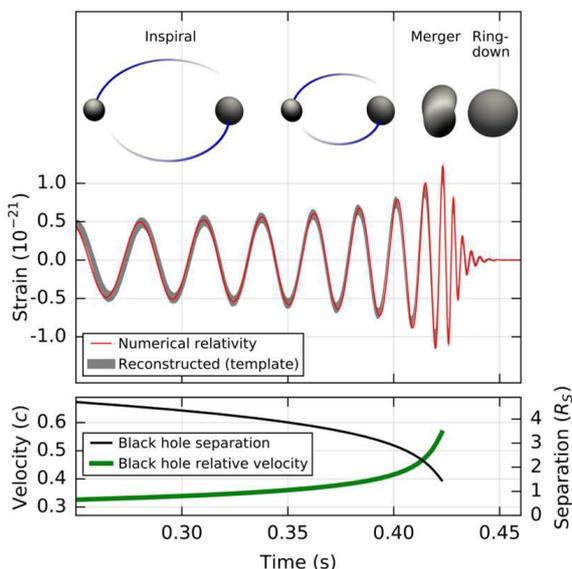


## 1 Détection des ondes gravitationnelles au Ligo

Le Ligo (Laser Interferometer Gravitational waves Observatory, *Observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser*) est une expérience de physique de très grande échelle ayant pour but de mesurer le passage d'ondes gravitationnelles. Ligo a mesuré au moins 3 passages d'ondes gravitationnelles différents, correspondant chacun à la fusion de deux trous noirs.



### 1A Propagation des ondes gravitationnelles

Les ondes gravitationnelles sont comme les ondes électromagnétiques des ondes qui peuvent se propager dans le vide interstellaire, et elles se propagent à  $c$  la vitesse de la lumière dans le vide. Le signal physique transporté est une déformation de l'espace-temps qui contracte ou dilate les longueurs au passage de l'onde. Le phénomène à l'origine de l'onde est la présence d'une grande masse qui se déplace (comme un bout de bois se déplaçant à la surface d'un lac ferait des vagues).

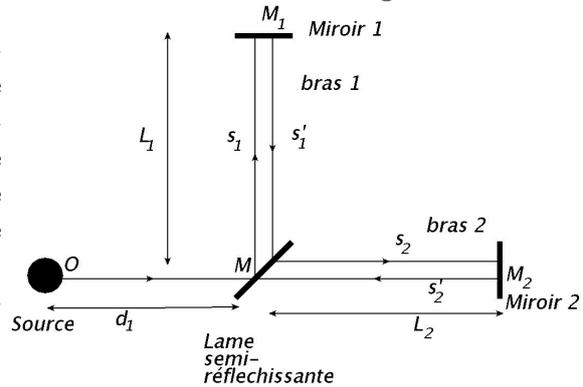
On va étudier ici quelques données recueillies lors de la première mesure réalisée GW150914 dont on peut observer certaines des données dans la figure ci-dessus.

- 1A. 1. Le Ligo est en réalité constitué de deux détecteurs séparés d'une distance  $d = (3000 \pm 5)$  km (un en Louisiane, l'autre dans l'état de Washington) afin de pouvoir éliminer tout bruit parasite local (passage de camion, léger tremblements de terre, etc). Quelle est l'écart temporel maximal entre la détection de l'onde à chaque détecteur ?
- 1A. 2. Le passage de l'onde a duré 0,2 s avec une incertitude relative de 50 %. Quelle est l'étalement spatial (la longueur) de la "vague" de l'onde gravitationnelle ?
- 1A. 3. A la fin du passage de l'onde, la fréquence mesurée était de 150 Hz. Quelle était alors la longueur d'onde correspondante ?
- 1A. 4. L'onde gravitationnelle amène avec elle une partie de l'énergie de masse des deux trous noirs. Les deux trous noirs avaient avant la collision une masse de 36 et 29 masses solaires ( $M_S = 2,0 \times 10^{30}$  kg) respectivement. L'énergie rayonnée par l'onde gravitationnelle a été estimée égale à  $E = 5,4 \times 10^{47}$  J.
  - 1A. 4. a. Trouvez par analyse dimensionnelle à quelle masse correspond l'énergie rayonnée par l'onde gravitationnelle (la masse dépend de l'énergie et de  $c$ ).
  - 1A. 4. b. Quelle est la masse (en nombre de masses solaires) du trou noir résultant après la fusion ?

### 1B Détection des ondes

A chaque détecteur du Ligo, on trouve un interféromètre de Michelson de grande taille.

Un interféromètre de Michelson est constitué d'une source lumineuses qui envoie une onde électromagnétique sur une lame semi-réfléchissante. La moitié de l'amplitude de l'onde va dans un bras de l'interféromètre et l'autre moitié dans l'autre. Au bout de chaque bras, un miroir renvoie chaque onde, et elles se recombinent sur la lame semi-réfléchissante qu'elles traversent.



On suppose que l'onde émise par la source s'écrit sous la forme  $s(O, t) = A \cos(\omega t)$ , et que la distance entre la source et la lame est  $d_1$ .

- 1B. 1. Ecrire la formule donnant l'onde à l'arrivée sur la lame semi-réfléchissante  $s(M, t)$ .
- 1B. 2. On suppose maintenant que l'onde se sépare en deux dans chaque bras  $s_1(M, t)$  dans le bras 1 et  $s_2(M, t)$  dans le bras 2 avec  $s_1(M, t) = s_2(M, t) = \frac{s(M, t)}{2}$ . Si on appelle  $L_1$  la longueur du bras 1,  $L_2$  la longueur du bras 2 et  $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$  la longueur d'onde de l'onde électromagnétique, montrez que l'onde à son arrivée sur chaque miroir  $s_1(M_1, t)$  et  $s_2(M_2, t)$  peut s'écrire comme :

$$s_1(M_1, t) = \frac{A}{2} \cos\left(\omega t - 2\pi \frac{d_1 + L_1}{\lambda}\right) \quad \text{et} \quad s_2(M_2, t) = \frac{A}{2} \cos\left(\omega t - 2\pi \frac{d_1 + L_2}{\lambda}\right).$$

- 1B. 3. On admet que lors de la réflexion chaque onde prend un déphasage supplémentaire de  $\pi$  avant de revenir vers la lame semi-réfléchissante :

$$s'_1(M_1, t) = \frac{A}{2} \cos\left(\omega t - 2\pi \frac{d_1 + L_1}{\lambda} + \pi\right) \quad \text{et} \quad s'_2(M_2, t) = \frac{A}{2} \cos\left(\omega t - 2\pi \frac{d_1 + L_2}{\lambda} + \pi\right).$$

Quelle vaut le signal de chaque onde au niveau de la lame-semi-réfléchissante  $M$  après le retour  $s'_1(M, t)$  et  $s'_2(M, t)$  ?

- 1B. 4. Montrez que l'amplitude totale  $A_{tot}$  de l'onde sur la lame  $s'(M, t) = s'_1(M, t) + s'_2(M, t)$  se calcule par la formule :

$$A_{tot} = A \sqrt{\frac{1 + \cos\left(\frac{4\pi(L_2 - L_1)}{\lambda}\right)}{2}}$$

- 1B. 5. On suppose qu'avant le passage de l'onde  $L_1 = L_2$ . Quelle est alors l'amplitude de l'onde  $s'(M, t)$  ? Comment qualifier de telles interférences ?
- 1B. 6. Au passage de l'onde, on va supposer que  $L_1$  change en  $L'_1 = L_1 + \delta$  alors que  $L_2$  ne change pas. Que se passe t'il pour l'amplitude totale  $s'(M, t)$  ?
- 1B. 7. Quelle doit être la valeur minimale de  $\delta$  pour obtenir des interférences destructives ?
- 1B. 8. On peut voir sur les données que la déformation maximale est  $h = 10^{-21}$ . Il se trouve que  $h = \frac{\delta}{L_1}$ , et  $L_1 = 4\,000$  m au Ligo. Quelle est la valeur de  $\delta$  que les scientifiques ont mesurée ? Que pensez-vous de cette valeur ?

Formulaire de trigonométrie :

$$2 \cos a \cos b = \cos(a + b) + \cos(a - b)$$

$$\cos(a + b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b.$$

$$\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$$

## 2 L'"hologramme" de M. Mélenchon

Pendant la campagne présidentielle française de 2017, le candidat représentant de la France Insoumise, Jean-Luc Mélenchon a utilisé une nouvelle technique de présentation de meeting, à la fois pour tenir réunion dans plusieurs endroits en même temps, tout en s'assurant une part non négligeable d'exposition médiatique. A cet effet, il a réutilisé une technique centenaire appelée le *fantôme de Pepper* du nom du chimiste anglais qui a popularisé cette illusion d'optique.

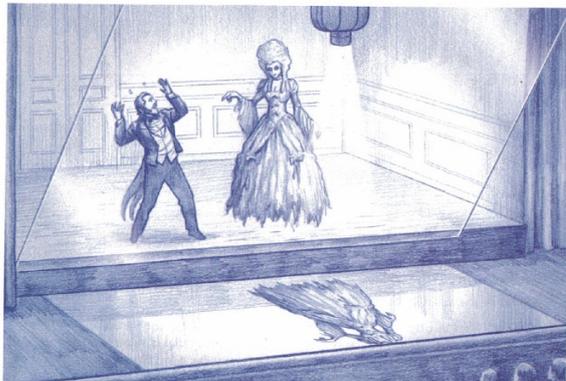


Image tirée de *Pour la Science* n° 474

Cette illusion d'optique consiste à projeter une image sur un premier miroir posé au sol, et à utiliser la réflexion de cette image sur un écran transparent incliné afin de faire croire à la présence de cette image en un endroit où elle n'est pas. C'est cette illusion qui est utilisée dans les affichages "tête haute" de voiture ou d'avions de chasse, ou dans la cas qui nous intéresse ici pour créer ce que la presse a abusivement nommé "hologramme".

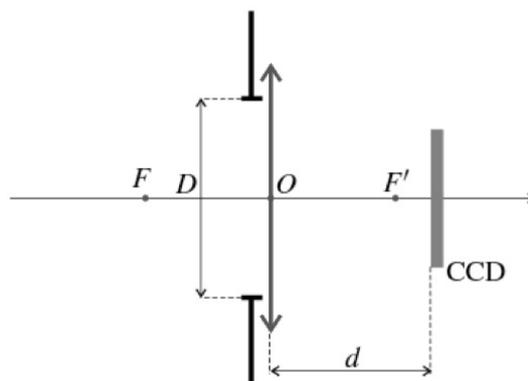
Nous étudierons dans ce sujet les deux étapes concernées lors du meeting de M. Mélenchon, à savoir la prise d'image à Lyon, et la projection du fantôme de Pepper à Paris.

### 2A La prise d'image

On assimilera dans cette partie la caméra qui a servi à la prise d'image à un appareil photographique. On rappelle les formules de conjugaison de Descartes pour deux points conjugués A et A' sur l'axe optique :

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'} \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{OA'}{OA}.$$

On schématisera donc la caméra par un diaphragme contrôlant la quantité de lumière entrant dans le camescope, une lentille mince convergente de longueur focale variable, et un capteur photosensible placé à une distance variable de la lentille.

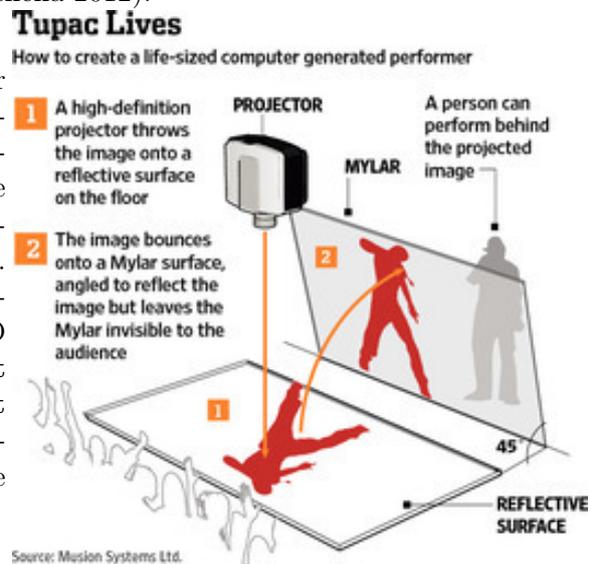


- 2A. 1. La caméra qui a servi à la prise d'image de M. Mélenchon (dont la taille est de 1,74 m) était située à une distance de 20 m de la scène. L'image du candidat sur le capteur était inversée, et sa taille était 17 mm. Quel est le grandissement transverse de l'image? Vous dessinerez un schéma (pas à l'échelle) qui précisera les notations utilisées.
- 2A. 2. En déduire la longueur focale de cette lentille.
- 2A. 3. Comment pouvez-vous expliquer en termes physiques la position de l'écran? Où semble alors situé le candidat pour la lentille mince?

## 2B Le fantôme de Pepper

La technique, développée au 16ème siècle et popularisée au 19ème a été remise au goût du jour d'abord par des artistes américains (par exemple pour faire croire à l'apparition du rappeur décédé Tupac au concert de Snoop Dogg à Coachella 2012).

On utilise un projecteur vidéo pour obtenir une image sur un miroir posé au sol, invisible du public. Un film plastique (en Mylar) transparent et incliné agit alors comme un miroir et donne alors une image verticale de ce qui a été projeté à l'horizontale. Un vidéoprojecteur est schématiquement l'inverse d'une caméra : un panneau de LED émet de la lumière avec l'image voulue : **c'est ce que l'on considèrera comme objet dans cette partie**. Les rayons lumineux issus de cet objet traversent ensuite une lentille convergente pour former l'image de l'objet.



On s'intéresse ici uniquement à la partie de projection de l'image sur le sol.

- 2B. 1. Si on suppose que l'image de M. Mélenchon sur le panneau de LED est de la même taille que celle captée par le capteur CCD de la caméra (donc 17 mm), que doit valoir le grandissement transverse de la lentille de projection ?
- 2B. 2. La lentille de projection est situé à 5 m au-dessus du sol, quelle est alors la position du panneau de LED par rapport à la lentille de projection ?
- 2B. 3. Quelle est la longueur focale de la lentille de projection ? Faites un commentaire en comparant les deux dernières valeurs trouvées.
- 2B. 4. A quel instrument d'optique que vous connaissez peut-on alors assimiler l'ensemble (caméra+vidéoprojecteur) ?

On considère maintenant l'illusion d'optique en entier. Pour des raisons de simplification, au lieu de considérer un vidéoprojecteur qui depuis le haut fait une image sur un miroir horizontal, on va prendre un modèle équivalent où le vidéoprojecteur envoie la lumière depuis le bas et sans le miroir horizontal.

- 2B. 5. Sur le schéma (pas à l'échelle) en annexe, dessinez le chemin suivi par les deux rayons passant par  $A'$  dont on a représenté une partie, depuis le panneau de LED jusqu'à la salle de spectacle (le film de Mylar agit comme un miroir plan). Où se situe le point  $A$  dont  $A'$  est l'image par la lentille de projection ?
- 2B. 6. Où se situe  $A''$ , l'image de  $A$  par le système complet (lentille de projection + miroir incliné) ?
- 2B. 7.  $A''$  est-il une image virtuelle ou réelle ?
- 2B. 8. Ce système est aussi celui qui est utilisé par les afficheurs tête haute (voir Fig. 1) dans les avions de chasse qui permettent d'afficher les informations utiles au pilote directement dans son champ de vision.

Pour l'œil humain, il est très aisé de viser rapidement des directions différentes en utilisant les muscles oculaires, mais l'accommodation est plus lente. Expliquez brièvement l'intérêt des afficheurs tête haute et où doit se former l'image  $A''$  dans ce cas.



FIGURE 1 – Affichage tête haute d’un bombardier CRJ900

2B. 9. Le vidéoprojecteur est dans cette question assimilée à un projecteur de 500 W qui émet de la lumière uniquement à 500 nm. Combien de photons ce projecteur émet-il par seconde ?

### 3 Choix d’un éclairage LED

Les lampes à incandescence (ampoules à filaments) ne sont maintenant plus autorisées à la vente en raison de leur faible efficacité. Il est donc nécessaire de les remplacer par des lampes fluo-compactes ou des diodes électroluminescentes (LED en anglais).

Nous allons nous intéresser dans cet exercice à plusieurs caractéristiques des LED afin de choisir au mieux celles dont on a besoin en fonction de l’usage désiré.

#### 3.1 Caractéristiques des LED

Voici un aperçu d’une fiche technique concernant une ampoule à LED. Nous allons étudier en détail certaines de ces caractéristiques

Marque	Lighting EVER®
Poids de l'article	132 g
Dimensions du produit (L x l x h)	5,5 x 5,5 x 10,5 cm
Référence	100005
Poids	130 grammes
Forme	Ampoules
Usages spécifiques	Usage intérieur uniquement
Fonctions	Résistant aux chocs et vibrations, Sans variateur
Type d'ampoule	LED
Type de culot	E26
Étiquette énergie	A
Flux lumineux	340 lm
Puissance	6 Watts
Équivalence lampes à incandescence	50 Watts
Température/Rendu des couleur	3000 Kelvin
Indice de rendu de couleur (IRC)	80.00
Durée de vie moyenne	30000 heures
Durée de vie moyenne	30000 heures
Diamètre de l'ampoule	60 millimètres
Longueur	129 millimètres

— Flux lumineux ( $\phi$ ) : c’est une mesure de la puissance lumineuses émise par la lampe. Elle est comptée en *lumen* au lieu des watt utilisés dans le SI. Le lumen est une unité

subjective qui prend en compte le fait que l'œil n'est pas sensible de la même manière à toutes les longueurs d'onde (on voit mieux le vert que le violet) ;

- Efficacité énergétique : c'est le rapport entre la puissance lumineuse émise par la lampe en lumen  $\phi$  par la puissance électrique qu'elle consomme  $P$  :  $\eta = \frac{\phi}{P}$  ;
- indice de rendu des couleurs (IRC) : cet indice va de 0 à 100 et caractérise la facilité que l'on a à distinguer différentes nuances de couleurs éclairées par la lampe. Si l'IRC vaut 0 on ne distingue pas les couleurs, si il est de 100 on les distingue nettement ;
- température de couleur : lorsqu'on chauffe un corps, il émet une lumière dont la longueur d'onde dépend de la température. Plus le corps est chaud, plus la longueur d'onde diminue, et passe donc du rouge au jaune puis au bleu dans le visible. La température de couleur est la température à laquelle on devrait porter un corps pur qu'il émette une lumière similaire à celle de l'ampoule LED.

Voici pour comparer des valeurs typiques pour différents types de lampe :

Lampe	Incandescence	Fluocompacte	Sodium	LED	Lampe à décharge
Efficacité max (lm/W)	15	90	200	120	100
IRC	100	60 - 98	0	60 - 98	80 - 95

### 3.2 Analyse de cette ampoule

3. 1. Quelle est l'efficacité énergétique de l'ampoule LED présentée ? Et celle d'une ampoule à incandescence qui serait équivalente ? Quel est l'intérêt des LED ?
3. 2. A votre avis, quelle serait le flux lumineux en lumen d'un laser émettant à la longueur d'onde de 340 nm ?

### 3.3 Choix d'une ampoule LED

On dispose des fiches techniques des 6 ampoules LED suivantes :

Ampoule	1	2	3	4	5	6
Puissance consommée (W)	6	2	6	4,5	3	5
Flux lumineux (lumen)	340	115	500	400	200	220
Température de couleur (K)	3 000	2 800	6 500	4 500	4 000	3 000
IRC	80	70	80	90	75	85
Durée de vie	30 000	10 000	20 000	60 000	35 000	10 000

3. 1. Avec quelle ampoule LED feriez-vous le plus d'économie d'énergie ?
3. 2. En justifiant votre réponse, dites quelle ampoule utiliseriez-vous pour :
  3. 2. a. un salon de thé à l'ambiance feutrée ?
  3. 2. b. le rayon peinture d'un magasin de bricolage ?
  3. 2. c. l'éclairage du pont d'un voilier pour le vendée globe ?
  3. 2. d. pour un bloc opératoire ?

PHYSIQUE-CHIMIE : DM 6 FEUILLE RÉPONSE

NOM :  
PRÉNOM :

