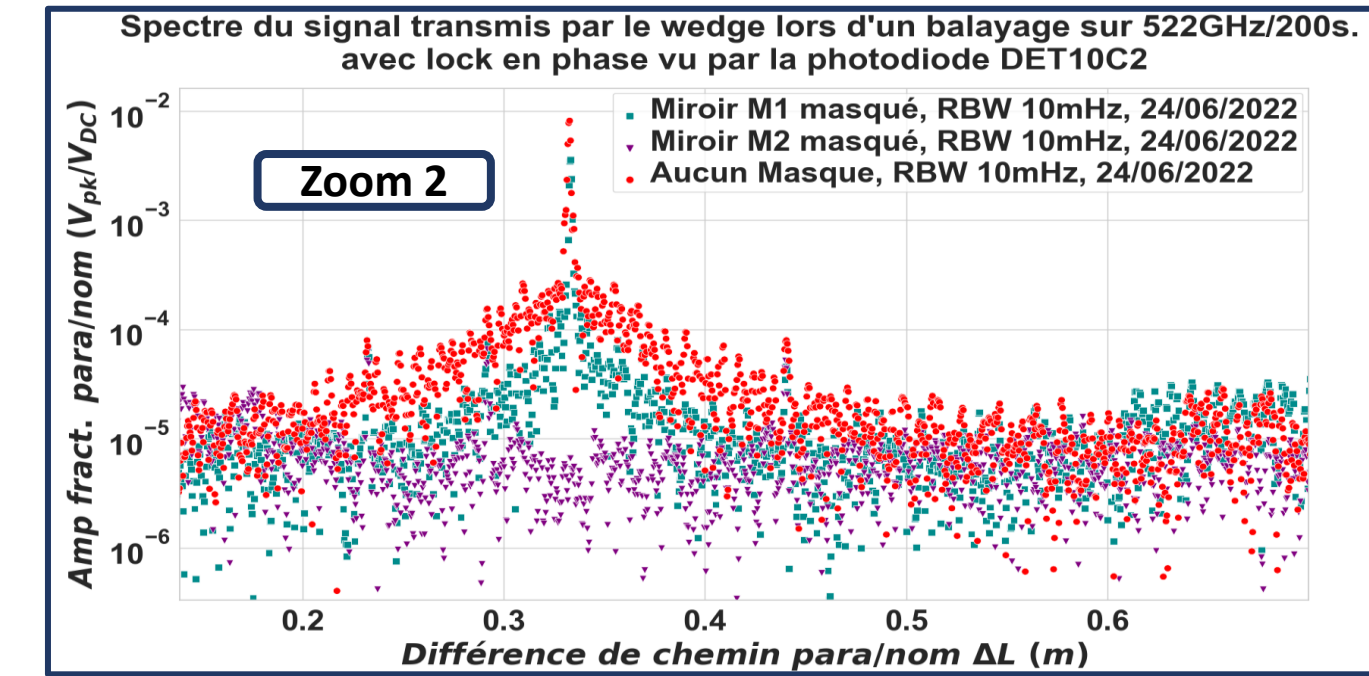
Largeur observée ≈ 1.2 mm (confirme que le balayage en fréquence est bien linéaire)

On observe un décalage en amplitude ($\sqrt{2}$) et position (0.5mm) entre les pics rouge et bleu prouvant un manque de stabilité du miroir M2.



Spectre du signal du simulateur SAT lors d'un balayage en fréquence (2,61 GHz/s) du laser Echelle linéaire. Avec (bleu) et sans (rouge) masque devant les miroirs M1 et M2

Zooms 2 et 3 sur les pics attendus :



Zooms du spectre du signal du simulateur SAT lors d'un balayage en fréquence (2,61 GHz/s) du laser. Echelle linéaire. Avec et sans masque devant les miroirs M1 et M2

Zoom 2:

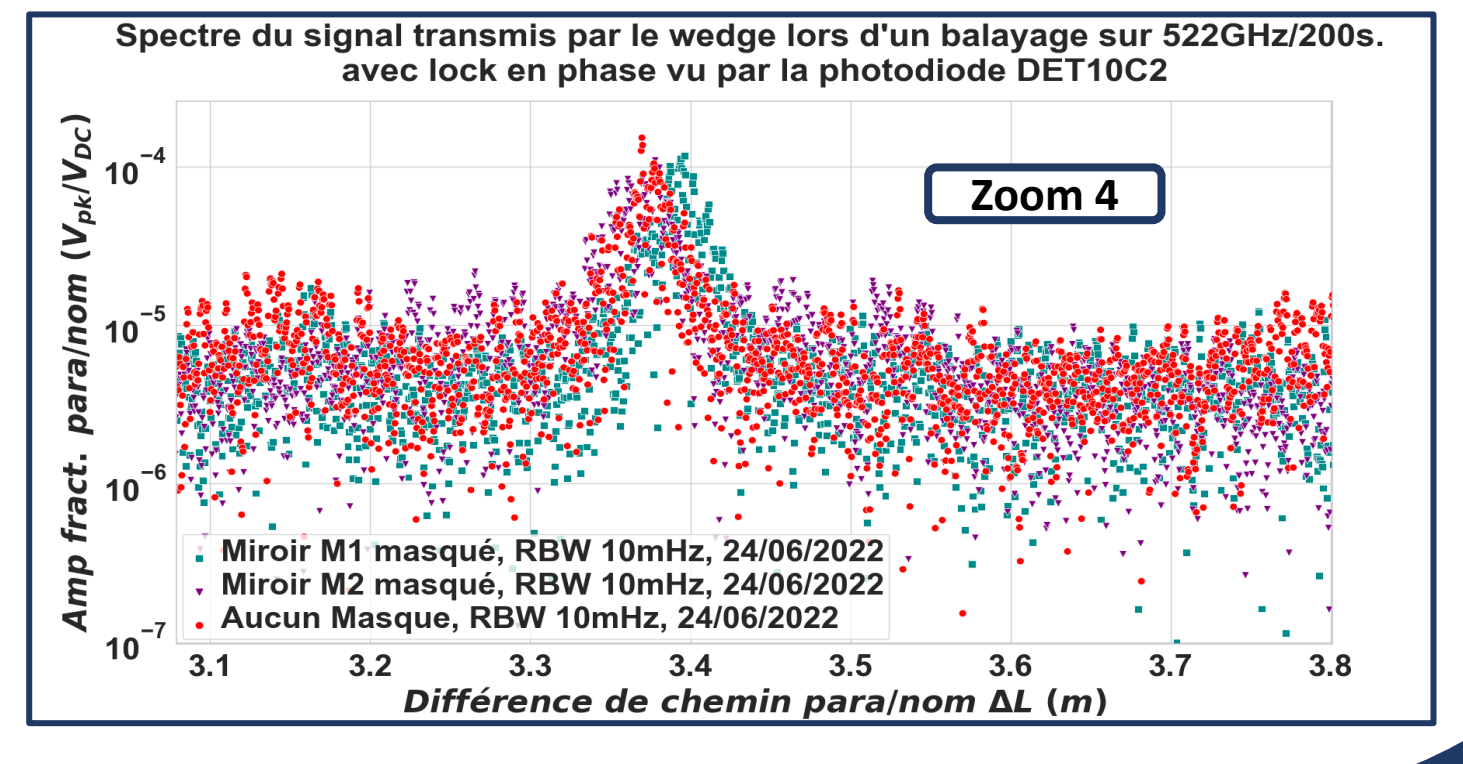
- Pic présent lorsque M2 n'est pas masqué
- $\Delta L_{court} = 0,33$ m, $A_{frac} = 7.1e-3$ ($2TR^{3/2} = 1.5e-2$)

Zoom 3:

- Masquer M1 ou M2 fait disparaître les pics
- $\Delta L_{long} = 1,4$ m, $A_{frac} = 3.1e-3$ ($2TR = 7.3e-2$)

Zoom 4 sur une contribution parasite inattendue :

- Présent sur tous les enregistrements
- Réflexion sur la Photodiode ? Sur la face arrière de la lame prismatique?
- Pic élargi => instabilité de ΔL ?



Conclusions/Perspectives :

Les premières analyses spectrales des signaux du système à tester montrent l'existence des faisceaux parasites que nous avons préparés, et permettent de mesurer la différence de chemin parasite/nominal, confirmant la fonctionnalité du dispositif pour la mesure de la lumière parasite cohérente. La résolution de la mesure de différence de chemin est au niveau attendu de 1mm compte tenu de l'amplitude ≥ 1 mm des balayages de fréquence. Les pics montrent un piédestal qu'il faudra comprendre, mais qui ne déforme le signal qu'en dessous de -30 dBc. La dynamique est de 10^8 malgré l'acquisition de données par oscilloscope. On observe la présence de pics non liés à de la lumière parasite, et d'autres pics, dont certains vraisemblablement associés à la lumière renvoyée à l'impact du faisceau nominal sur la photodiode. Ce montage préliminaire, avec ses imperfections, permet une première validation de la fonctionnalité visée, sans zone morte préoccupante à faible différence de chemin. La poursuite du travail tendra notamment à mettre en oeuvre cette méthode pour la mesure de lumière parasite au niveau système dans l'instrument spatial LISA, Laser Interferometer Space Antenna.

Remerciements:

Ce travail est réalisé au sein de la Collaboration LISA France, et bénéficie du soutien de la Région Sud, et du soutien du CNES au titre de l'AVT (assemblage, intégration, validation et test) du MOSA de la mission LISA.