
Corrélations d'intensité d'une source pseudo-cohérente

Benoît Kaczmarczuk – Nassim Mhammedi – Eliott Beraud

Sommaire

Introduction	2
Fonctions de corrélation	3
Description technique et expérimentale	4
Montage	4
Red pittaya et code Matlab	7
Mesures et interprétations	8
Gestion de projet	10

Introduction

L'interféromètre de Hanbury Brown et Twiss (HBT) a été proposé pour observer les corrélations d'intensités d'une étoile (lumière temporellement incohérente). L'objectif de l'expérience était d'en déduire une mesure du diamètre angulaire de l'étoile visée. Cette expérience est considérée comme celle qui a donné naissance à l'optique quantique.

Le projet que nous avons mené vise à étudier différentes sources incohérentes temporellement à partir de leur fonction de corrélation. Le montage optique est basé sur l'expérience HBT. Nos sources seront en fait des sources pseudo-cohérentes puisque nous allons utiliser une source fortement cohérente (un laser) que nous allons décorréler de façon contrôlée. Cela nous permet à la fois de générer puis mesurer des temps de corrélation observables par nos détecteurs mais aussi d'être précis sur l'action de notre étage de décorrélation sur la source.

Fonction de corrélation

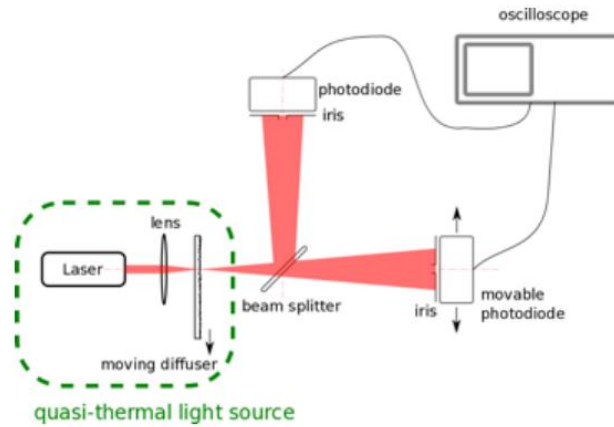


Figure 1 : Aperçu du montage HBT. Notre montage est un peu différent et sera détaillé dans la partie suivante. Cette figure est issue de [3].

Le montage HBT mesure ici des corrélations entre les intensités mesurées par les deux photodiodes. La quantité la plus pertinente à définir dans ce cas est donc la fonction de corrélation d'ordre de 2. Elle est définie par :

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle \bar{I}(t) \bar{I}(t + \tau) \rangle}{\langle \bar{I}(t) \rangle^2} = \frac{\langle E^*(t) E^*(t + \tau) E(t + \tau) E(t) \rangle}{\langle E^*(t) E(t) \rangle^2}.$$

Dans notre expérience, nous allons introduire des temps de corrélation de telle sorte qu'ils soient largement mesurables par nos photodétecteurs. C'est pourquoi $\bar{I}(t)$ qui représente l'intensité observée moyennée par un cycle de mesure du photodétecteur sera approximée à l'intensité instantanée $I(t)$

Si l'on suppose à présent : $I(t) = I_{moy} + \Delta I(t)$ on peut aisément montrer que $g^{(2)}(\tau) = 1 + \frac{\langle \Delta I(t) \Delta I(t + \tau) \rangle}{I_{moy}^2}$. On peut notamment retrouver le fait qu'une source cohérente telle qu'un laser a une fonction de corrélation $g^{(2)}(\tau) = 1$.

Nous allons dans la suite de notre étude introduire une modulation de l'intensité du laser et mesurer son impact sur la fonction de corrélation. Nous allons en déduire ce que nous pouvons attendre d'une telle opération.

Supposons donc $\Delta I(t) = \cos(\omega t)\Delta i(t)$.

$$\begin{aligned} g^{(2)}(\tau) &= 1 + \frac{\langle \Delta I(t)\Delta I(t+\tau) \rangle}{I_{moy}^2} = 1 + \frac{1}{I_{moy}^2} \langle \cos(\omega t)\cos(\omega(t+\tau))\Delta i(t)\Delta i(t+\tau) \rangle \\ &= 1 + \frac{1}{I_{moy}^2} \langle [\cos(\omega\tau) + \cos(2\omega t + \omega\tau)]\Delta i(t)\Delta i(t+\tau) \rangle \end{aligned}$$

On peut ainsi constater l'apparition d'un terme supplémentaire modulé en cosinus à la même fréquence de modulation appliquée (le terme en cosinus indépendant du temps). Nous en discuterons lors de la mesure des fonctions de corrélation associées.

Description technique et expérimentale

- **Montage**

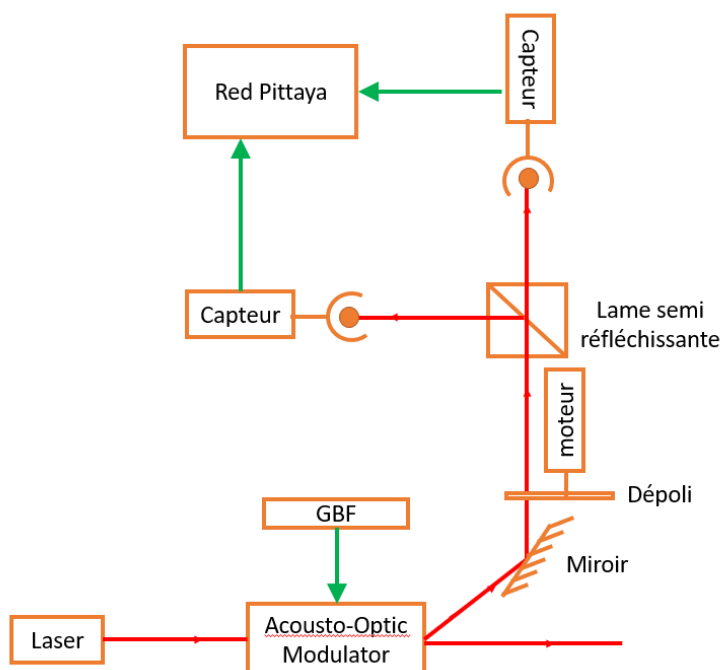


Figure 2 : Montage optique de type HBT utilisé.

Dans un premier temps nous souhaitons étudier le montage sans modulation d'intensité du laser. Nous faisons donc tourner uniquement le dépoli autour de son axe. Placer un dépoli sur la trajectoire du faisceau laser redistribue aléatoirement l'intensité du faisceau en sortie, c'est un phénomène d'interférence qui s'appelle le Speckle.

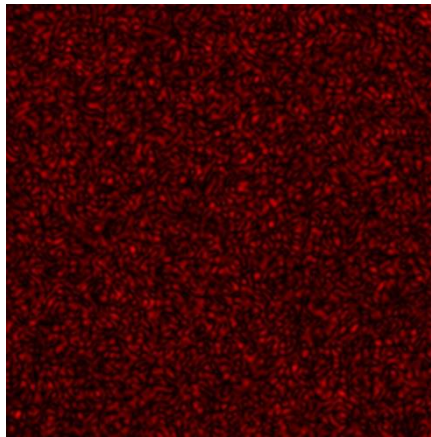


Figure 3 : figure typique d'un Speckle pleinement développé.

Le Speckle est donc un phénomène qui dégrade ici grandement la corrélation spatiale de la source laser initiale. La taille des grains de speckle est le direct reflet de la longueur de cohérence de cette nouvelle source. Nous allons donc placer une lentille en amont du dépoli afin de focaliser le laser sur ce dernier et ainsi augmenter la longueur de cohérence de la source. Notre but ici est de placer les deux photodiodes sur le même grain de speckle donc plus celui-ci sera gros, plus le réglage sera facile à faire.

Pour placer les deux photodiodes sur le même grain de speckle nous allons mettre en route la rotation du dépoli et utiliser un oscilloscope en mode XY. Ce mode nous permet de facilement repérer des corrélations entre deux signaux. Pas de corrélation entre les deux signaux (i.e les deux photodiodes ne sont pas calées sur le même grain de speckle) se traduira par une forme très diffuse en mode XY. Une forte corrélation entre les deux signaux (i.e les deux photodiodes sont calées sur le même grain de speckle) se traduira par une forme de comète, une courbe de la forme $y = x$.

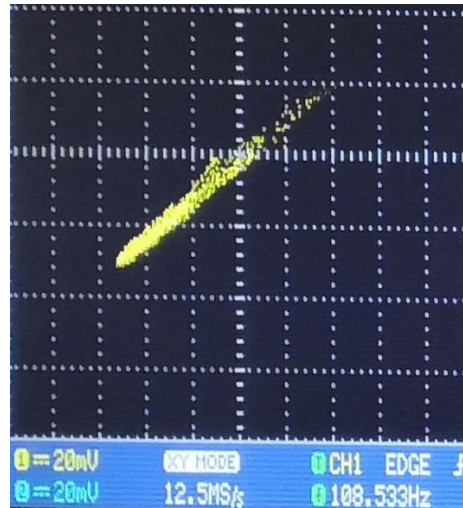


Figure 4 : figure de corrélation pour un oscilloscope en mode XY.

Ce réglage nous permet de conclure que nous sommes dans une configuration de forte corrélation spatiale entre les deux photodiodes. Cependant la rotation du dépoli nous place dans une configuration où nous avons fortement dégradé la corrélation temporelle de la source Laser. Notre montage étudie les corrélations **temporelles** d'intensité. Nous avons transformé notre laser en une source incohérente temporellement.

Par la suite, nous allons aussi étudier l'impact d'une modulation de l'intensité laser sur la fonction de corrélation. Pour cette modulation nous utiliseront un modulateur acousto-optique. Nous avons tracé sa caractéristique :

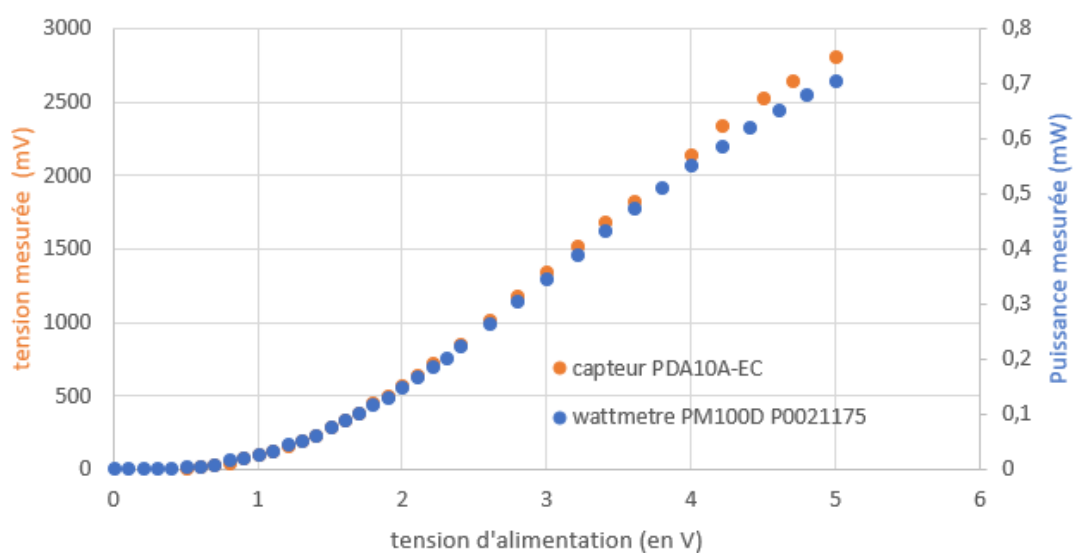


Figure 1 : Caractéristique du modulateur acousto-optique mesuré pendant la séance (tension et puissance).

Le point le plus important de cette caractéristique est la partie linéaire. En effet, notre utilisation du modulateur acousto-optique en tant qu'appareil permettant la modulation de l'intensité laser nous impose de connaître avec précision sa réponse. Nous allons chercher à moduler l'intensité laser avec différentes formes par exemple un signal sinusoïdal, un signal créneau ou un signal rampe. Placer la modulation dans la partie linéaire nous assure que la forme du signal d'entrée (tension venant du GBF) est la même que le signal de sortie (intensité laser dans l'ordre 1 du modulateur acousto-optique). Ici, on conclut qu'on placera notre modulation dans la partie 2V-4V.

- **Red Pittaya et code Matlab**

Les codes Matlab de contrôle de la carte Red Pittaya sont en annexe.

La carte Red Pitaya est un outil qui nous a permis de rapidement mesurer avec précision les sorties des deux photodiodes en même temps. Son interfacçage avec Matlab nous a aussi d'avoir une image en direct de la fonction de corrélation entre les deux photodiodes.

3.1.1.2.5.1.1. General Specifications

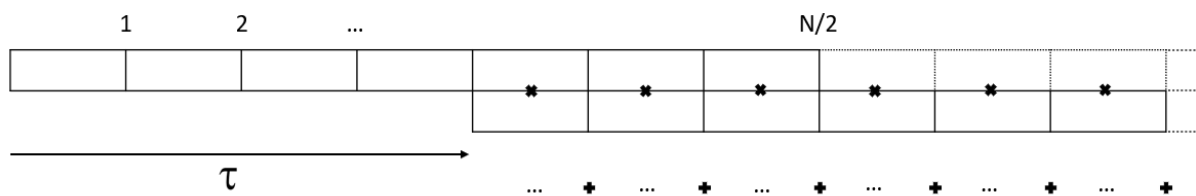
Number of channels	2
Sample rate	125 Msps
ADC resolution	14 bits
Input coupling	DC

Comme nous pouvons le voir, le convertisseur analogique-numérique code le signal sur 14 bits entre -1V et +1V donc cela permet dans le même temps de garder une bonne précision de mesure.

La partie un peu délicate a été de convertir les données de la Red Pitaya de chaîne de caractères en flottants sans dégrader la précision ni le temps de calcul. La conversion a été faite après l'acquisition des deux signaux.

Le calcul de la fonction de corrélation sur Matlab s'est fait suivant le schéma ci-dessous. On effectue tout d'abord le produit terme à terme des 2 vecteurs contenant chacun la mesure temporelle de la photodiode associée. On décale les deux vecteurs l'un par rapport à l'autre pour prendre en compte le décalage temporel τ . Il suffit à présent d'effectuer la moyenne du vecteur résultat du produit précédent. Nous avons calculé $g^{(2)}(\tau)$.

SCHEMA DE L'IMPLEMENTATION DE LA FONCTION DE CORRELATION



• Mesures et interprétations

D'après les références [1] et [2], qui ont motivé l'étude de ce sujet, l'introduction d'un dépoli mènerait à un coefficient de corrélation égal à 2 pour un décalage temporel nul. Nous avons donc effectué les mesures de fonctions de corrélation à partir d'une source décorrélée par la présence seule du dépoli en rotation.

Ci-dessous les fonctions de corrélations mesurées pour différentes vitesses de rotation du dépoli.

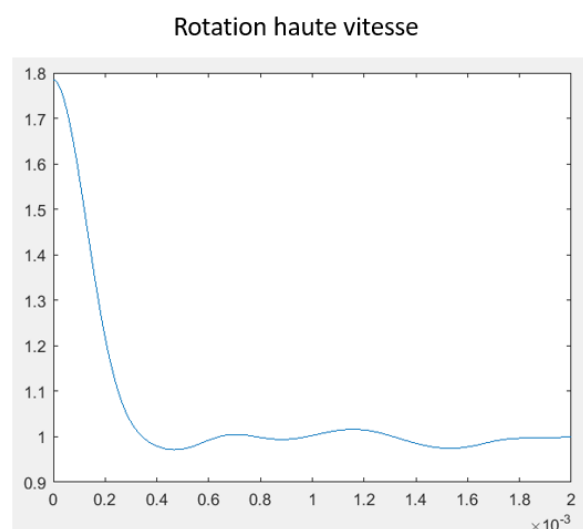
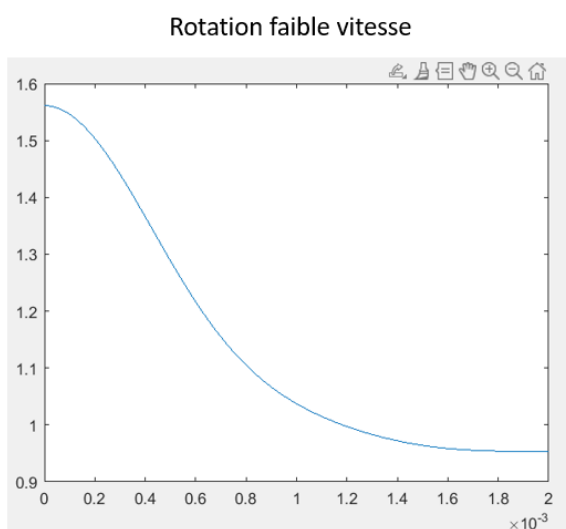


Figure 5 : Fonctions de corrélation en fonction de la rotation du dépoli (abscisse en seconde). Permet notamment de mettre en évidence la chute du temps de corrélation avec la vitesse de rotation.

A présent, nous mettons en place la modulation d'intensité du laser à 3kHz pour deux formes de modulation différentes (sinusoïde et créneau). Nous pouvons ainsi observer deux fonctions de corrélation différentes.

Nous l'avons vu dans la première partie de ce compte rendu, il y a apparition d'une oscillation dans la fonction de corrélation autour de 1 (oscillation sinusoïdale dans le cas de modulation sinusoïdale) à la même fréquence que celle de la modulation d'intensité. Dans le cas d'une modulation de forme créneau, on observe une figure en rampe qui est l'image de la convolution entre deux créneaux.

Nous pouvons également constater que la fonction de corrélation dépasse 2 pour un décalage temporel nul comme prévu par les références [1] et [2].

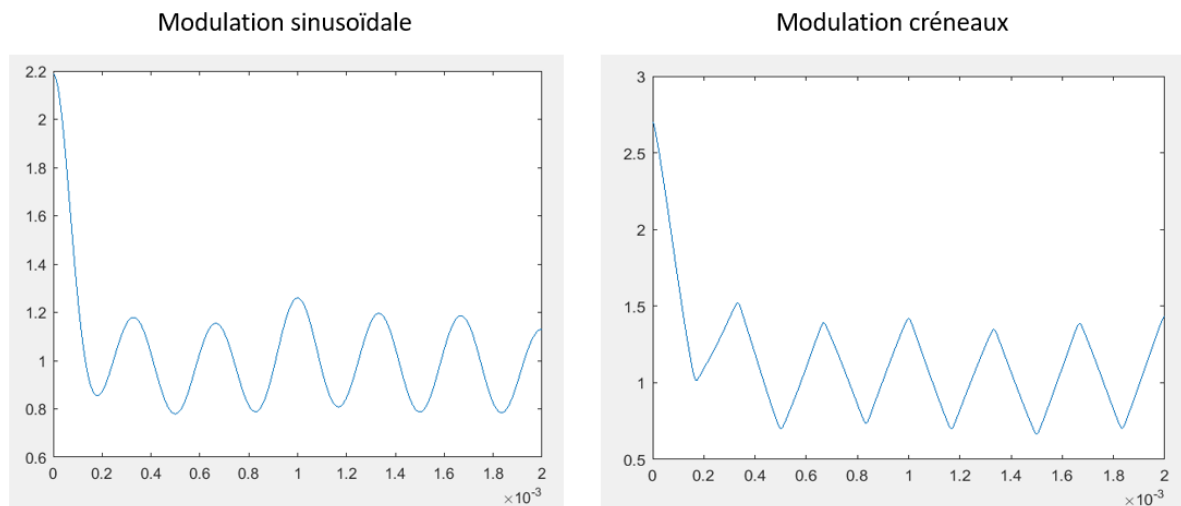


Figure 6 : Fonctions de corrélation en fonction de la modulation (3kHz) de l'intensité laser (abscisse en seconde). Permet notamment de mettre en évidence une corrélation supérieure à 2 en 0.

Gestion de projet

	Benoît	Nassim	Eliott
Séance 1	<ul style="list-style-type: none">Familiarisation avec le dispositif expérimentalAlignement des photodiodesPremières mesures manuelles de corrélation	<ul style="list-style-type: none">Familiarisation avec le dispositif expérimentalMontage pour caractérisation de l'acousto-optiqueCaractérisation	<ul style="list-style-type: none">Familiarisation avec le dispositif expérimentalAlignement des photodiodesPremières mesures manuelles de corrélation
Séance 2	<ul style="list-style-type: none">Mise en place d'une mesure automatique via carte d'acquisition Red Pitaya	<ul style="list-style-type: none">Intégration de l'acousto-optique au montage actuel	<ul style="list-style-type: none">Mise en place d'une mesure automatique via carte d'acquisition Red Pitaya
Séance 3	<ul style="list-style-type: none">Re-alignement des photodiodesMesures sur montage avec modulation	<ul style="list-style-type: none">Re-alignement des photodiodesMesures sur montage avec modulation	<ul style="list-style-type: none">Re-alignement des photodiodesMesures sur montage avec modulation
Séance 4	<ul style="list-style-type: none">Mesures finales, optimisationPréparation du rendu oral	<ul style="list-style-type: none">Mesures finales, optimisationPréparation du rendu oral	<ul style="list-style-type: none">Mesures finales, optimisationPréparation du rendu oral

	Benoît	Nassim	Eliott
Séance 1	<ul style="list-style-type: none"> Familiarisation avec le dispositif expérimental Alignement des photodiodes Caractérisation 	<ul style="list-style-type: none"> Familiarisation avec le dispositif expérimental Montage pour caractérisation de l'acousto-optique Caractérisation 	<ul style="list-style-type: none"> Familiarisation avec le dispositif expérimental Alignement des photodiodes Premières mesures manuelles de corrélation Mise en place d'une mesure automatique via carte d'acquisition Red Pitaya
Séance 2	<ul style="list-style-type: none"> Caractérisation Intégration de l'acousto-optique au montage actuel Alignement de l'acousto avec le laser 	<ul style="list-style-type: none"> Caractérisation Intégration de l'acousto-optique au montage actuel alignement de l'acousto avec le laser 	<ul style="list-style-type: none"> Mise en place d'une mesure automatique via carte d'acquisition Red Pitaya
Séance 3	<ul style="list-style-type: none"> Re-alignement des photodiodes Deuxième caractérisation via puissance-mètre Montage de l'acousto-optique sur un pied à vernier 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation du gain sur la 2nde photodiode car déficience en lum Montage de l'acousto-optique sur un pied à vernier 	<ul style="list-style-type: none"> Mise en place d'une mesure automatique via carte d'acquisition Red Pitaya Re-alignement des photodiodes Mesures sur montage avec modulation
Séance 4	<ul style="list-style-type: none"> Mesures finales, optimisation Préparation du rendu oral 	<ul style="list-style-type: none"> Mesures finales, optimisation Préparation du rendu oral 	<ul style="list-style-type: none"> Mesures finales, optimisation Préparation du rendu oral

orange : tâches plus longues que prévu
rouge : étapes pas anticipées

Le planning prévisionnel a été plutôt bien respecté ; évidemment, il n'était pas possible de prévoir toutes les difficultés bloquantes, mais celles rencontrées n'ont pas excessivement décalé le calendrier. L'aide de M. Bernon n'y est bien sûr pas pour rien.

Initiative du groupe à noter : nous avons remarqué que la deuxième photodiode captait des rayons parasites issus de la diffraction sur le dépoli tournant situé trop près de lui. L'introduction d'un cache a permis d'améliorer les corrélations mesurées très significativement

Références

- [1] : Yu Zhou, Optics communications, Superbunching pseudo-thermal light with intensity modulated laser light and rotating ground glass.
- [2] : Yu Zhou, Physical Rev A 95, 053809 (2017), Superbunching pseudo-thermal light.
- [3] : Physikpraktikum für Vorgerückte (VP), Hanbury Brown-Twiss Experiment.

Annexe

```
%%%Constantes
```

```
%%%Initialisation
```

```
IP='192.168.10.1';
```

```
port = 5000;
```

```
tcpipObj=tcpip(IP,port);
```

```
%tcpipObj=tcpcient(IP,port);
```

```
tcpipObj.InputBufferSize = 16384*32;
```

```
fopen(tcpipObj);
```

```
fred = 125E6; % frequence dhorloge de la redpitaya
```

```
decimation = 256; % decimation factor
```

```
time = (1:16384) * 1/ fred * decimation; % temps en ms
```

```
dt = abs(time(2)-time(1)); % pas de temps
```

```
T = 16384 * dt; % Temps total
```

```
time_corr = (1:32767)* 1/ fred * decimation;
```

```
fprintf(tcpipObj,['ACQ:DEC ',num2str(decimation)]);
```

```
%%%GBF
```

```
tcpipObj.Terminator='CR/LF';
```

```
% remove data on the input/output buffer of the redpitaya ( the ones that
```

```
% remain from the previous use of the RP )
```

```
flushinput(tcpipObj);
```

```
flushoutput(tcpipObj);
```

```
liste_tau=[];

liste_top=[];

tau = 100*dt ;

mid = time_corr(length(time_corr)/2+0.5);

c = zeros(15,8192);

for l = 1:15

    fprintf(tcpipObj, 'ACQ:START');

    fprintf(tcpipObj, 'ACQ:TRIG:LEV 0.04');

    fprintf(tcpipObj, 'ACQ:TRIG CH2_PE');

    fprintf(tcpipObj, 'ACQ:TRIG:DLY 8192');

    while 1

        trig_rsp=query(tcpipObj, 'ACQ:TRIG:STAT?');

        if strcmp('TD',trig_rsp(1:2)) % Read only TD

            break

        end

    end

    signal_str1 = [];
    signal_str2 = [];

    K = 1;

    % Read data from buffer
    for i = 1:K %157588
        signal_str1 = strcat(signal_str1,query(tcpipObj, 'ACQ:SOUR1:DATA?'));
        signal_str2 = strcat(signal_str2,query(tcpipObj, 'ACQ:SOUR2:DATA?'));
```

```
end

signal_str1 = signal_str1(1,2:length(signal_str1)-1);
signal_str2 = signal_str2(1,2:length(signal_str2)-1);

    y1=str2num(signal_str1);
    y2=str2num(signal_str2);

    c(1,:) = myxcorrelation(y1,y2*max(y1)/max(y2));

    % Convert values to numbers.% First character in string is "{"
    % and 2 latest are empty spaces and last is "}".
end
%%

%c = myxcorrelation(y1,y2*max(y1)/max(y2));

figure, plot(time(1:length(time)/2),mean(c,1))
xlim([0, 0.002])
```

```
function [outputArg1] = myxcorrelation(y1,y2)
    %UNTITLED Summary of this function goes here
    N = length(y1);

    signal_corr = zeros(1,floor(N/2));
    new_y2 = y2(1,1:floor(N/2));

    for i = 1:floor(N/2)
        new_y1 = y1(1,i:floor(N/2)+i-1);
        signal_corr(1,i) = mean(new_y1.*new_y2) / (mean(new_y1)*mean(new_y2));
    end

    outputArg1 = signal_corr;
end
```