

## Comment utiliser l'holographie de précision pour caractériser une déformation ?

<h3>Sommaire des annexes</h3>
-------------------------------

<b>Annexe A</b>	<b>Glossaire</b> (concernant les <u>mots soulignés*</u> )
<b>Annexe B</b>	La “boîte d’expériences et de mesures” - Collection de photos (TPE)
<b>Annexe C</b>	A propos des plaques holographiques
<b>Annexe D</b>	Traitement d'un hologramme avec interférences
<b>Annexe E</b>	Relevé automatisé des minima d'un hologramme avec interférences (utilisation des fonctionnalités de LoggerPro)

### Annexes à trouver sur notre page web

<b>Annexe F-web</b>	Comment avons-nous travaillé ?
<b>Annexe G-web</b>	Étude du spectre de la lampe verte
<b>Annexe H-web</b>	À propos de la précision de nos mesures : quelques réflexions
<b>Annexe I-web</b>	« Faux » hologramme : étude sur les rayons (extrait de notre TPE)
<b>Annexe J-web</b>	Tous nos hologrammes
<b>Annexe K-web</b>	Carnet bord résumé

### **Cohérence spatiale :**

C'est la capacité de chacun des points du front d'onde à interférer avec les autres points. Ainsi, pour qu'une source soit cohérente spatialement, elle doit être la moins étendue possible. En effet, si la distance entre les différents photons du front d'onde\* dépasse la longueur de cohérence de la source, celle-ci n'est plus cohérente spatialement, puisque les photons ne peuvent plus interférer entre eux.

### **Cohérence temporelle :**

C'est la capacité des trains d'onde d'une même source, émis au même moment, à rester en phase au cours du temps. La distance sur laquelle ces trains d'ondes sont capables de rester en phase est appelée longueur de cohérence. Une source parfaitement cohérente temporellement, donc avec une longueur de cohérence infinie, serait monochromatique, même si une telle source n'existe pas en réalité.

### **Diffraction :**

Phénomène d'étalement des directions de propagation d'une onde à la rencontre d'un obstacle.

### **Double exposition :**

C'est avec cette technique qu'on obtient des hologrammes à franges suite à une déformation.

Le principe est simple : on expose une première fois la plaque holographique et l'objet derrière à la lumière du Laser, comme pour un hologramme simple. L'image de l'objet s'imprime donc dans l'émulsion de la plaque. Puis, on déforme l'objet d'une dizaine de micromètres, et on fait une deuxième exposition, c'est-à-dire qu'on réexpose la plaque et l'objet à la lumière Laser. Ainsi, l'image de l'objet déformé s'enregistre sur la même plaque. Par conséquent, après développement, en regardant l'hologramme, on verra deux images superposées : celle de l'objet non déformé et celle de l'objet déformé. Ces deux images interfèrent entre elles, puisqu'elles ont la même source et sont éclairées en lumière laser : on observe des franges d'interférences.

### **Émulsion holographique :**

Une plaque holographique est une plaque de verre recouverte d'une émulsion photosensible (gélatine). Cette émulsion enregistre les variations de lumière sur la plaque dues aux interférences entre l'onde objet\* et l'onde de référence\*.

L'émulsion holographique est constituée de cristaux d'halogénures d'argent déposés sur une gélatine, dont la taille est inférieure au micron. L'épaisseur totale de l'émulsion est d'environ 10 microns. Lorsque l'émulsion est exposée à la lumière, un photon est absorbé par chaque cristal. Ensemble, les grains qui ont été exposés à la lumière forment ce que l'on appelle « l'image latente » invisible. On procède ensuite au développement de la plaque qui consiste en une réduction des grains d'halogénure d'argent exposés à la lumière, en argent métallique pour révéler l'image latente et stopper la sensibilité de la plaque à la lumière. On procède ensuite au blanchiment de la plaque en la plongeant dans une solution qui transformera les cristaux d'argent en sels transparents.

### **Figure d'interférence : voir aussi *Interférences***

Interférences entre l'onde objet et l'onde de référence enregistrées dans l'émulsion de la plaque holographique. La plaque contient donc toutes les données concernant l'amplitude et la phase de l'onde objet, c'est-à-dire la forme et la position de l'objet dans l'espace.

### **Front d'onde :**

C'est ce que l'on a représenté sur les schémas explicatifs dans le [paragraphe 2.2](#).

Le front d'onde est une surface d'égale phase d'une onde. En d'autres termes, un front d'onde est composé par de multiples points ayant tous mis le même temps de parcours de la source lumineuse

vers un autre point. Le concept est utilisé pour décrire la propagation des ondes comme le son ou le rayonnement électromagnétique (lumière, onde radio, etc.).

**Gélatine :** voir *Émulsion holographique*

Augmentation ou diminution de l'amplitude d'une onde résultant de la superposition de plusieurs

**Inactinique :** voir aussi *Lumière inactinique*

Augmentation ou diminution de l'amplitude d'une onde résultant de la superposition de plusieurs

**Interférences :**

Augmentation ou diminution de l'amplitude d'une onde résultant de la superposition de plusieurs ondes de même nature et de même fréquence.

**Lampe inactinique :**

Lampe spéciale émettant une "lumière inactinique", c'est-à-dire n'ayant pas ou peu d'effets photochimiques. Autrement dit, aucune radiation émise ne doit avoir une longueur d'onde pour laquelle la gélatine est sensible. [Voir l'Annexe I concernant notre lampe et la lumière émise.](#)

**Laser :**

Acronyme de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. C'est la seule source lumineuse utilisable en holographie, car le processus fait intervenir des interférences : on a besoin d'une cohérence spatiale\* et temporelle\*. Le Laser répond à ces exigences puisqu'il est monochromatique, a une grande longueur de cohérence et une grande directivité.

**Onde de référence (ou faisceau de référence) :**

Onde arrivant sur la plaque holographique sans avoir rencontré d'objet sur son passage.

**Onde objet (ou faisceau objet) :**

Onde arrivant sur la plaque holographique après avoir été diffractée par l'objet à holographier. Elle va interférer de manière constructive ou destructive avec l'onde de référence\* sur la plaque, en fonction du relief de l'objet qui l'a réfléchi. Ainsi, la plaque holographique enregistre sous la forme d'une figure d'interférences\* le relief de l'objet.

**Périodicité spatiale :**

Cela fait référence à la période spatiale qui désigne tout simplement la longueur d'onde.

**Point d'inflexion :**

Point où s'opère un changement de concavité de la courbe. Cela correspond à l'axe de symétrie de la déformation que nous avons appliquée.

## Annexe B : La “boîte d’expériences et de mesures ” (photos)

---

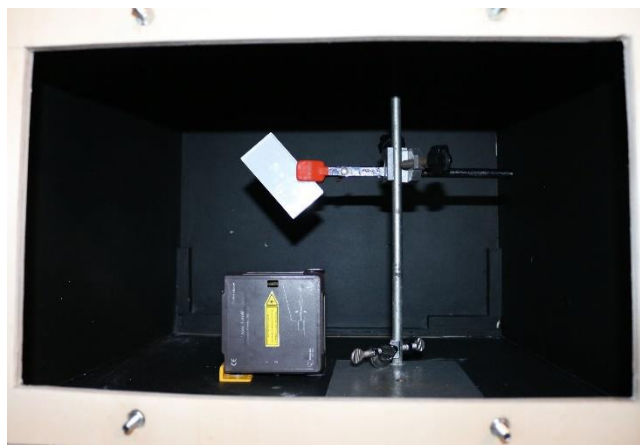
Nous avons choisi de construire une boîte d’expériences et de mesures pour bien visualiser les rayons lumineux et vérifier nos hypothèses formulées en suivant la méthode de Descartes. Elle nous permet d’avoir l’obscurité suffisante.

Bien sûr, il a fallu faire des trous bien placés pour photographier ou filmer à l’aide d’une tablette et générer de la fumée.

*Ci-contre : QR-code pour accéder à nos vidéos (plan large puis plan serré)*

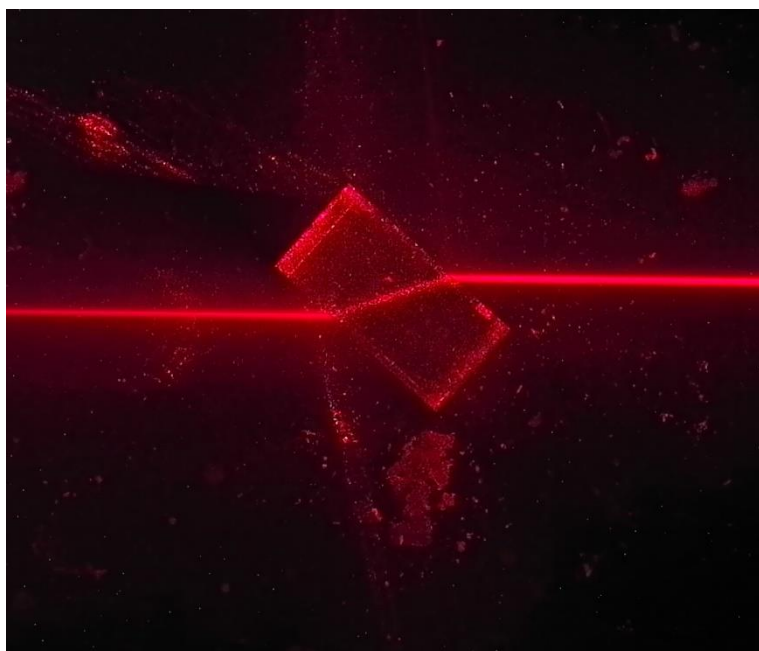


*En enlevant le couvercle du haut  
dans le lequel nous avons fait un trou*



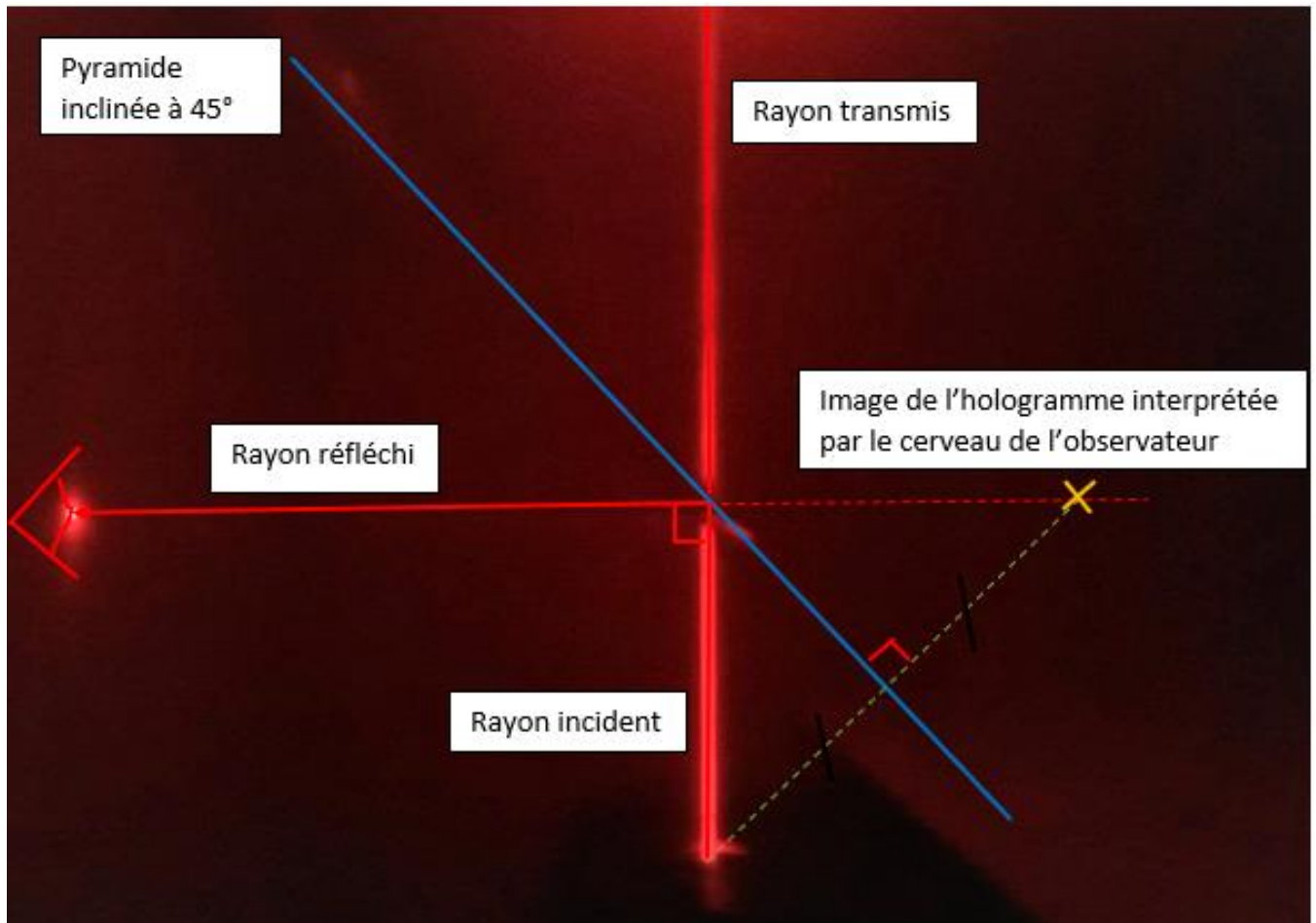
*Sur le côté en enlevant la trappe dans  
laquelle nous avons fait aussi un trou*

Voici photographies issues de notre petite collection :

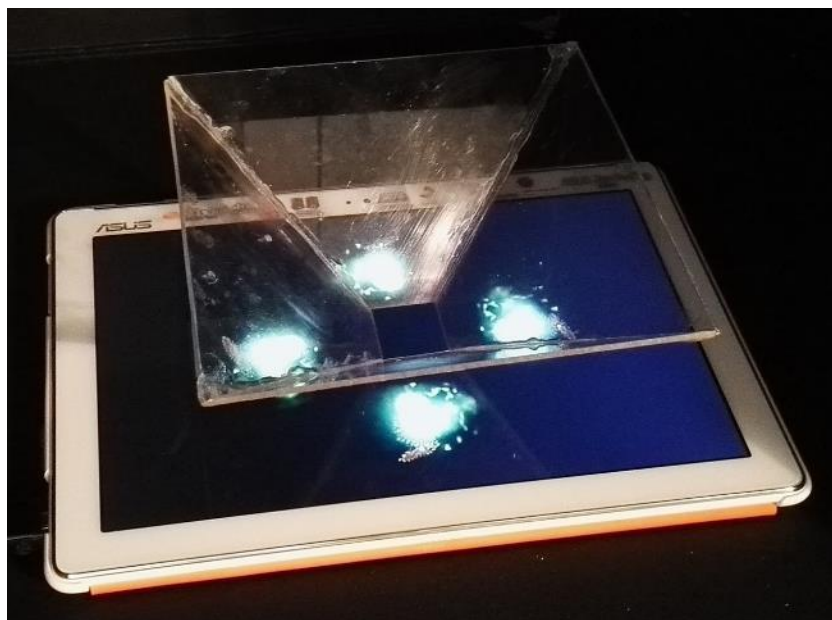


*Pour observer la déviation la déviation d'un rayon au passage d'une vitre ou d'un prisme (ci-dessus et ci-dessous, une épaisseur très importante pour bien voir le décalage)*

*Pour observer les divers rayons créés au niveau du plexiglas de notre pyramide :*



Pratique aussi pour visualiser l'hologramme au centre de la pyramide renversée, même si la pièce est lumineuse :





## Annexe C : A propos des plaques holographiques

Tout au long de nos expériences nous avons dû nous approprier le matériel mais il a fallu également appréhender toutes les caractéristiques des plaques holographiques pour optimiser nos résultats. Elle se base sur le **principe de la photographie argentique**.

**Dans un premier temps, lors de notre première journée à Lannion, nous avons appris qu'une gélatine recouvraient les plaques holographiques.** Voici leurs caractéristiques (extrait du catalogue de chez Ultimate Holography) :

Nom	Applications principales	Sensibilité $\mu\text{J}/\text{cm}^2$	Taille de grain (nm)	Lasers	Conservation	Développement recommandé
<b>U08M</b>	Hologrammes par réflexion ou transmission monochromes au laser pulsé ou continu. Holographie 2 couleurs (R+V)	90	10	Rubis-Yag Tout laser continu vert ou rouge	4°C > 5 ans	Révélateur pour continu +Blanchiment Universel

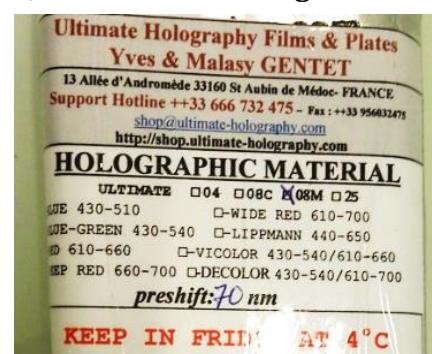
Comme on peut le voir cette gélatine est sensible notamment à la lumière laser rouge. Cela nous a permis de fabriquer notre hologramme à partir d'un laser rouge soit d'environ 632 nm.

Bien noter que la plaque ne diffuse, parmi le spectre de la lumière blanche, que la longueur d'onde du laser qui l'a créé.

**Cependant, lorsque nous regardons l'hologramme à l'aide d'une lumière blanche, l'hologramme apparaît dans des couleurs vert/jaune. On peut alors se demander, comment ce changement de couleurs (de longueur d'onde) a-t-il lieu ?**

Le fabricant de plaques holographiques met volontairement dans la gélatine une substance qui se dissout au développement. La gélatine se contracte donc son épaisseur diminue. C'est la contraction de la gélatine baisse la périodicité de la figure d'interférence de - 70 nm soit ~ 560 nm. Ce choix a été fait car ces nuances de couleur sont plus adaptées à la sensibilité de notre œil.

Cette substance se nomme le presift comme on peut le voir l'emballage (ci-contre) dans le catalogue (ci-dessous).



### AGENT DE PRE-SHIFT STANDARD DANS U08M-R-70

**Agent incorporé à la gélatine lors de la fabrication qui la gonfle jusqu'à la prise de vue, puis qui se dissout à l'eau de lavage.**

<b>Pré-Shift</b>	<b>70 vert-jaune</b>	Pré-shift de 70 - Cela signifie que l'hologramme reconstruit, après développement, sera de 70nm shifté en couleur. Par exemple, un enregistrement avec un laser rouge HeNe (à 633nm) donnera un hologramme final de couleur jaune-verte ( vers 560nm)
------------------	--------------------------	---

**Peut-on utiliser une plaque sans presift ?**

Oui. Nous en avons commandé cinq dans l'optique d'observer les franges d'interférences en direct. Pour ce faire, nous faisons qu'une seule exposition, nous révélons la plaque, enfin nous la remplaçons exactement au même endroit. Si on déforme la plaque holographiée, nous devrions les voir...

## Annexe D : Traitement d'un hologramme avec interférences (deux méthodes)

### Au préalable :

Cela n'a pas été forcément le plus facile : prendre en photo l'hologramme. Bien sûr, pas de flash et l'appareil photo bien stable. Mais il fallait surtout veiller à éclairer correctement la face de la plaque holographique non recouverte de gélatine :

- Utilisation d'un éclairage assez ponctuel (flash d'un smartphone par exemple) dans le même axe que le LASER ayant servi à faire l'hologramme ;
- Appareil photo du même côté que l'éclairage.

Enfin, un traitement par un logiciel de traitement de images a été bien utile pour régler contraste et netteté.

### Première méthode :

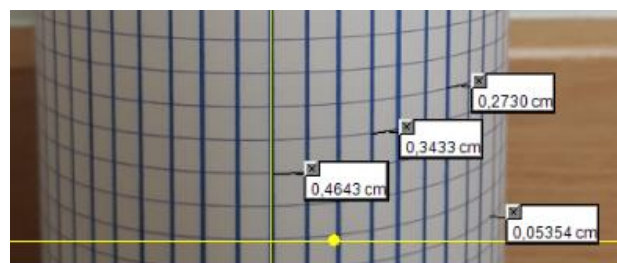
- Utilisée pour notre modélisation papier ;
- Utilisable pour un hologramme avec peu de franges.

On utilise directement le logiciel Loggerpro qui permet l'importation d'une image pour faire son *Analyse Photo*. Cela suppose au préalable de mettre à l'échelle la photo.

1) Détermination de la position des franges noires (ci-dessous sur un hologramme)



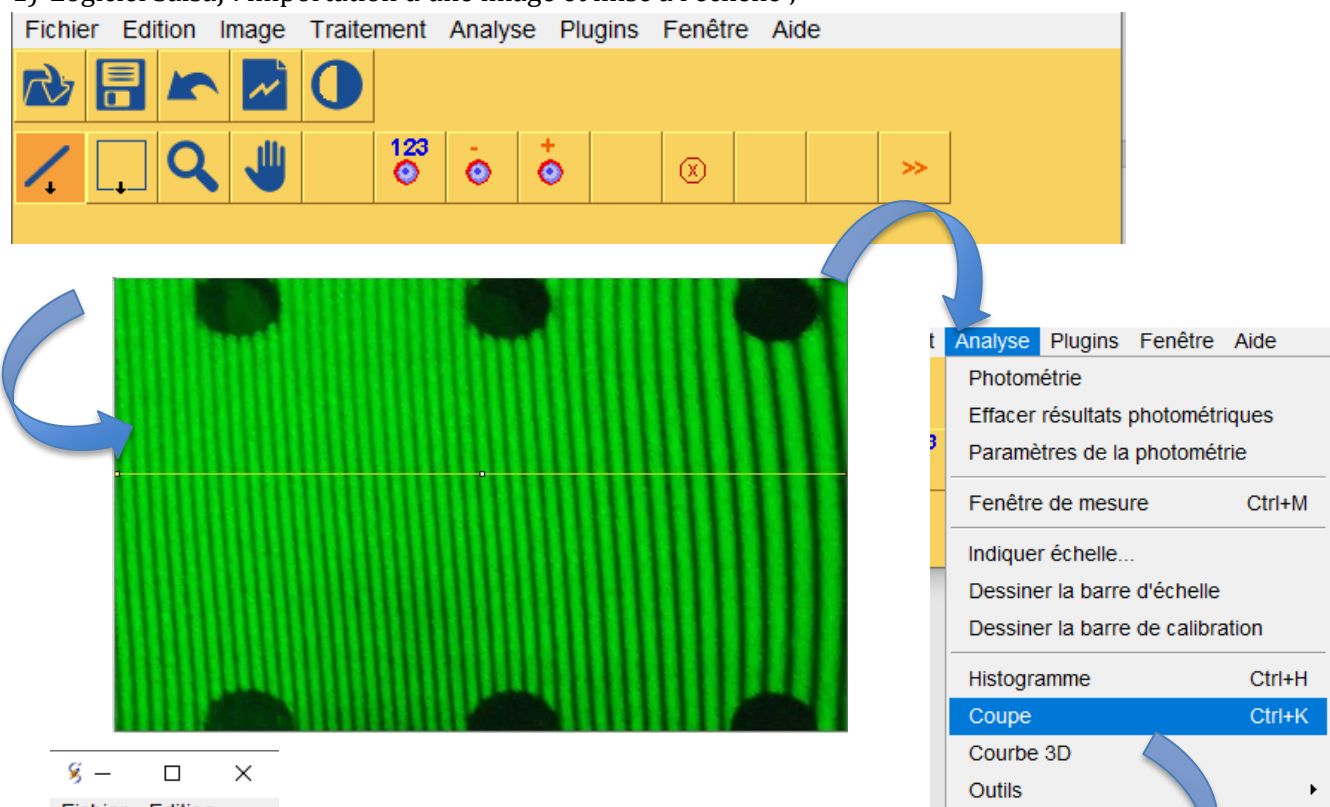
2) Détermination l'interfrange entre deux franges noires (ci-contre sur notre modèle papier entre deux traits verticaux)



## Seconde méthode :

Lorsqu'il y a trop de franges, il est préférable de les repérer grâce à un logiciel dédié, SalsaJ.

1) Logiciel SalsaJ : importation d'une image et mise à l'échelle ;



The screenshot shows the SalsaJ software interface. The menu bar includes 'Fichier', 'Edition', 'Image', 'Traitement', 'Analyse', 'Plug-ins', 'Fenêtre', and 'Aide'. The toolbar contains various icons for file operations, zooming, and analysis. A blue arrow points from the 'Analyse' menu to the 'Coupe' (Cut) option. Another blue arrow points from the 'Coupe' option to a window titled 'Tracé d'après Holo1DformationMecano-Renversé'.

The 'Analyse' menu options are:

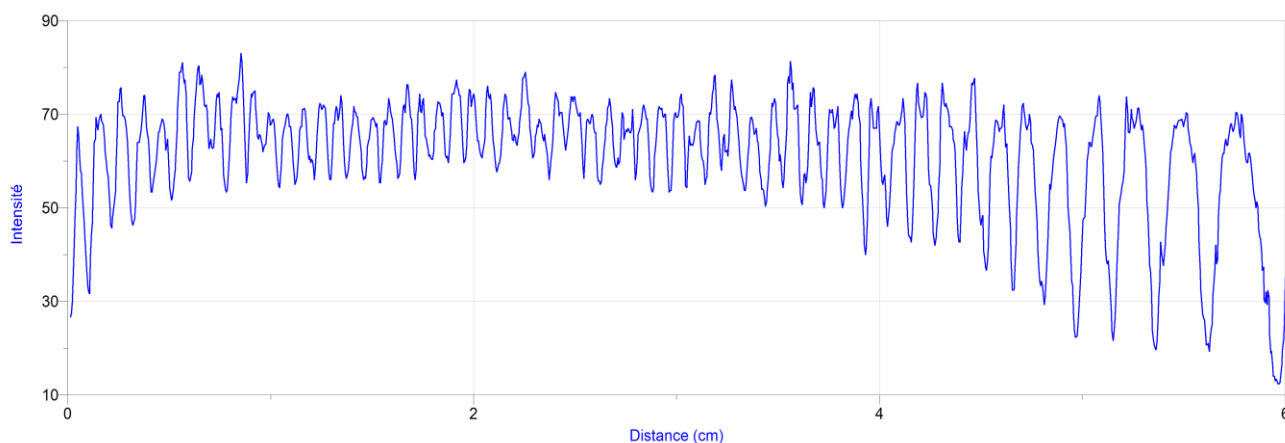
- Photométrie
- Effacer résultats photométriques
- Paramètres de la photométrie
- Fenêtre de mesure (Ctrl+M)
- Indiquer échelle...
- Dessiner la barre d'échelle
- Dessiner la barre de calibration
- Histogramme (Ctrl+H)
- Coupe (Ctrl+K)**
- Courbe 3D
- Outils

The 'Tracé d'après Holo1DformationMecano-Renversé' window displays a graph of 'Intensité' (Intensity) versus 'Distance (pixels)'. The y-axis ranges from 19.0 to 82.7, and the x-axis ranges from 314 to 1582. The graph shows a highly oscillatory signal. Below the graph are buttons for 'Liste', 'Enregistrer', 'Copier', 'Propriétés', 'Indiquer l'échelle', and 'Options de coupe'.

A blue arrow points from the 'Tracé d'après Holo1DformationMecano-Renversé' window to a table window.

X	Y
314	55.000
315	49.667
316	46.000
317	43.333
318	45.000
319	45.667
320	49.000
321	54.000
322	58.333
323	62.000
324	68.333
325	73.333
326	75.667
327	79.667

2) Exportation puis exploitation dans un tableur-grapheur (Loggerpro en l'occurrence)





## Annexe E : Relevé automatisé des minima d'un hologramme avec interférences (utilisation des fonctionnalités de LoggerPro)

### Au préalable :

- il est nécessaire de faire une photographie de l'hologramme
- il faut faire le traitement avec le logiciel SALSJ (voir ANNEXE D précédente)

**Objectif :** comme il est très laborieux de repérer toutes les franges une par une, nous avons eu l'idée **de le faire réaliser automatiquement par le tableur-grapheur** que nous connaissons, le logiciel LoggerPro. En cela nous avons été aidées par M. Benoît Bruder, ingénieur et co-concepteur du logiciel.

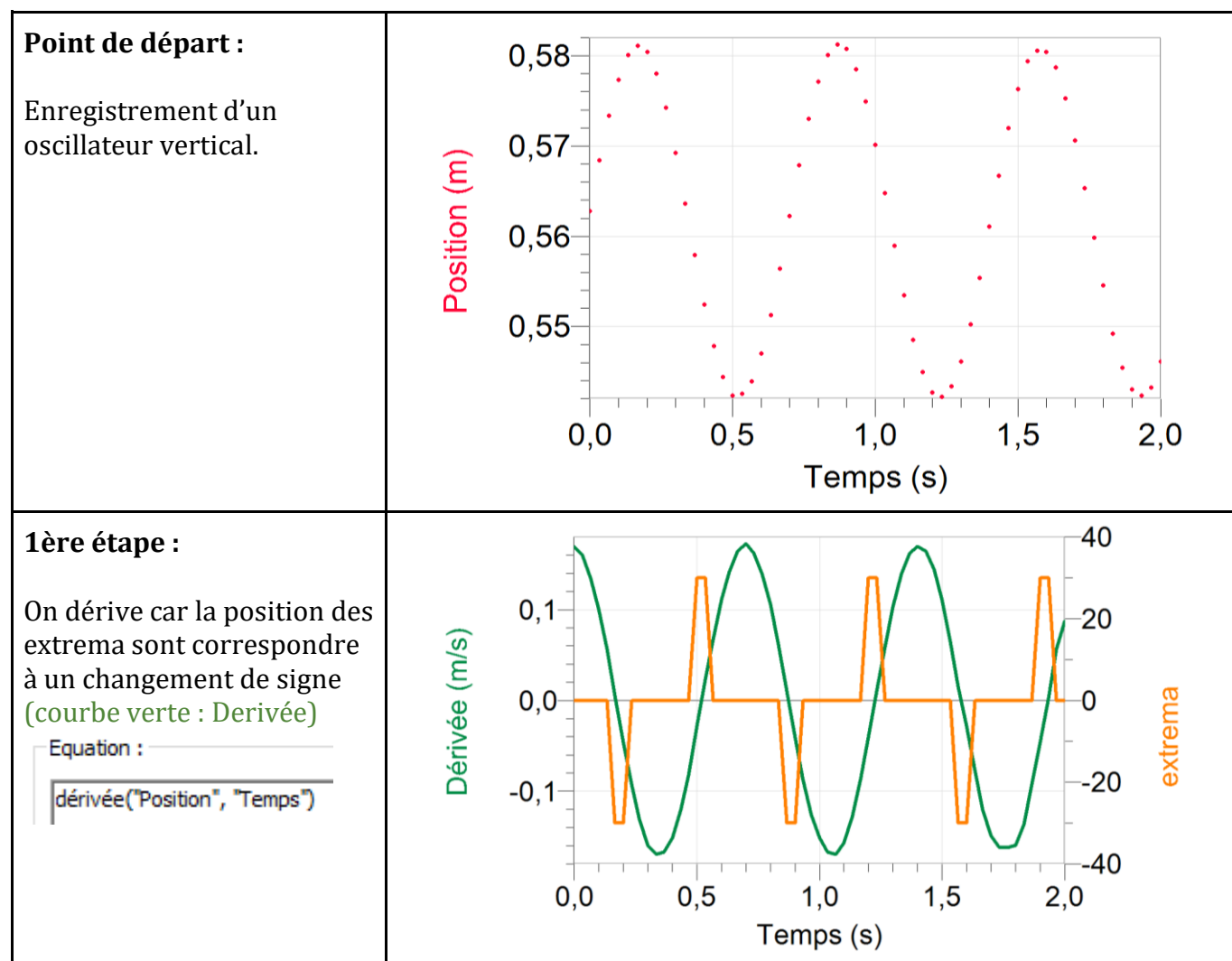
### Démarche :

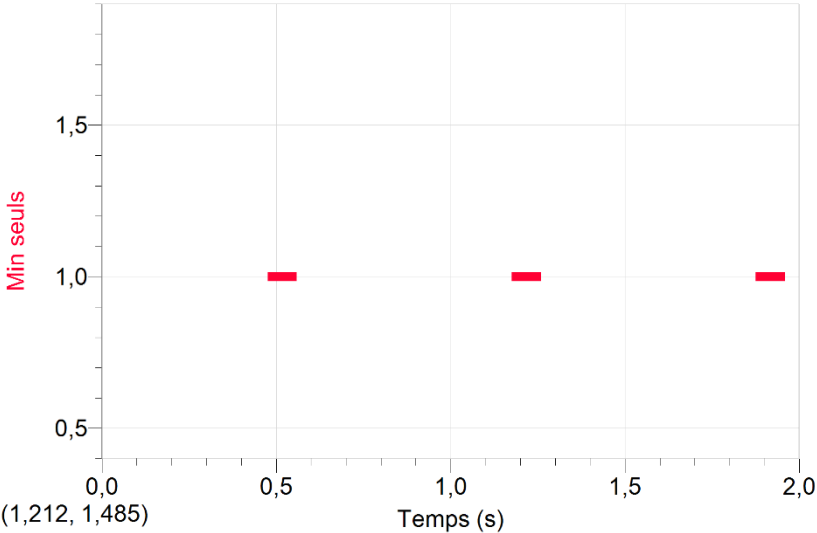
- il s'agit de récupérer les données brutes issues de SALSJ : intensité de la lumière en fonction de la distance.
- il s'agit ensuite d'automatiser la récupération des abscisses correspondant à une frange noire (centre)

### Détails :

*Remarque importante : on prend ici l'exemple d'un oscillateur vertical pour plus de simplicité.*

*Il a fallu adapter cette méthode à notre étude sachant qu'en abscisse nous avons une distance (au lieu d'un temps) et en ordonnée une intensité lumineuse (au lieu d'une amplitude).*



<p>On utilise le calcul : "colonne"/valeur absolue de "colonne". Cela donne 1 pour les valeurs positives et -1 pour les valeurs négatives. (courbes jaunes : extrema)</p>	<p><b>On obtient donc un signal qu'avec des 1 et des -1. Ainsi toutes les valeurs sont nulles sauf celles pour les extrema</b></p> <p>Formule globale utilisée :</p> <p>Equation : <code>dérivée("Dérivée"/abs("Dérivée"), "Temps")</code></p>
<p><b>2ème étape :</b> Comme on ne veut que les <b>minimas (franges noires)</b>, on "extrema" par sa valeur absolue. Cela permet de mettre à zéro les maximums et ne garder que les minimums. <b>A ce stade, on a donc une courbe qui est nulle sauf pour les minimums.</b></p>	 <p>(1,212, 1,485)</p>
<p>Afin de purger les zéros on divise la colonne par elle-même. Pourquoi ? avec LoggerPro quand on fait une division par zéro au lieu de renvoyer un message d'erreur on a une case vide. <b>En plus cela normalise à 1 les valeurs non nulles !</b> (graphique avec points rouges)</p>	<p><b>On obtient soit 1, soit rien (case vide).</b></p> <p>Formule globale utilisée :</p> <p>Equation : <code>("extrema"+abs("extrema"))/("extrema"+abs("extrema"))</code></p>
<p><b>3ème étape :</b> On peut désormais utiliser la <b>fonction "RéductionIndirecte"</b> qui donne les valeurs d'une colonne pour lesquelles une autre colonne n'est pas vide.</p>	<p>Equation : <code>réductionIndirecte("Temps", "Min seuls")</code></p> <p><b>La colonne (appelée Minima) contient les temps pour lesquels on a un minimum.</b> Problème : Comme le calcul de la dérivée est un calcul différentiel, à chaque fois, on a une valeur non nulle pour 2 points consécutifs. Cela correspond à l'intervalle qui contient le minimum.</p>
<p><b>4ème étape :</b> On ne garde que le premier des deux points consécutifs avec les <b>fonctions "Réduction" et "Sous-ensemble"</b>.</p>	<p>Equation : <code>réduction(sousensemble("Minima", 1, 2))</code></p> <p>NB : On aurait pu garder que le second point (au lieu du premier), ou bien faire un calcul, mais on considère que le signal est bien échantillonné. <b>En fait on a bien la date recherchée à la valeur de l'échantillonnage près.</b></p>

**Voici un extrait du traitement concernant notre étude (franges d'interférences sur un hologramme) :**

Logger Pro - Photo du 20juin2019 - Holo num7 Interf - TraitementAuto.cmb1\*

Fichier Edition Expérience Données Analyse Insérer Options Page Aide



Aucun périphérique connecté.

	Photo 20 juin 2019							
	d (cm)	Intensité	Moy lissée	Dérivée	Extrema	Min seuls	Minima	Colonne finale (cm)
1	0,004	197,333	194,524	-513,703	0,000		0,010	0,010
2	0,005	197,333	194,010	-548,933	0,000		0,011	0,029
3	0,006	194,667	193,426	-390,755	0,000		0,029	0,039
4	0,008	193,000	192,838	-601,448	0,000		0,030	0,048
5	0,009	189,333	191,621	-1004,514	0,000		0,039	0,063
6	0,010	189,333	190,829	-378,392	1000,000	1,000	0,040	0,075
7	0,011	189,333	190,865	192,198	666,667	1,000	0,048	0,086
8	0,013	190,333	191,405	627,658	0,000		0,049	0,108
9	0,014	192,000	192,748	1445,973	0,000		0,063	0,118
10	0,015	195,000	194,297	1567,595	0,000		0,064	0,138
11	0,016	195,667	195,883	927,955	0,000		0,075	0,150
12	0,018	198,333	197,081	735,739	0,000		0,076	0,160
13	0,019	199,333	198,090	1040,527	0,000		0,086	0,173
14	0,020	200,000	199,162	1247,743	0,000		0,088	0,219
15	0,021	197,667	200,586	867,883	0,000		0,108	0,246
16	0,023	199,333	201,766	759,784	0,000		0,109	0,264
17	0,024	204,000	202,865	941,446	0,000		0,118	0,282
18	0,025	208,000	203,649	720,689	0,000		0,119	0,296
19	0,026	205,667	204,306	228,198	-666,667		0,138	0,340
20	0,028	204,333	204,333	-60,063	-666,667		0,139	0,351
21	0,029	203,000	204,126	-153,149	1000,000	1,000	0,150	0,367
22	0,030	203,333	204,027	373,878	1000,000	1,000	0,152	0,389
23	0,031	201,333	204,874	405,423	0,000		0,160	0,415
24	0,033	204,667	205,243	99,126	-666,667		0,162	0,430
25	0,034	208,000	205,171	-243,216	-1000,000		0,173	0,447
26	0,035	212,667	204,757	-441,432	0,000		0,174	0,481
27	0,036	203,333	204,288	-219,216	0,000		0,219	0,490
28	0,038	198,667	204,099	-48,063	0,000		0,221	0,501
29	0,039	199,333	204,144	-90,108	1000,000	1,000	0,246	0,519
30	0,040	203,000	203,919	355,865	1000,000	1,000	0,247	0,533
31	0,041	208,667	204,856	765,766	0,000		0,264	0,555
32	0,043	209,333	206,216	762,775	0,000		0,266	0,572
33	0,044	205,667	207,144	563,081	-1000,000		0,282	0,609
34	0,045	206,333	207,342	-436,932	-1000,000		0,283	0,627
35	0,046	208,667	206,270	-858,829	0,000		0,296	0,668
36	0,048	208,000	204,766	-564,559	666,667	1,000	0,297	0,719
37	0,049	205,000	204,577	103,595	1000,000	1,000	0,340	0,731
38	0,050	198,667	204,973	270,284	0,000		0,341	0,755
39	0,051	197,667	205,117	195,198	0,000		0,351	0,773

distance à l'endroit  
de la déformation  
(sur un côté)

**traitement supplémentaire  
pour supprimer toutes les  
petites variations**

abscisses  
correspondant aux  
seules franges noires