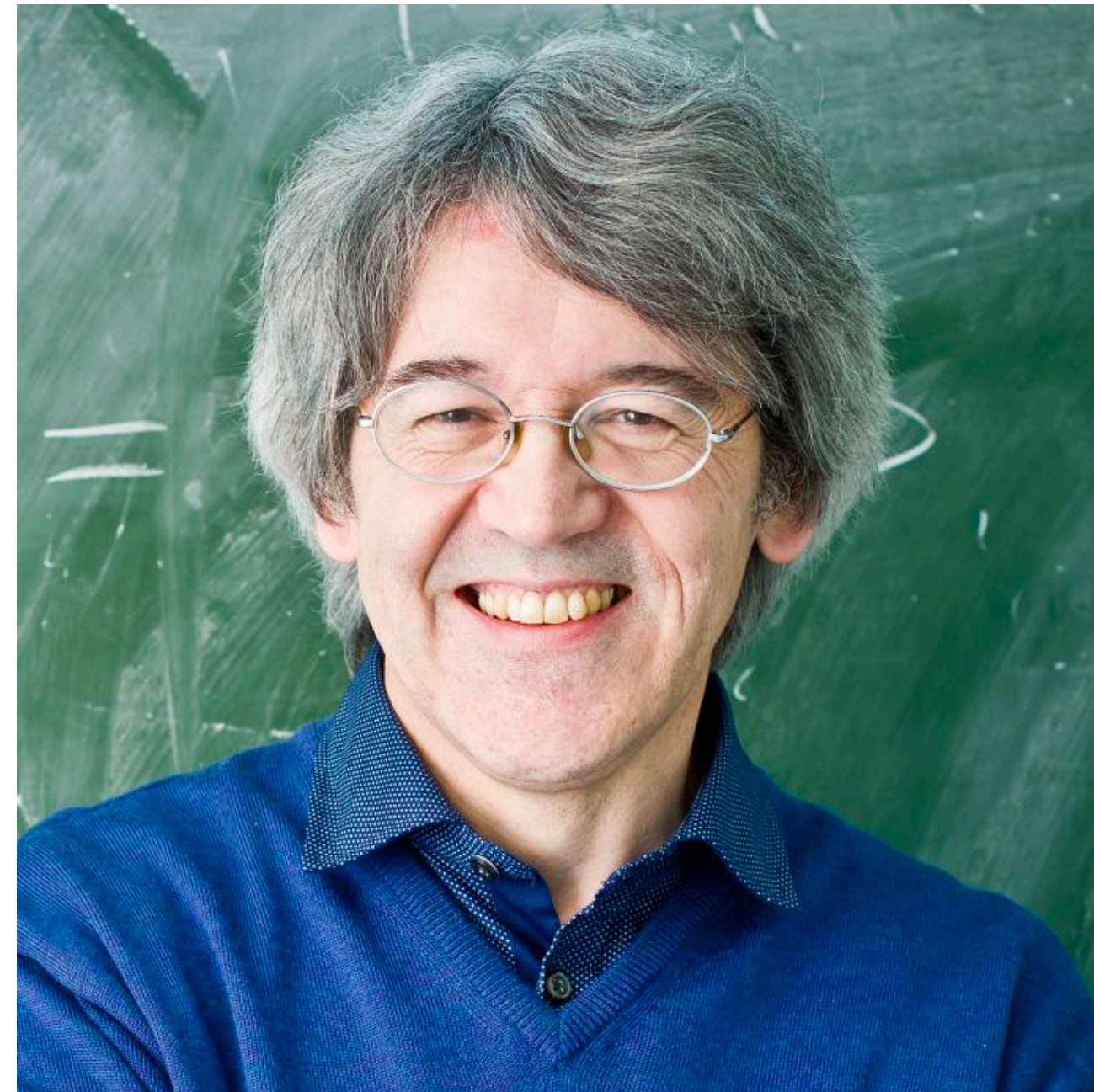


Helwan & Maël & Anouk & Jeanne & Noé feat
Benjamin Vest

Interférences à un photon

Projet DEPHI

2024-2025



Présentation | Novembre 2024

Institut d'Optique Graduate School

Introduction

CONTEXTE DU PROJET

Expérience de Grangier, Aspect et Roger

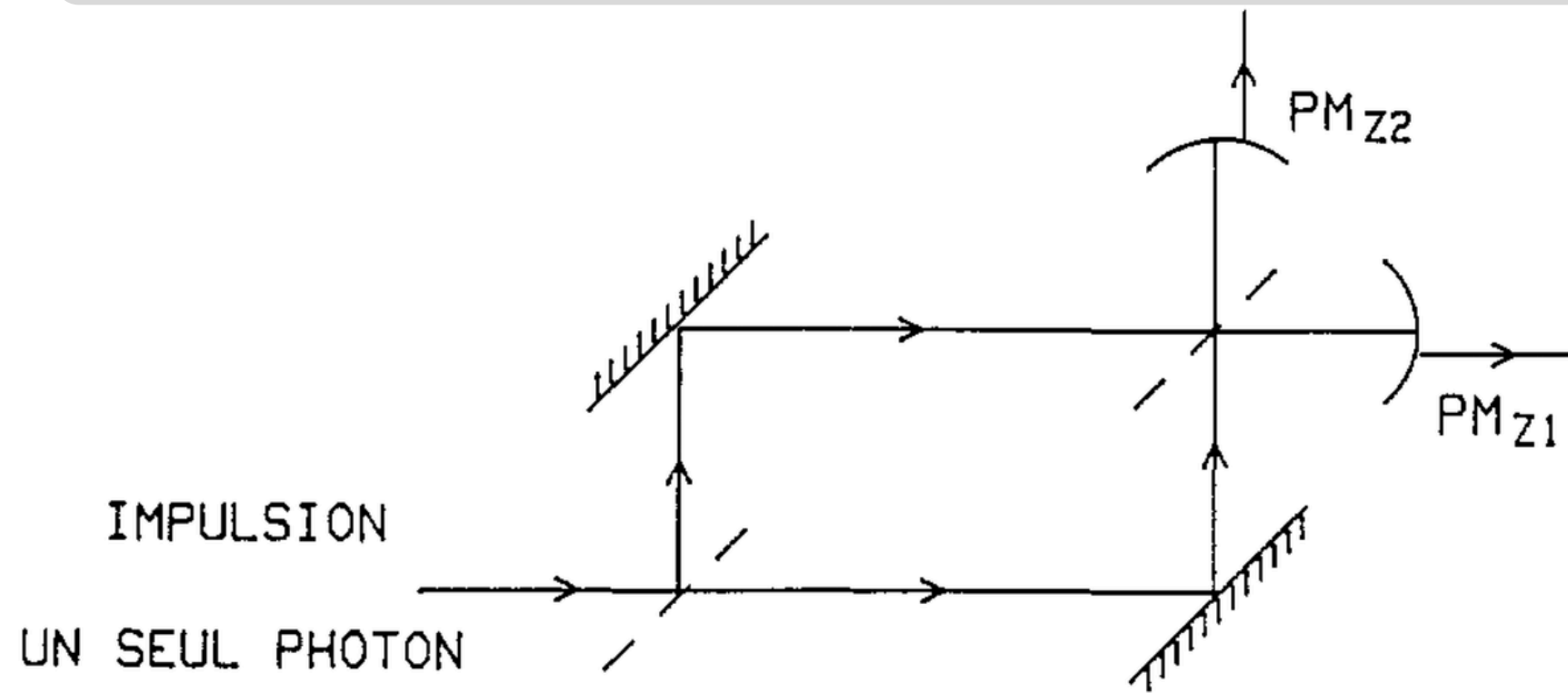


FIG. 5. — *Interféromètre de Mach-Zehnder. Les photomultiplicateurs PM_{z_1} et PM_{z_2} sont validés par les portes w , comme sur la figure 2, pour isoler les impulsions à un seul photon. La différence de marche δ est contrôlée par le déplacement des miroirs.*

DUALITÉ ONDE-PARTICULE POUR UN PHOTON UNIQUE (*)

A. ASPECT, P. GRANGIER, G. ROGER

MOTS CLÉS :	KEY WORDS :
Photons	Photons
Corrélations	Correlations
Ondes	Waves

Wave particle duality for a single photon

RÉSUMÉ : On présente des expériences qui mettent en évidence les aspects quantiques de la lumière par des études de corrélations qui ne peuvent s'expliquer en termes d'ondes. L'accent est mis sur la différence entre un état quantique à un seul photon et un état classique à faible niveau.

SUMMARY : Experiments are presented which exhibit the quantum nature of light by correlations unexplainable in wave terms. Fundamental differences between quantized single photon states and low level classical states is put forward.

1. — INTRODUCTION

Fresnel est le symbole même du triomphe de la théorie ondulatoire de la lumière, contre la conception corpusculaire de Newton. On pouvait donc légitimement s'interroger sur le devenir de sa théorie lorsque, près d'un siècle plus tard, Einstein introduisait le concept de photon. Nous savons tous aujourd'hui que la lumière est à la fois *onde et particule*. Mais au-delà de cette affirmation, si souvent entendue qu'elle semble aller de soi, le concept même de dualité onde-particule reste l'un des plus étonnants introduits en physique, comme l'a souvent écrit Feynman lui-même. Nous présentons ici des expériences qui, utilisant des « paquets d'ondes à un seul photon », illustrent ce double comportement.

On lit souvent que les expériences historiques d'interférences dites « à un seul photon » constituent une preuve expérimentale de la dualité onde-corpus-

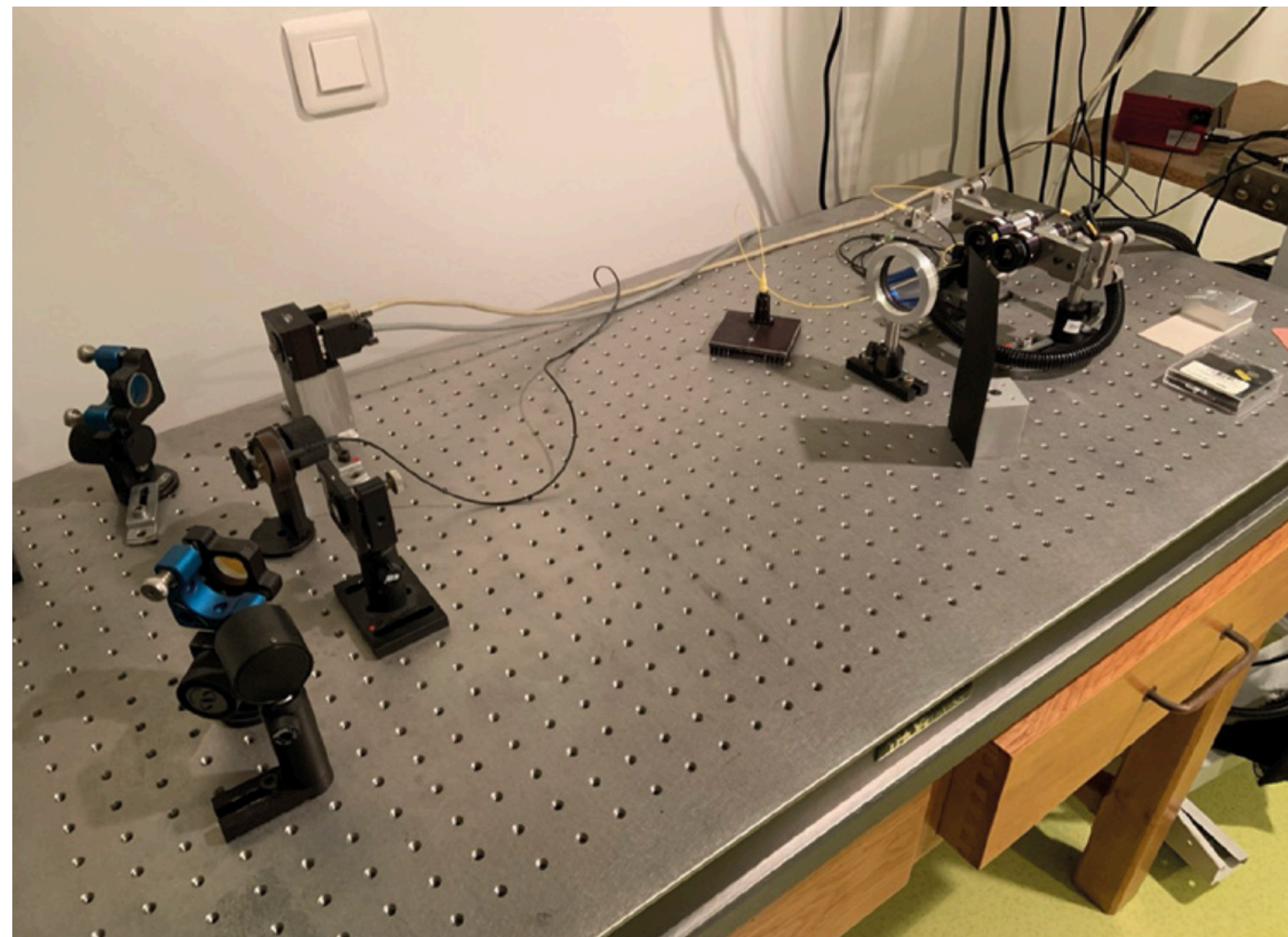
cule pour la lumière. Nous voudrions nuancer cette affirmation. Certes des interférences ont été observées avec des flux lumineux extrêmement faibles, montrant un indiscutable comportement ondulatoire. Mais nous voulons faire remarquer que le comportement du type particule n'a pas été clairement observé dans ces expériences. On peut même affirmer, à la lumière des discussions modernes sur les propriétés quantiques de la lumière [1, 2], qu'il était exclu d'observer un comportement du type particule. En effet, toutes ces expériences ont été faites avec des sources traditionnelles (source thermique, lampe à décharge, ou laser) dont on sait que la lumière est parfaitement décrite par un champ électromagnétique classique, même lorsqu'elle est extrêmement atténuée.

Nous verrons qu'au contraire des paquets d'onde à un seul photon manifesterait un comportement typique de particule, l'anticorrélation des détections de part et d'autre d'une lame semi-réfléchissante. Nous établirons un critère quantitatif, montrant que ce comportement est impossible à interpréter en

Introduction

CONTEXTE DU PROJET

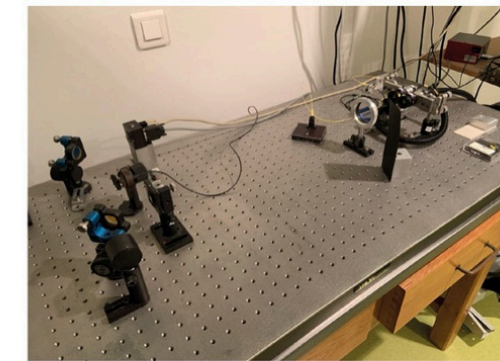
TP 3A de Hong-Ou-Mandel



Two-photon interference and the Hong-Ou-Mandel effect

Benjamin VEST, Lionel JACUBOWIEZ,

Université Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Laboratoire Charles Fabry, 91127 Palaiseau, France
*benjamin.vest@institutoptique.fr



The Hong-Ou-Mandel (HOM) experiment is a landmark in quantum optics. A labwork version of this famous two-photon interference effect was developed at Institut d'Optique for students in engineering and MSc tracks. The setup enables the observation of the iconic HOM "dip" and the measurement of photon indistinguishability.

The HOM labwork setup @ Institut d'Optique.

<https://doi.org/10.1051/photon/202312524>

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The Hong-Ou-Mandel experiment (HOM), performed in 1987 [1], is the first experiment reporting the observation of a two-photon quantum interference, occurring when two indistinguishable photons are sent simultaneously on the two input ports of a beamsplitter (BS). The photon distribution at the exit is properly astounding: indeed, the two indistinguishable photons leave the setup by the same output port and are never split by the BS! This gregarious behavior is called photon bunching, and strongly contradicts the "classical" behavior: independent particles with a 50% chance of being either transmitted or reflected are expected to pick different output ports 50% of the time.

The HOM effect is exploited to provide a quantitative measurement of particles indistinguishability, an important requirement to create complex multi-particle superposition states, a common resource in quantum information. The HOM effect extends well beyond the exclusive case of photons: indeed, experiments have been notably performed to investigate the same effect with other quantum particles [2,3].

This experiment is now routinely proposed and performed as a Labwork session in the I.EnsF (Laboratoire d'Enseignement

Classical description of a lossless beamsplitter

The HOM experiment relies on the concept of a beamsplitter (BS): a device that splits incoming light into a reflected and a transmitted wave. In classical electrodynamics, input and output fields are related via complex reflection and transmission coefficients r and t . We can write using matrix formalism:

$$\begin{pmatrix} E_c \\ E_d \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} E_a \\ E_b \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 1})$$

with $U = \begin{pmatrix} t & r \\ r & t \end{pmatrix}$, the BS matrix

The energy conservation condition writes $|E_c|^2 + |E_d|^2 = |E_a|^2 + |E_b|^2$. By multiplying Eq. 1 by its conjugate, we immediately get $U^\dagger U = I$. It is said that U is unitary, and this condition leads to constraints on the coefficients:

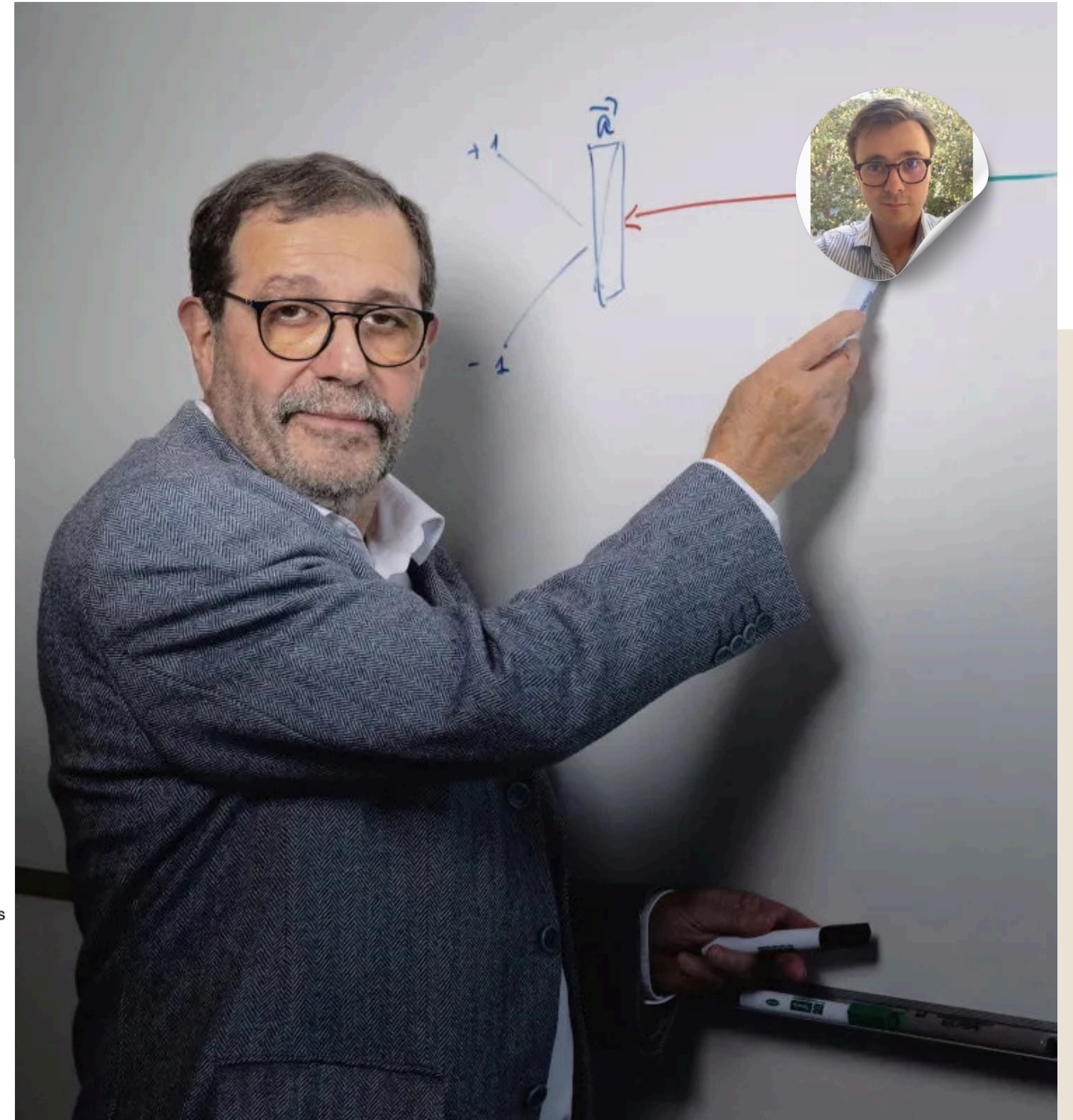
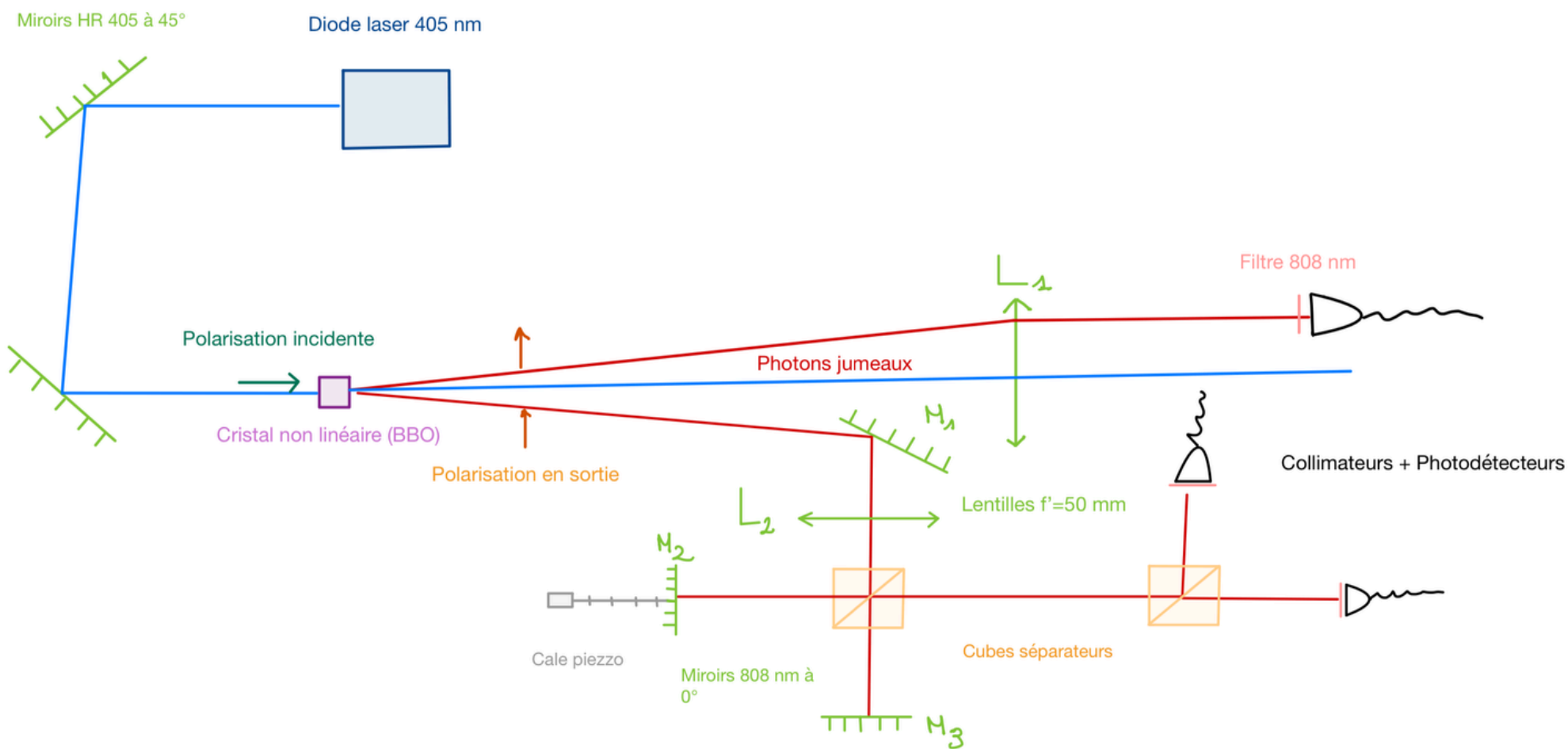
$$\begin{aligned} |r|^2 + |t|^2 &= 1 \\ r t^* + r^* t &= 2\text{Re}(r t^*) = 0 \text{ or } r = \pm i t \end{aligned}$$

The first condition can be directly related to energy conservation. The second condition shows that the absence of losses

Introduction

CONTEXTE DU PROJET

Interférences à un photon



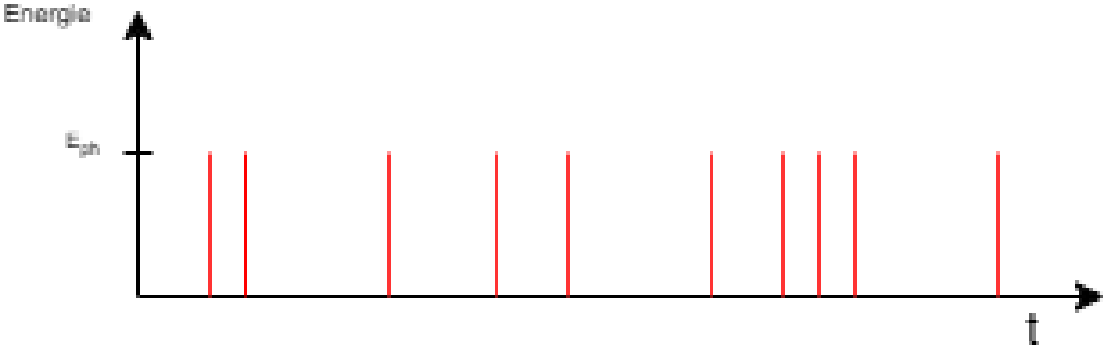
Comment créer une source de photons uniques annoncés et observer des interférences, à partir d'une source de photons jumeaux ?

Comment créer une source de photons uniques annoncés et observer des interférences, à partir d'une source de photons jumeaux ?

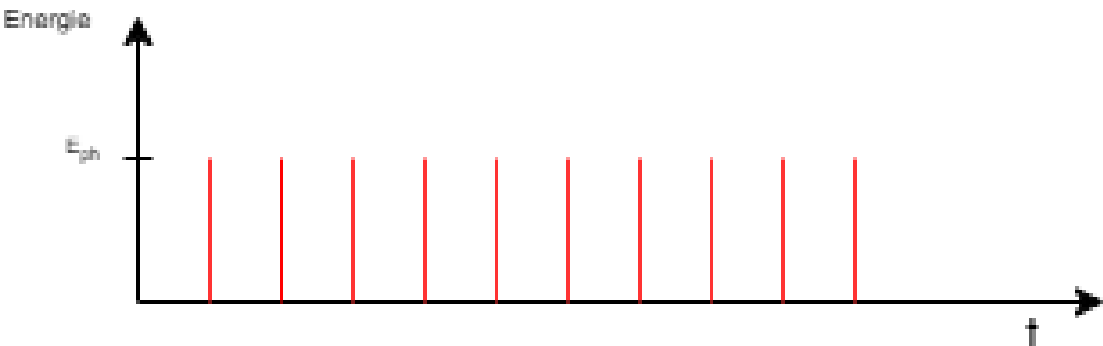
SOURCE DE PHOTONS UNIQUES



Laser



Photon unique

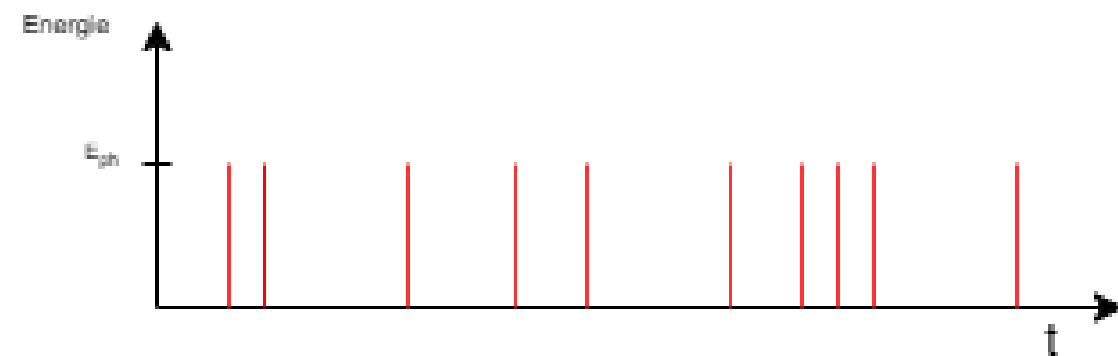


Comment créer une source de photons uniques annoncés et observer des interférences, à partir d'une source de photons jumeaux ?

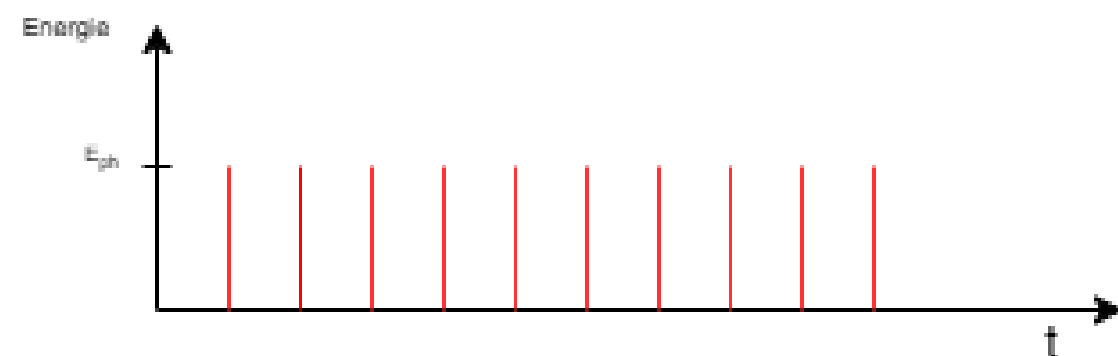
SOURCE DE PHOTONS UNIQUES



Laser



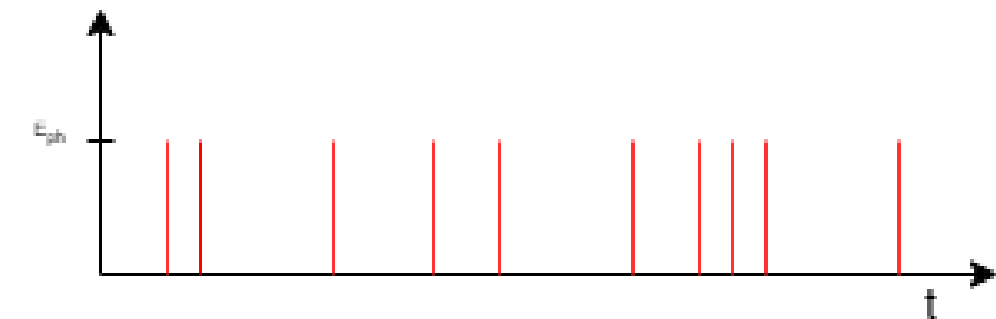
Photon unique



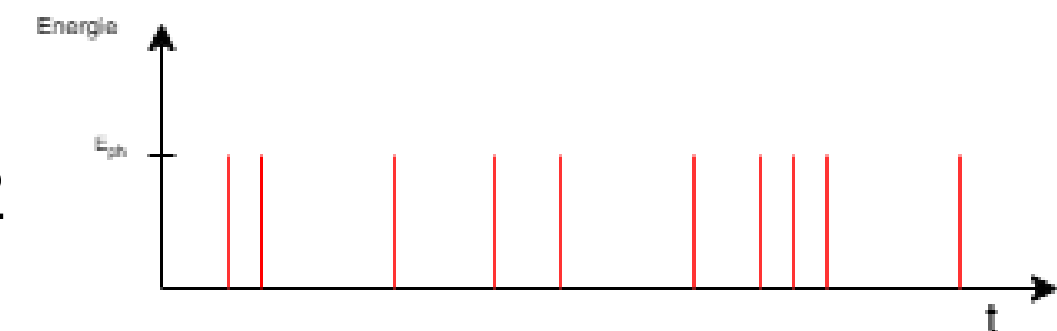
SOURCE DE PHOTONS JUMEAUX



Photon 1



Photon 2



Comment créer une source de photons uniques annoncés et observer des interférences, à partir d'une source de photons jumeaux ?

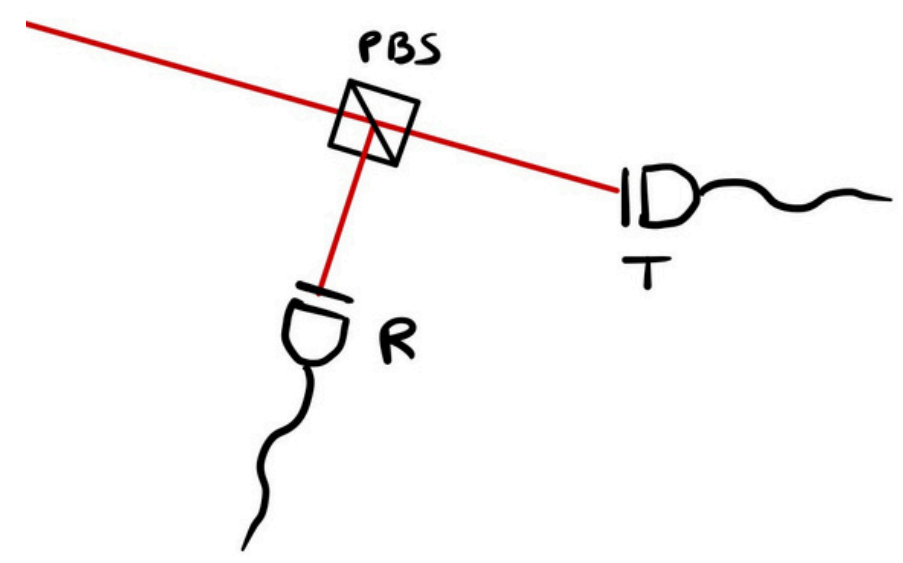
Mesure à 2 détecteurs R et T



Nombre coïncidences R/T = 0

**SOURCE DE PHOTONS UNIQUES
ANNONCÉS**

IL ARRIVE !!!



Comment créer une source de photons uniques annoncés et observer des interférences, à partir d'une source de photons jumeaux ?

Laser: Mesure à 2 détecteurs R et T

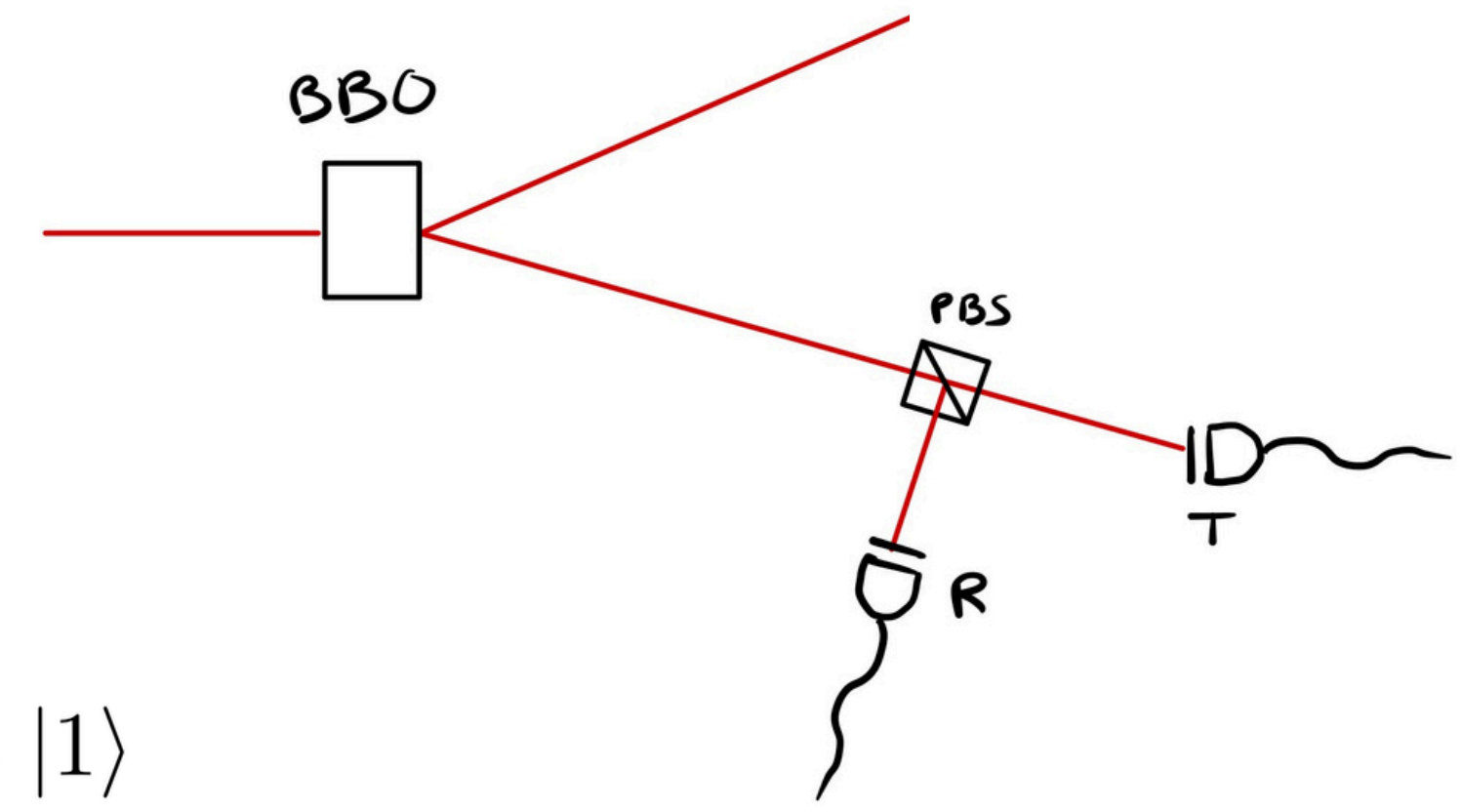
**SOURCE DE PHOTONS UNIQUES
ANNONCÉS**



Source laser

$$|\psi_{laser}\rangle = \sum_{i=0}^{+\infty} c_i |i\rangle$$

$$|\psi_{Photon-unique}\rangle = |1\rangle$$



Comment créer une source de photons uniques annoncés et observer des interférences, à partir d'une source de photons jumeaux ?

Laser: Mesure à 2 détecteurs R et T



Nombre coïncidences R/T > 0

SOURCE DE PHOTONS UNIQUES ANNONCÉS

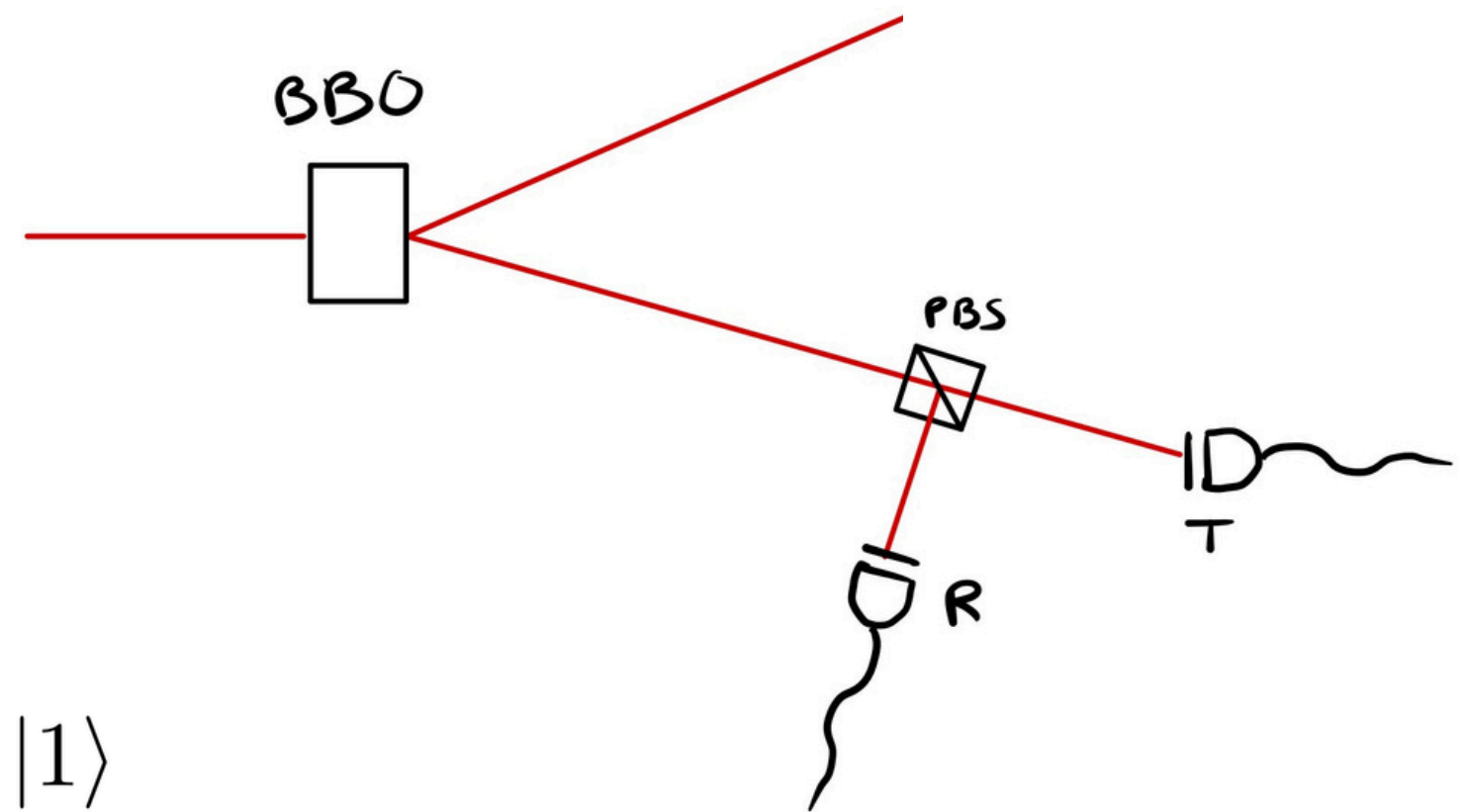


Source laser

$$|\psi_{laser}\rangle = \sum_{i=0}^{+\infty} c_i |i\rangle$$

$$|\psi_{Photon-unique}\rangle = |1\rangle$$

$$|\psi_{laser-apres-BBO}\rangle = \sum_{i=0}^{+\infty} c''_i |i\rangle_1 \otimes |i\rangle_2$$



Comment créer une source de photons uniques annoncés et observer des interférences, à partir d'une source de photons jumeaux ?

Laser: Mesure à 2 détecteurs R et T



Nombre coïncidences R/T > 0

Laser: Mesure à 3 détecteurs
G, R et T



Nombre de coïncidences G/R/T=0

SOURCE DE PHOTONS UNIQUES ANNONCÉS

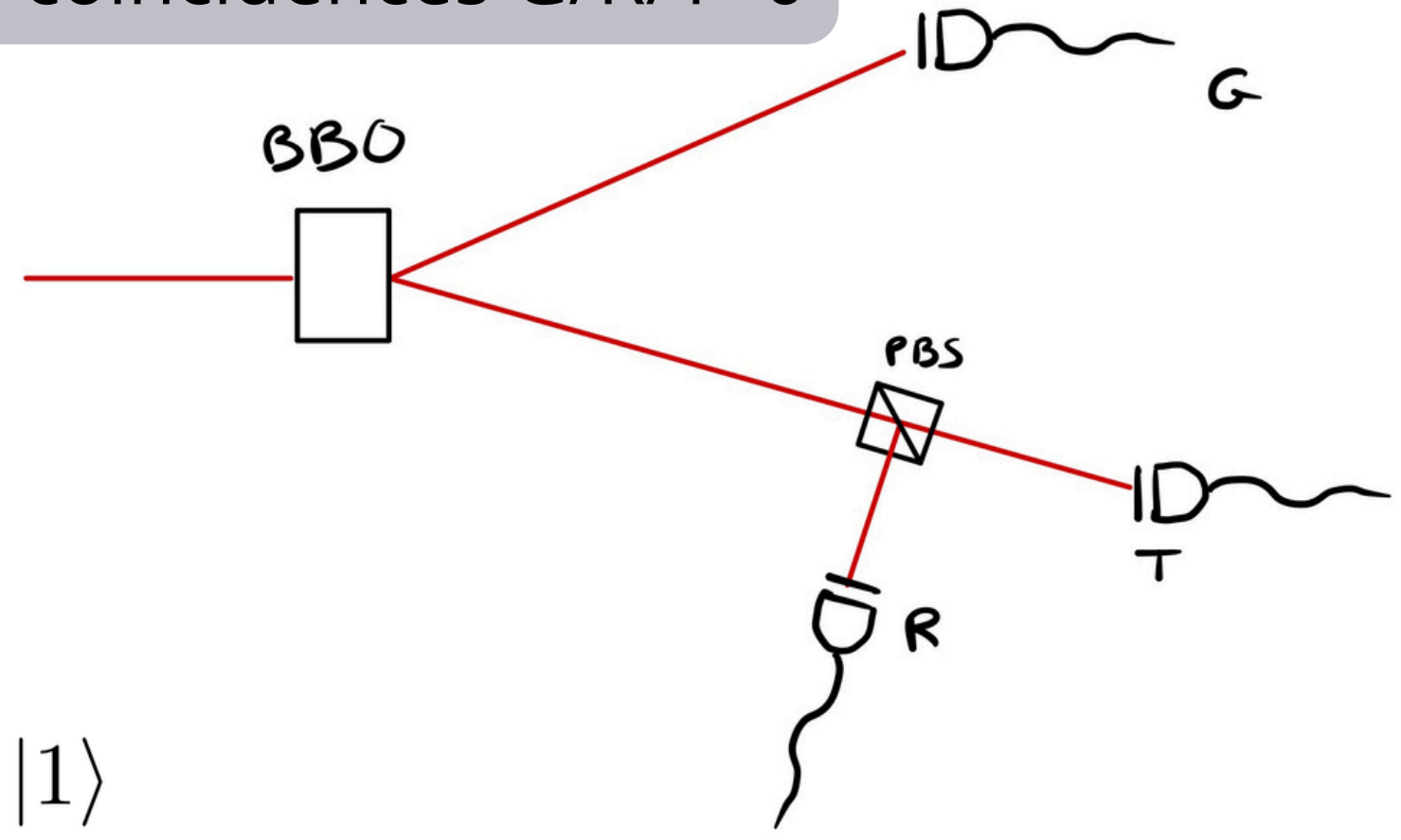


Source laser

$$|\psi_{laser}\rangle = \sum_{i=0}^{+\infty} c_i |i\rangle$$

$$|\psi_{Photon-unique}\rangle = |1\rangle$$

$$|\psi_{laser-apres-BBO}\rangle = \sum_{i=0}^{+\infty} c''_i |i\rangle_1 \otimes |i\rangle_2$$

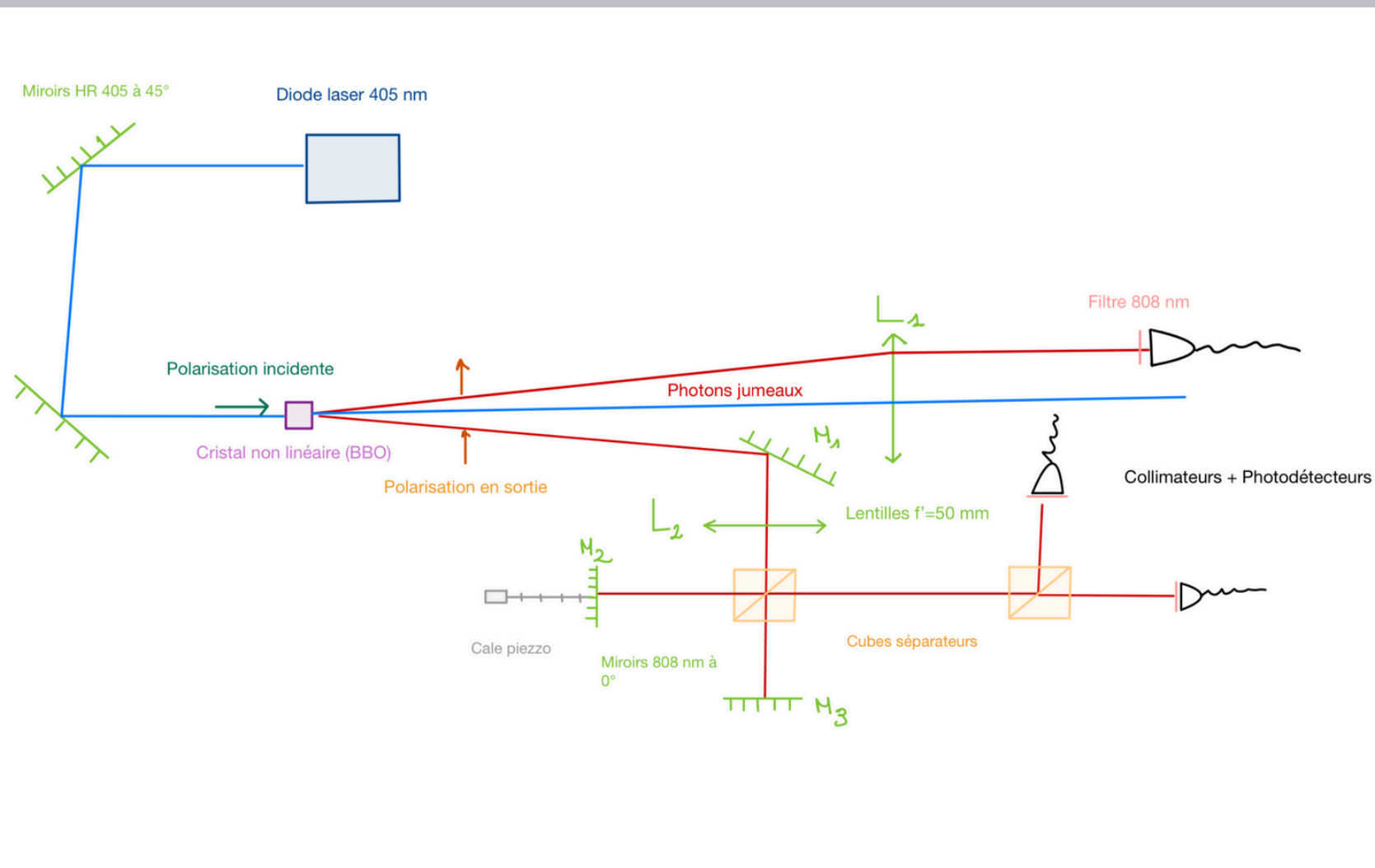


Démarche

OPTIQUE - INTERFÉROMÉTRIE

1

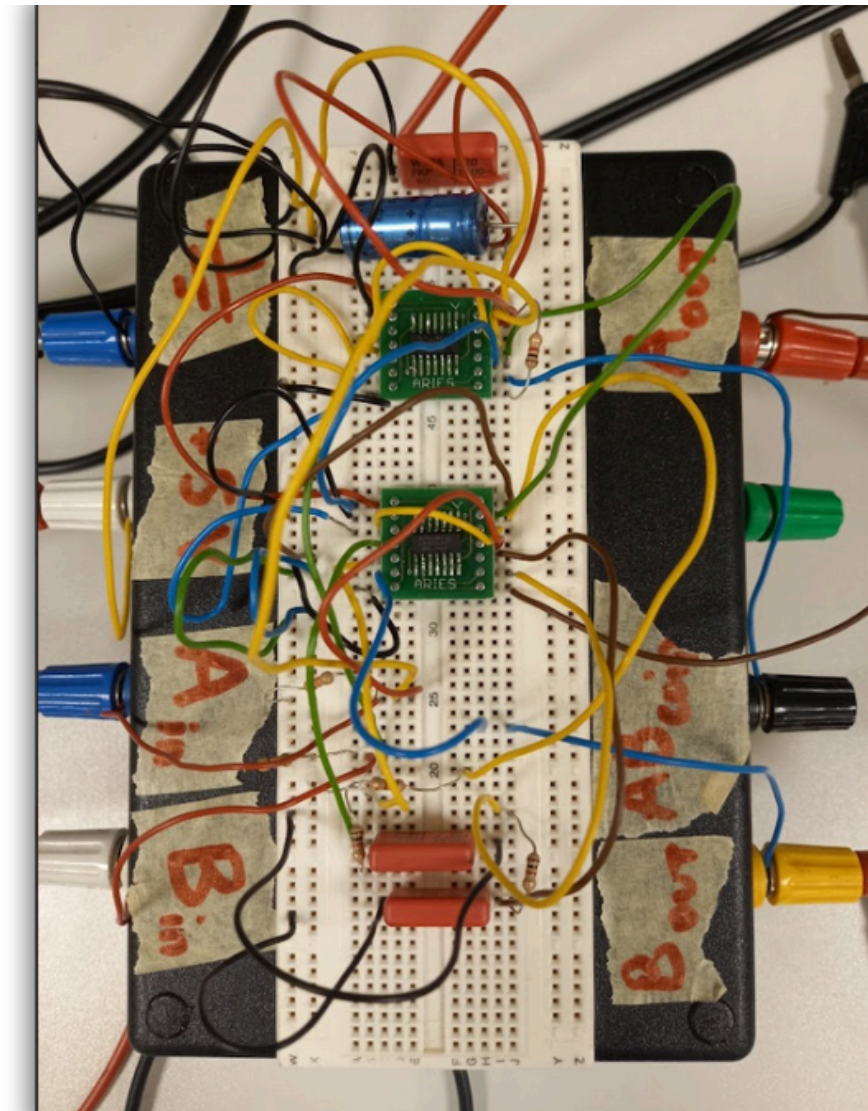
Dans cette partie, nous nous occupons de l'aspect optomécanique du montage ainsi que de la conception de l'interféromètre de Michelson.



ÉLECTRONIQUE - PHOTODÉTECTION

2

Dans cette partie, nous abordons la question du système de détection et des mesures de coïncidences des photons. L'objectif est de montrer que nous avons bien une source de photons uniques.



Du capteur à l'utilisateur

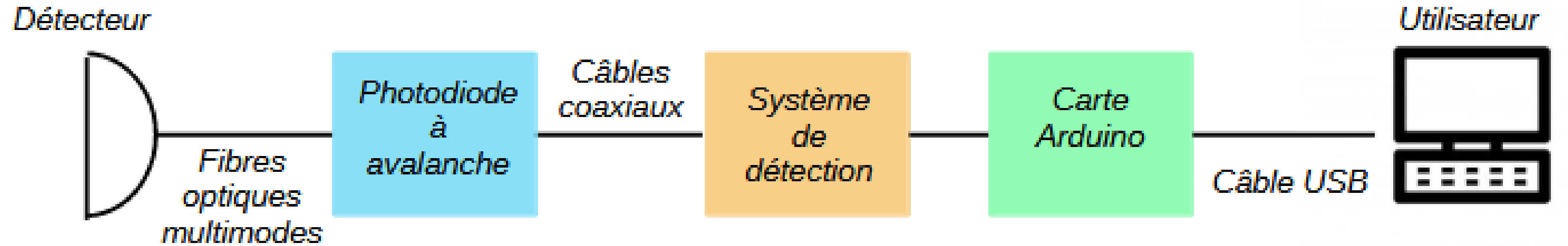


Schéma du montage du détecteur à l'ordinateur

Du capteur à l'utilisateur

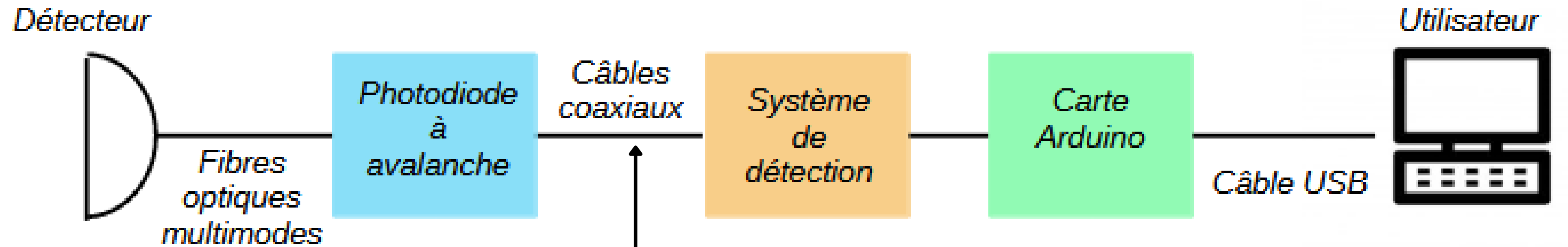


Schéma du montage du détecteur à l'ordinateur



Signal impulsionnel d'entrée du système de détection

Du capteur à l'utilisateur

Détecteur

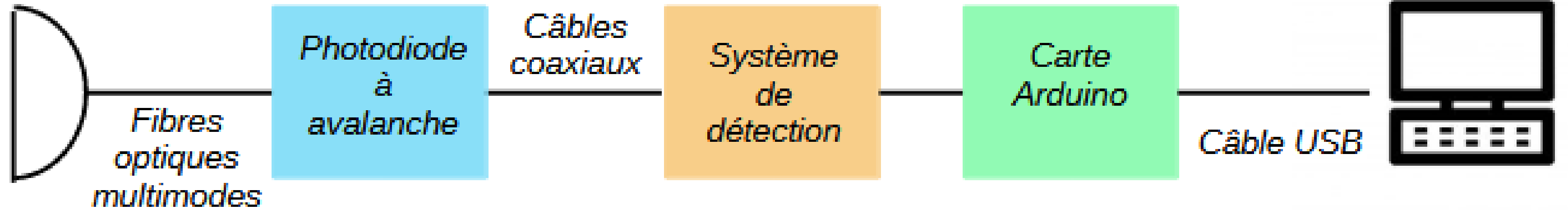


Schéma du montage du détecteur à l'ordinateur

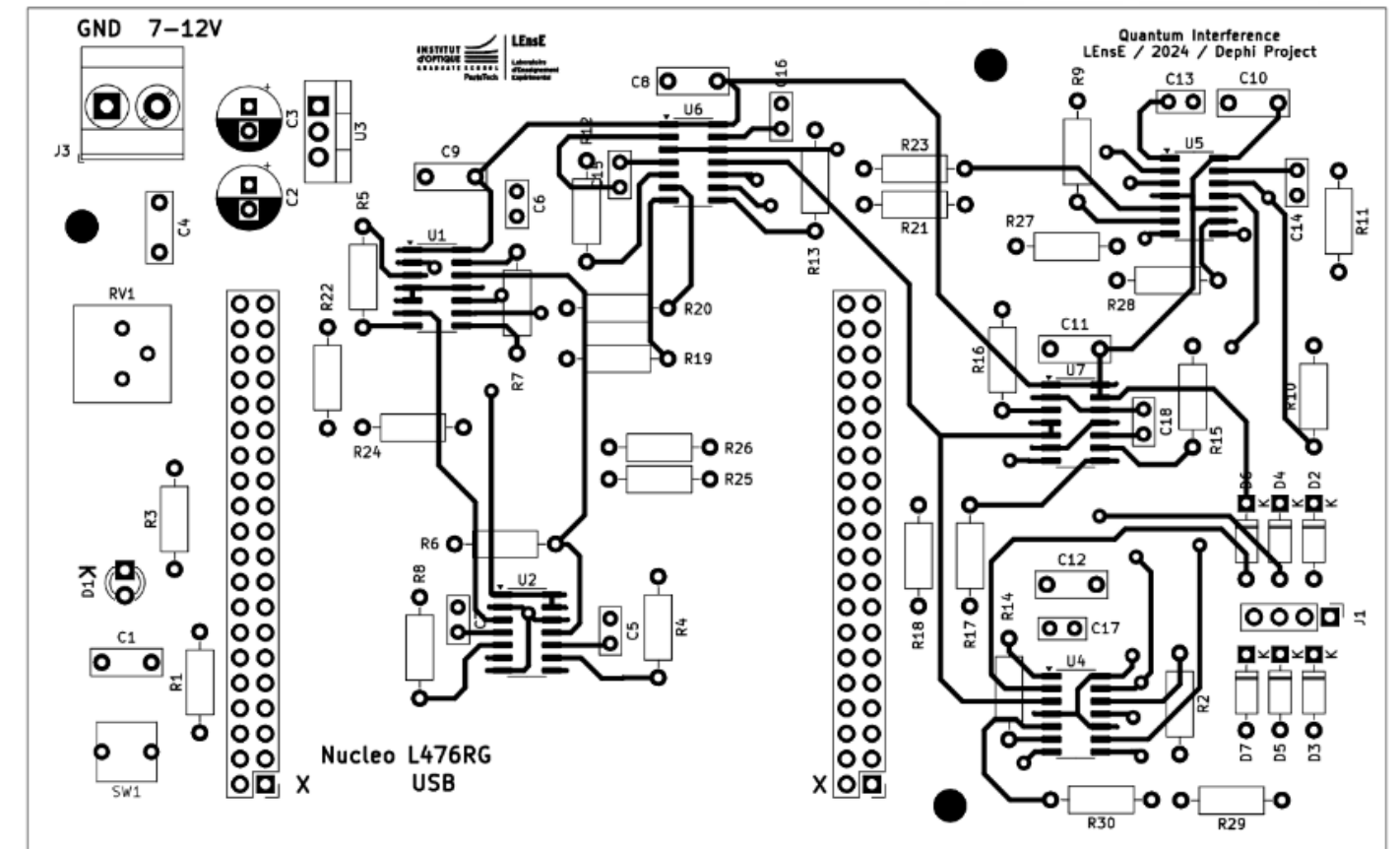
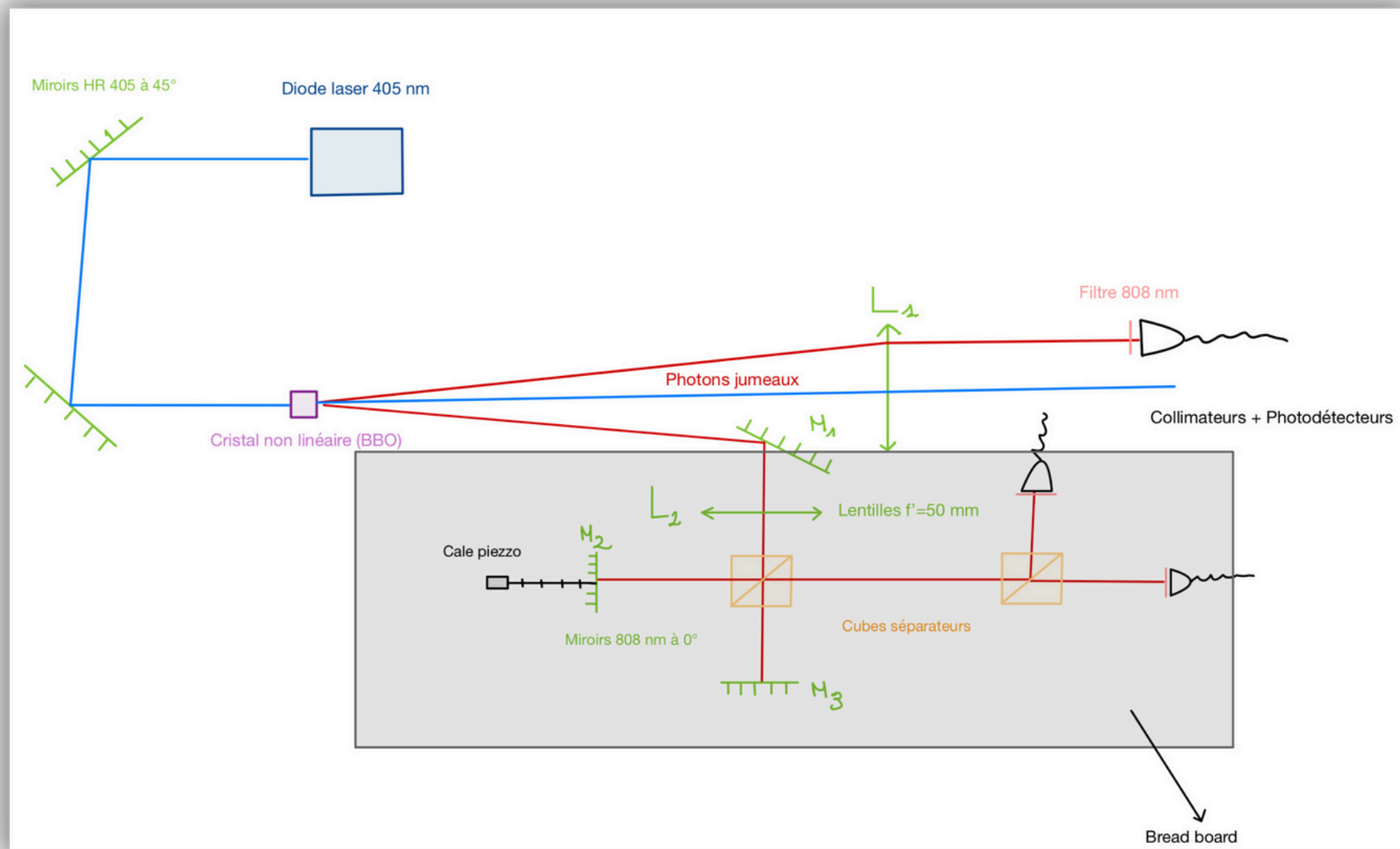


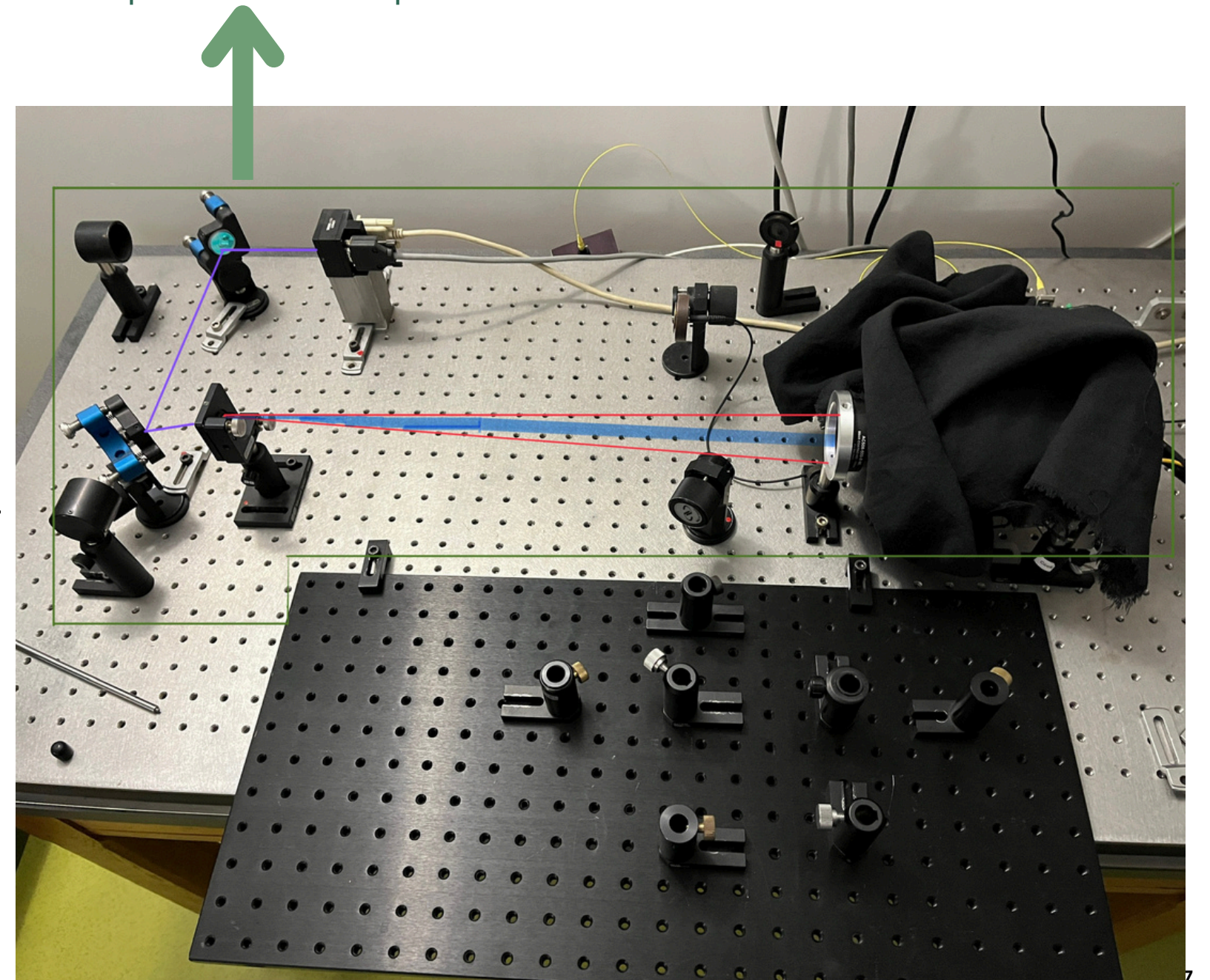
Schéma du circuit intégré

Point technique

L'agencement

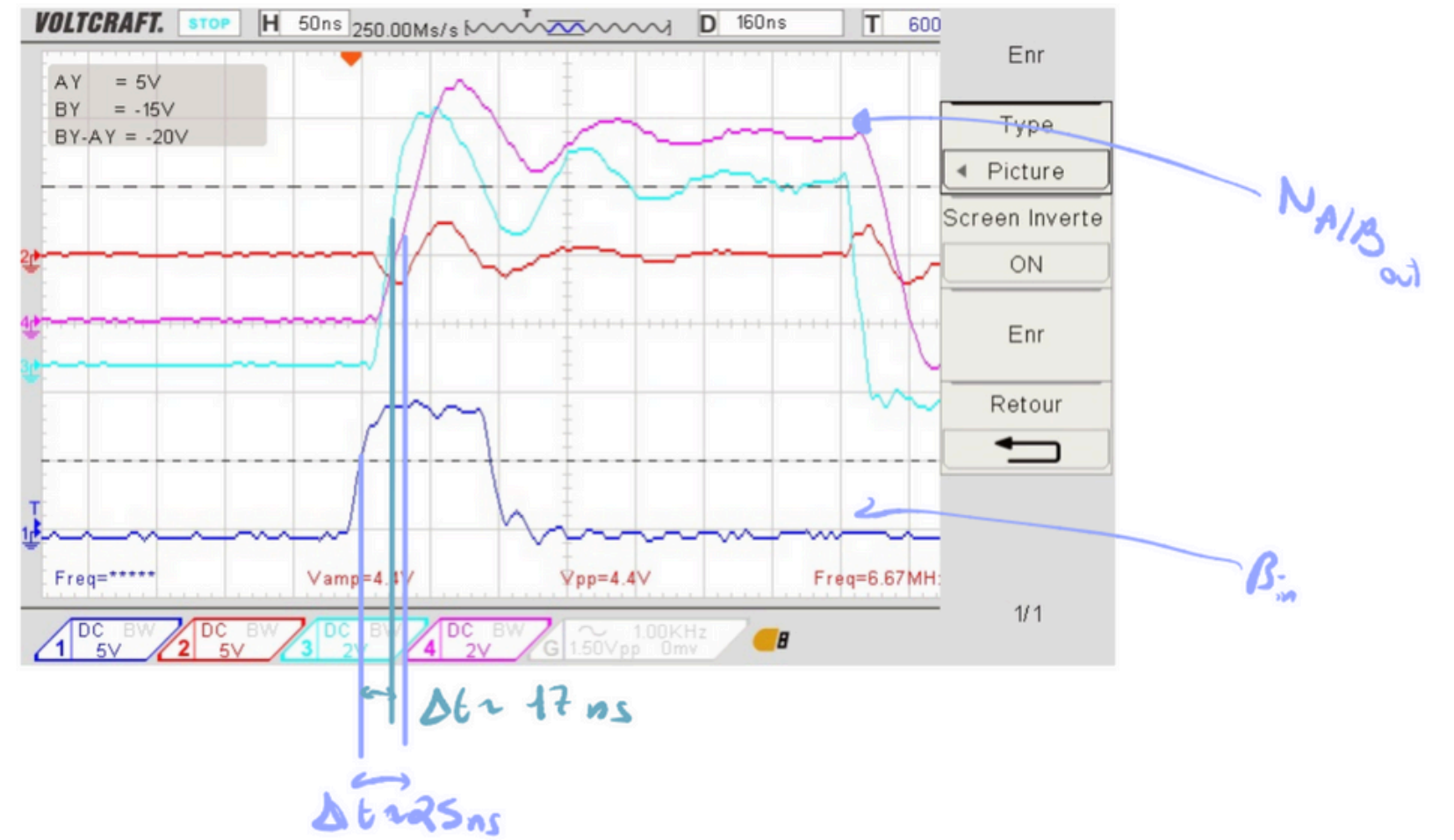
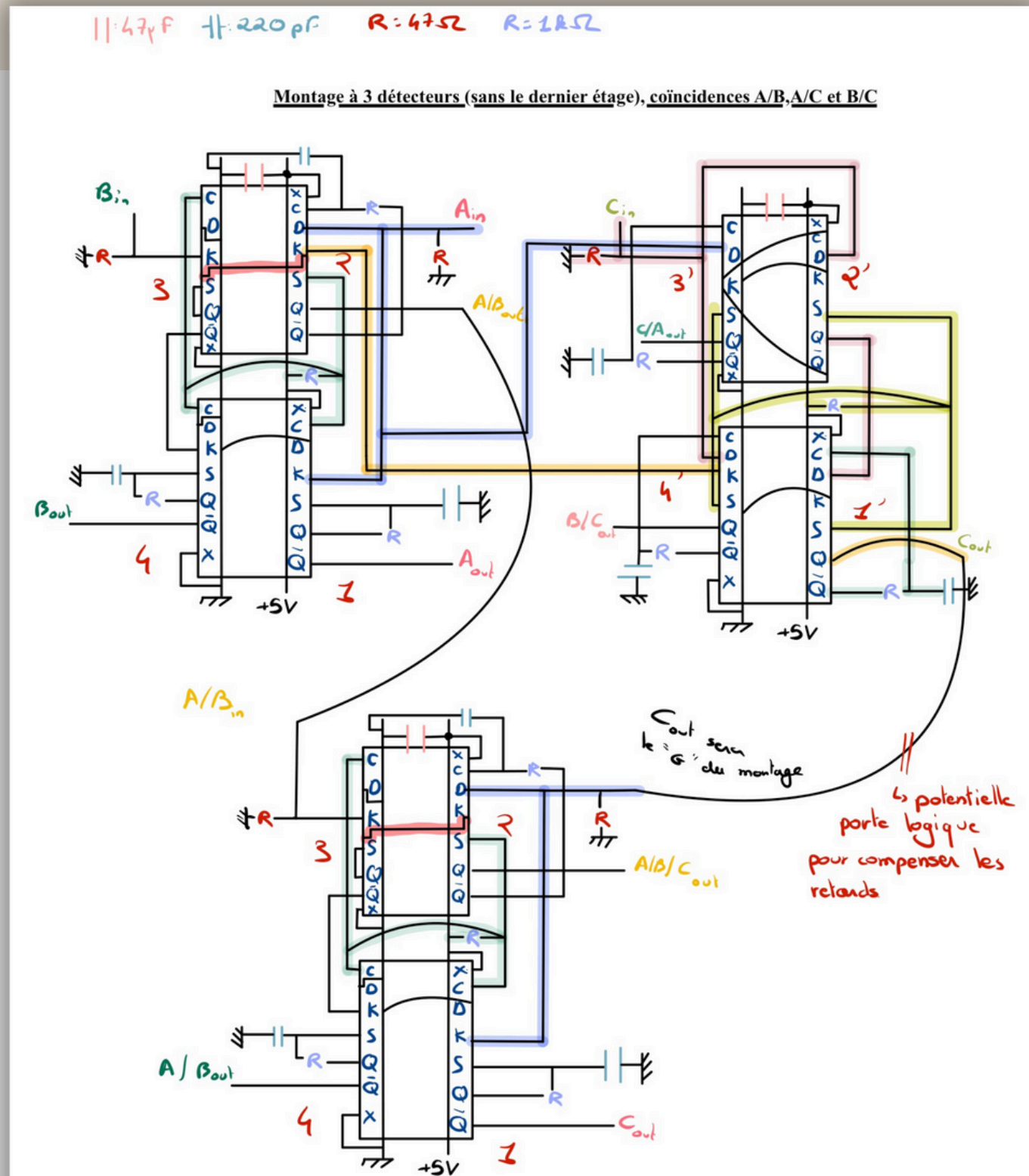


Partie qui doit rester opérationnelle



Point technique

Temps de réaction du système



Capture d'écran de l'oscilloscope montrant les décalages temporels entre les signaux d'entrée et de sortie

Planning

pour les 2 prochaines semaines

Protis	Semaine 2	Semaine 3
<ul style="list-style-type: none">• Test de la plaquette à 3 détecteurs• Montage du circuit intégré à 2 étages• Test et programmation de la carte Arduino pour compter le nombre de coïncidences• Début de l'interfaçage (Python)	<ul style="list-style-type: none">• Montage des pièces achetées• Montage et alignement du Michelson• Modélisation et usinage de la pièce qui tient le collimateur avec SolidWorks• Suite de la partie détection en fonction de l'avancement du Protis	<ul style="list-style-type: none">• Interfaçage• Mesure des performances du nouveau montage de détection• Poster

Noé : 

Jeanne: 

Anouk: 

Maël: 

Helwan: 

Planning

pour les 2 prochaines semaines

Compétences associées :



Valider une solution technologique



Concevoir et dimensionner



Concevoir et dimensionner



Extraire et interpréter



Communiquer

Protis	Semaine 2	Semaine 3
<ul style="list-style-type: none">• Test de la plaquette à 3 détecteurs• Montage du circuit intégré à 2 étages• Test et programmation de la carte Arduino pour compter le nombre de coïncidences• Début de l'interfaçage (Python)	<ul style="list-style-type: none">• Montage des pièces achetées• Montage et alignement du Michelson• Modélisation et usinage de la pièce qui tient le collimateur avec SolidWorks• Suite de la partie détection en fonction de l'avancement du Protis	<ul style="list-style-type: none">• Interfaçage• Mesure des performances du nouveau montage de détection• Poster

Noé :   

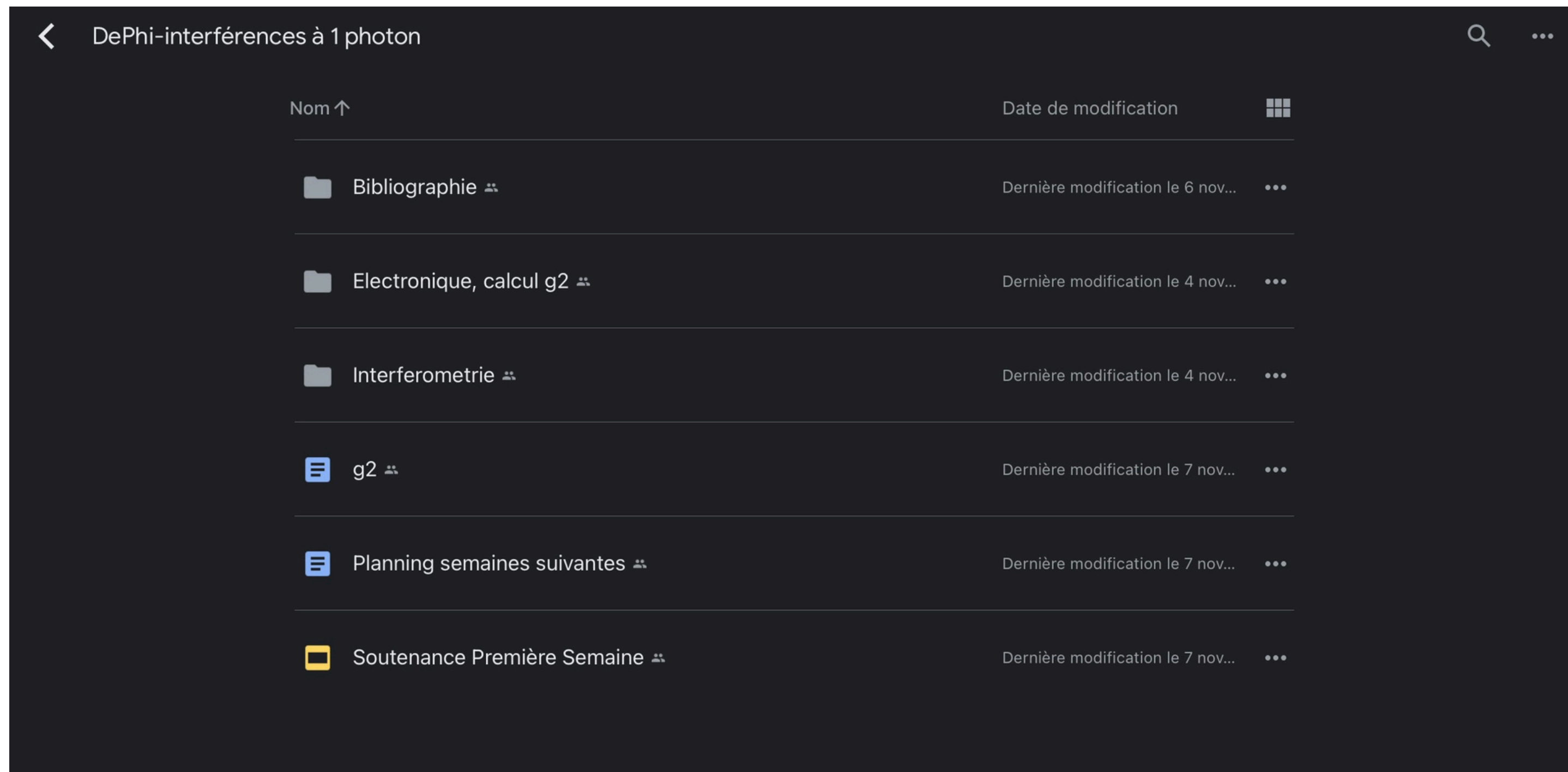
Jeanne:   

Anouk:   

Maël:   

Helwan:   

Systeme de documentation et d'organisation utilisé



Conclusion

Bilan de la semaine

- Liste et commande des composants optiques et de leurs montures
- Prise en main du montage expérimental de Hong-Ou-Mandel
- Montage à 2 détecteurs fonctionnel sur GBF



Conclusion

Bilan de la semaine

- Liste et commande des composants optiques et de leurs montures
- Prise en main du montage expérimental de Hong-Ou-Mandel
- Montage à 2 détecteurs fonctionnel sur GBF

Bilan attendu à la fin de la semaine 2

- Alignement de l'interféromètre de Michelson
- Détection de coïncidences avec les 3 détecteurs



Conclusion

Bilan de la semaine

- Liste et commande des composants optiques et de leurs montures
- Prise en main du montage expérimental de Hong-Ou-Mandel
- Montage à 2 détecteurs fonctionnel sur GBF

Bilan attendu à la fin de la semaine 2

- Alignement de l'interféromètre de Michelson
- Détection de coïncidences avec les 3 détecteurs

Les points de vigilance

- Alternative à trouver pour l'alignement du Michelson si la monture des collimateurs n'est pas prête



Merci de votre attention

Des questions ?

Publicité !

THORLABS