

Chapitre 4 : Quelles sont les propriétés des ondes progressives ?

I. La diffraction.

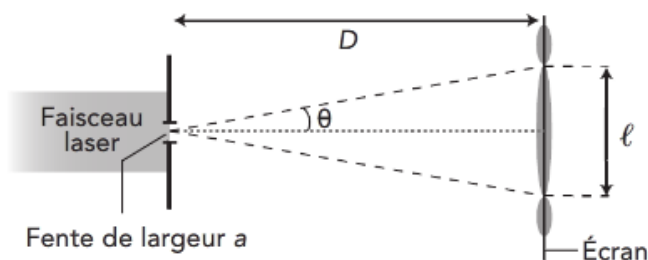
- Savoir que l'importance du phénomène de diffraction est liée au rapport de la longueur d'onde aux dimensions de l'ouverture ou de l'obstacle.
- Identifier les situations physiques où il est pertinent de prendre en compte le phénomène de diffraction.
- Connaître et exploiter la relation $\theta \approx \lambda/a$.

18 Détermination expérimentale d'une longueur d'onde

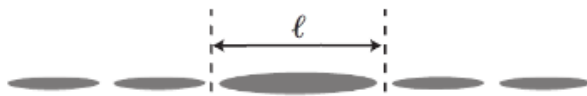


COMPÉTENCES Construire et exploiter un graphique.

Lors d'une séance expérimentale, des élèves ont placé un laser émettant une lumière de longueur d'onde λ devant une fente de largeur a .



Ils observent la figure suivante, constituée de taches lumineuses, sur un écran placé à la distance $D = 1,50$ m de la fente.



Ils modifient alors la largeur a de la fente et mesurent la largeur ℓ de la tache centrale observée.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

a (μm)	100	120	200	250	300	340
ℓ (mm)	19	16	10	7,5	6,5	5,5

1. Comment se nomme le phénomène observé ?
2. a. Construire la représentation graphique de ℓ en fonction de $\frac{1}{a}$.
b. Quelle relation peut-on écrire entre ces deux grandeurs ? Justifier la réponse.
3. a. Rappeler l'expression du demi-angle de diffraction θ du faisceau diffracté en fonction de λ et a .
b. L'angle θ étant petit et exprimé en radian, on peut écrire $\tan \theta \approx \theta$. À l'aide du schéma, montrer que :

$$\frac{\lambda}{a} = \frac{\ell}{2D}$$

- c. À partir des résultats précédents, déterminer la longueur d'onde de la lumière du laser utilisé.

33 Baccalauréat Diffraction par un fil

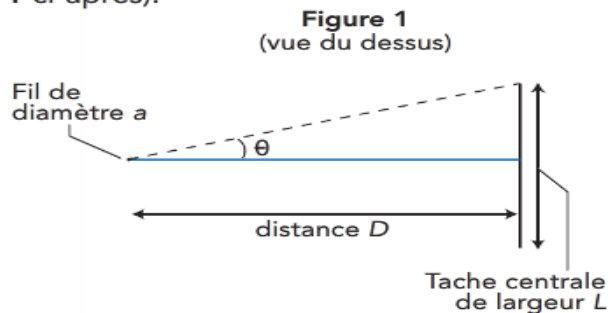
COMPÉTENCES Exploiter un graphique ; raisonner ; argumenter.

On réalise une expérience de diffraction à l'aide d'un laser émettant une lumière monochromatique de longueur d'onde λ .

À quelques centimètres du laser, on place successivement des fils verticaux de diamètres a connus.

La figure de diffraction obtenue est observée sur un écran blanc situé à une distance $D = 1,60$ m des fils. Pour chacun des fils, on mesure la largeur L de la tache centrale.

À partir de ces mesures et des données, il est possible de calculer l'écart angulaire θ du faisceau diffracté (voir **figure 1** ci-après).

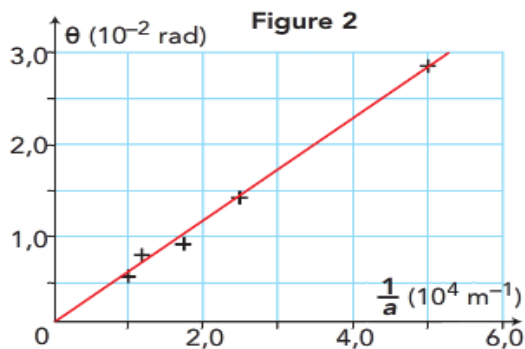


1. L'angle θ étant petit, on a la relation $\tan \theta \approx \theta$, avec θ en radian.

Donner la relation entre L et D qui a permis de calculer θ pour chacun des fils.

2. Donner la relation liant θ , λ et a . Préciser les unités.

3. On trace la courbe $\theta = f\left(\frac{1}{a}\right)$ (**figure 2**) :



Montrer que la courbe obtenue est en accord avec l'expression de θ donnée à la question 2.

4. Comment, à partir de la courbe précédente, pourrait-on déterminer la valeur de la longueur d'onde λ de la lumière monochromatique utilisée ?

5. En utilisant la **figure 2**, préciser parmi les valeurs de longueurs d'onde proposées ci-dessous quelle est celle de la lumière utilisée :

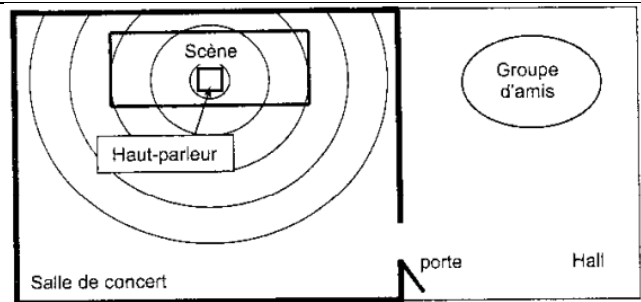
560 cm ; 560 mm ; 560 μm ; 560 nm.

6. Si l'on envisageait de réaliser la même étude expérimentale en utilisant une lumière blanche, on observerait des franges irisées.

En utilisant la réponse donnée à la question 2, justifier succinctement l'aspect « irisé » de la figure observée.

EXERCICE A1. EN CONCERT.

Lors d'un concert en salle donné par la musique municipale, des amis arrivés un peu retard s'étonnent d'entendre de la musique alors qu'ils sont encore dans le hall et donc séparés de la scène par un mur très bien isolé phoniquement. Ils remarquent cependant que la porte, d'une largeur de 1,00 m, est ouverte. La situation est représentée sur le schéma ci-contre.



1. Quel phénomène physique permet d'expliquer l'observation faite par les amis ?
2. Les amis ont-ils entendu préférentiellement dans le hall des sons graves ($f = 100 \text{ Hz}$) ou des sons très aigus ($f = 10000 \text{ Hz}$) ? Justifier la réponse en calculant les longueurs d'onde correspondantes.

EXERCICE A2. LUMIERE !

Cet exercice décrit deux expériences utilisant une lumière de couleur rouge, émise par un laser, de longueur d'onde dans le vide $\lambda = 633 \text{ nm}$.

1. Calculer la valeur de la fréquence ν de la radiation utilisée.

On place perpendiculairement au faisceau lumineux et à quelques centimètres du laser, une fente fine et horizontale de largeur a . Un écran situé à une distance D de la fente, montre des taches lumineuses réparties sur une ligne verticale. La tache centrale plus lumineuse que les autres, est la plus large.

L'angle θ (de la figure 1) est donné par la relation : $\theta = \frac{\lambda}{a}$

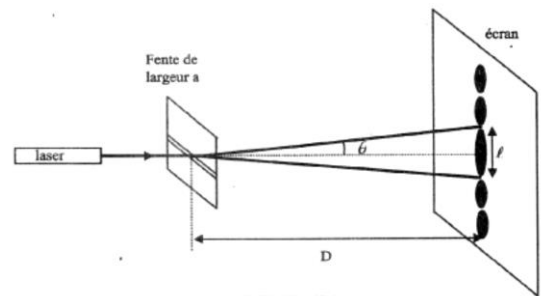


FIGURE N° 1

2. Exprimer θ en fonction de la largeur ℓ de la tache centrale et de la distance D . L'angle θ étant faible, on pourra utiliser l'approximation $\tan \theta \approx \theta$.
3. En utilisant les relations, montrer que la largeur a de la fente s'exprime par la relation : $a = \frac{2 \cdot \lambda \cdot D}{\ell}$.
4. Calculer a .
On donne : $\ell = 38 \text{ mm}$ et $D = 3,00 \text{ m}$.
5. Indiquer comment varie L si on remplace le laser par un laser de lumière bleue.



II. Les interférences.

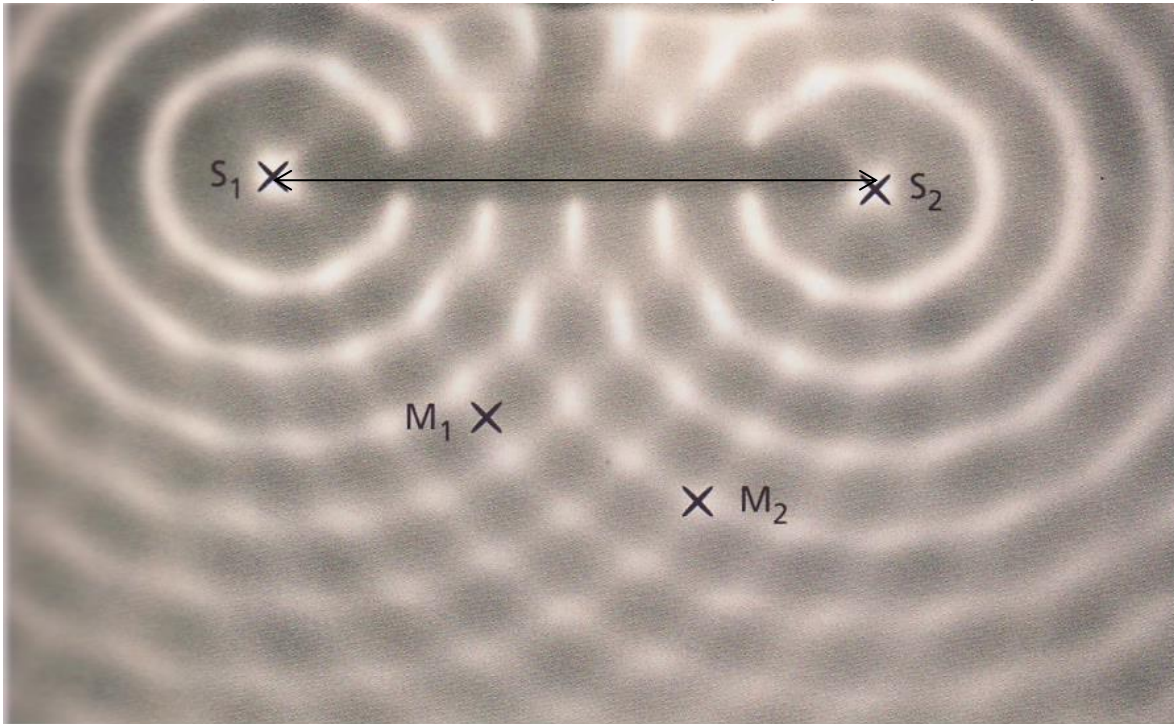
- Connaître et exploiter les conditions d'interférences constructives et destructives pour des ondes monochromatiques.
- Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier quantitativement le phénomène d'interférence dans le cas des ondes lumineuses

1. Exemples de phénomène d'interférence.

2. Interférence et différence de marche.

Activité 1 chapitre 4 : Etude de l'amplitude de 2 vagues.

Dans une cuve à ondes, deux sources synchrones S_1 et S_2 créent des ondes progressives périodiques à la surface de l'eau (échelle réelle). Il en résulte une onde dont l'amplitude varie dans l'espace.



Document 1 : interférence constructive.

Lorsque les deux ondes arrivent en M en phase, l'amplitude de la résultante est alors maximale en M: il y a **interférence constructive**.

Lorsque les deux ondes arrivent en M en opposition de phase, l'amplitude de la résultante est alors minimale en M: il y a **interférence destructive**.

On appelle différence de marche δ en un point M la différence de distance parcourue par les 2 ondes pour arriver en M : $\delta = d_2 - d_1 = |S_2M - S_1M|$

Les interférences sont constructives si $\delta = k \times \lambda$

Les interférences sont destructives si $\delta = (k + 1/2) \times \lambda$

Questions.

1. Mesurer la longueur d'onde des deux ondes créées par S_1 et S_2 .
2. Déterminer si le point M_1 est en phase ou en opposition de phase avec chaque source.
3. Déterminer si en M_1 les interférences sont constructives, destructives ou quelconques.
4. Faire de même pour le point M_2 .

8 Double haut-parleur

Deux haut-parleurs identiques sont placés face à face, distants de $d = 120 \text{ cm}$. Ils émettent le même son, de même fréquence $f = 1\,600 \text{ Hz}$ et de même amplitude, et vibrent en phase. La célérité des ondes sonores dans l'air est $v = 336 \text{ m.s}^{-1}$.

- Déterminer la longueur d'onde λ du son émis.
- Un micro est déplacé sur l'axe reliant les haut-parleurs. Le son capté est visualisé : son amplitude dépend de la position du micro. À quelle condition les interférences sont-elles constructives ? destructives ?
- Le micro est placé à 39 cm d'un haut-parleur. L'amplitude du son reçu est-elle maximale, minimale ou quelconque ?

9 Vaguelettes

Deux sources synchrones ponctuelles, S_1 et S_2 de fréquence $f = 100 \text{ Hz}$, produisent des interférences à la surface d'un liquide. La distance S_1S_2 est $d = 21 \text{ cm}$. La célérité des ondes est $c = 3,0 \text{ m.s}^{-1}$.

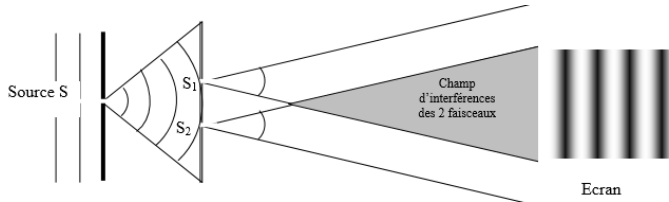
- Calculer la longueur d'onde de ces vaguelettes.
- Un point M est situé sur l'axe reliant S_1 et S_2 , entre S_1 et S_2 et à la distance x de S_1 . À l'aide d'un schéma, montrer que la différence de marche entre les deux ondes en M est $\delta = d - 2x$.
- À quelle condition l'amplitude des vibrations en M est-elle maximale ? Quel est le nombre de franges d'amplitude maximale entre S_1 et S_2 ?

3. Interférence lumineuse.

Activité 2 chapitre 4 : Interférence lumineuse.

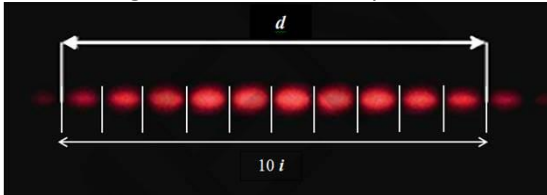
Document : interférence lumineuse.

Soit S une source ponctuelle monochromatique éclairant 2 fentes S1 et S2 proches l'une de l'autre, mais assez éloignées de S. S1 et S2 jouent le rôle de sources cohérentes, c'est à dire qu'elles sont dans le même état vibratoire.



S1 et S2 diffractent la lumière. Dans la région de l'espace où les 2 faisceaux se superposent, on peut observer des franges d'interférences non localisées.

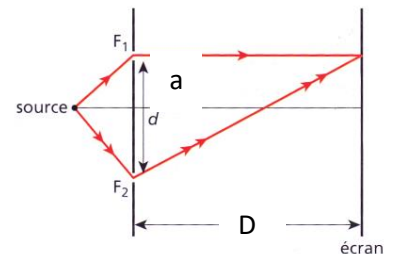
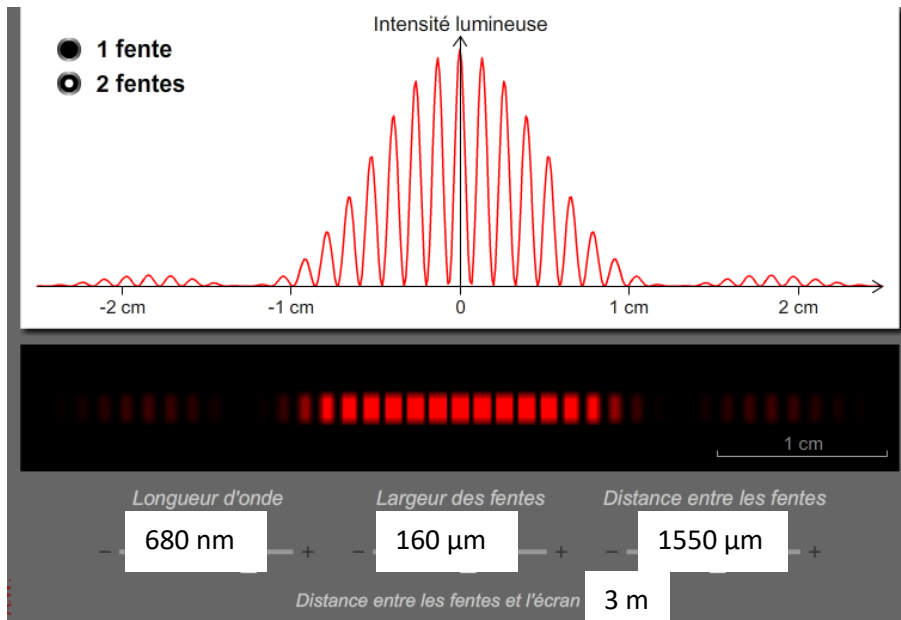
L'interfrange notée « i » correspond à la distance entre deux zones sombres.



Situation expérimentale.

Une source monochromatique éclaire un écran percé de deux fentes fines identiques F1 et F2 qui diffractent la lumière et constituent des sources ponctuelles synchrones.

Un écran placé derrière les fentes fait apparaître une ligne brillante et sombre.



1. Calculer avec le plus précision la valeur de l'interfrange.
2. Parmi les formules proposées, choisir celle qui convient en justifiant par un calcul :

$$i = D + \frac{\lambda}{a} \quad i = \frac{\lambda^2 \times D}{a^2} \quad i = \frac{\lambda \times D}{a}$$

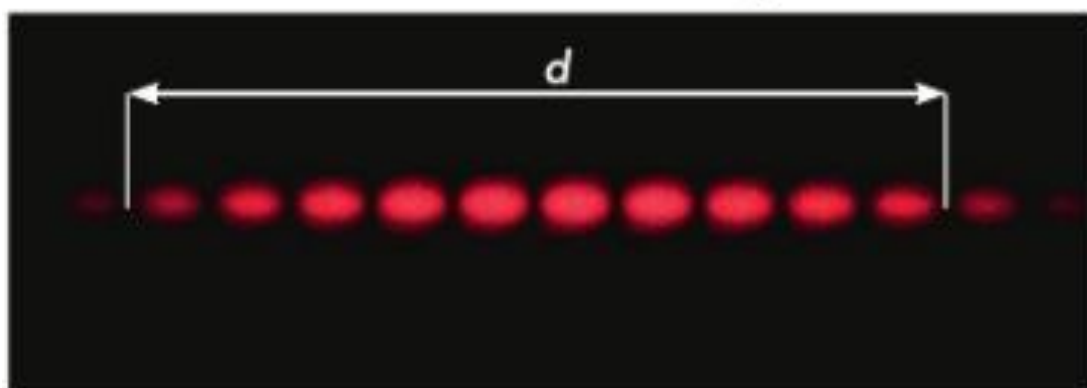
24 Calcul d'une longueur d'onde



COMPÉTENCES Raisonner ; argumenter.

Deux fentes étroites et parallèles, séparées par une distance $b = 0,20$ mm, sont éclairées par un faisceau de lumière monochromatique de longueur d'onde λ dans le vide. On observe sur un écran, placé à la distance $D = 1,00$ m du plan de ces fentes, une alternance de franges brillantes et sombres. La distance séparant les milieux de deux franges brillantes (ou sombres) consécutives est appelée « interfrange » et notée i .

1. Afin de déterminer l'interfrange, on mesure la distance d comme indiqué sur le schéma ci-dessous. On obtient $d = 30$ mm. Calculer l'interfrange i .



2. a. Par une analyse dimensionnelle (voir fiche n° 5, p. 588), déterminer l'expression qui permet de calculer l'interfrange i parmi les propositions suivantes :

$$(A) i = \lambda \cdot D^2 ; \quad (B) i = \frac{\lambda \cdot D}{b} ; \quad (C) i = \frac{\lambda \cdot b}{D^2}.$$

b. En déduire la longueur d'onde λ de la lumière.

3. Pourquoi a-t-on mesuré plusieurs interfranges ?

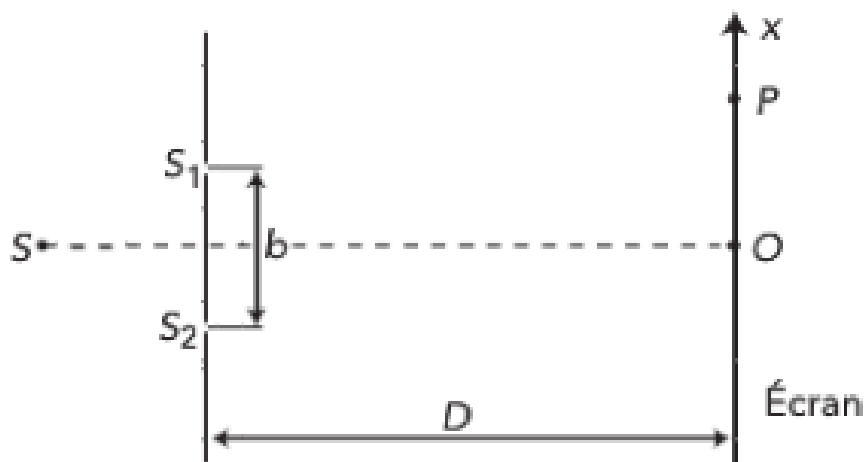
23 Différence de marche

COMPÉTENCE Calculer.

On réalise le montage suivant dans lequel S est une source de lumière monochromatique de longueur d'onde dans le vide $\lambda = 488 \text{ nm}$. Cette source éclaire deux fentes étroites S_1 et S_2 , séparées par une distance $b = 0,20 \text{ mm}$. On a $SS_1 = SS_2$.

On observe la figure obtenue sur un écran situé à $D = 1,00 \text{ m}$ du plan de ces fentes.

On considère sur l'écran un axe (Ox) , O se trouvant sur la médiatrice de $[S_1S_2]$. Pour un point P de cet axe d'abscisse x_P , la différence de marche entre les deux ondes provenant de S_1 et S_2 s'écrit : $\delta = \frac{b \cdot x}{D}$.



1. a. Quelle est la différence de marche en O ?
- b. Qu'observe-t-on sur l'écran en ce point?
2. a. Calculer la différence de marche au point P d'abscisse $x_P = 6,1 \text{ mm}$.
- b. Qu'observe-t-on sur l'écran en ce point?

23 Interférences en lumière polychromatique

Deux fentes fines verticales parallèles, distantes de a , constituent deux sources de lumière monochromatique synchrones.

Des interférences sont observées sur un écran parallèle au plan contenant les fentes, et situé à une distance D de ce plan.

a. Décrire ce qui est observé sur l'écran.

Pourquoi les fentes doivent-elles être très fines ?

b. La longueur d'onde utilisée est $\lambda = 510 \text{ nm}$.

Calculer l'interfrange $i = \frac{\lambda D}{a}$ si $a = 1,0 \text{ mm}$ et $D = 1,5 \text{ m}$.

c. La lumière émise par les sources est maintenant constituée de deux longueurs d'onde, $\lambda_1 = 420 \text{ nm}$ (violet) et $\lambda_2 = 630 \text{ nm}$ (rouge).

Deux systèmes de franges sont ainsi observés sur l'écran : les franges violettes et rouges sont-elles séparées de la même distance ?

III. Une utilisation pratique des ondes : l'effet Doppler

- Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mesurer une vitesse en utilisant l'effet Doppler.
- Exploiter l'expression du décalage Doppler de la fréquence dans le cas des faibles vitesses.
- Utiliser des données spectrales et un logiciel de traitement d'images pour illustrer l'utilisation de l'effet Doppler comme moyen d'investigation en astrophysique.

1. Qu'est-ce que l'effet Doppler ?

Lorsqu'une ambulance se rapproche puis s'éloigne, le son perçu est modifié, passant de l'aigu au grave. Ces modifications de la fréquence perçue, lorsque l'émetteur est en mouvement par rapport au récepteur, furent expliquées par Christian DOPPLER au XIX^e siècle. **Qu'est-ce que l'effet Doppler ?**

1 À quelle grandeur spatiale C. DOPPLER fait-il référence lorsqu'il dit à propos des sons : « Plus cette longueur λ est petite plus le son est aigu. » ?

2 a. Quelle est la relation entre cette grandeur, la fréquence du son et la valeur de la vitesse du son dans l'air ?
b. Que peut-on dire de la fréquence d'un son aigu par rapport à celle d'un son grave ?
c. Montrer que si la « distance entre les ondulations » du son dans l'air diminue, alors le son devient plus aigu.

3 On considère que les ondes à la surface de l'eau sont périodiques et sinusoïdales. Schématiser l'élongation du niveau de l'eau en fonction du temps pour :
a. la grenouille immobile ;
b. le cygne se déplaçant vers la source.

Un pas vers le cours...

4 Définir l'effet Doppler et l'illustrer par quelques exemples tirés de la vie courante.

26 Expérience historique

COMPÉTENCES Rechercher l'information utile ; effectuer un calcul.

Afin de vérifier la théorie de C. DOPPLER, le scientifique C. BUYS-BALLOT a réalisé l'expérience suivante :
Des musiciens à bord d'un train jouent un « La » de fréquence f_E . D'autres musiciens postés le long de la voie ferrée identifient la note entendue lors de l'approche du train, comme le montre le document ci-dessous :



Donnée : tableau de fréquences de notes de musique :

Note	Fa	Fa [#]	Sol	La ^b	La	La [#]	Si
f (Hz)	349	370	392	415	440	466	494

La vitesse du son dans l'air est $V_S = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

1. a. Quel est le phénomène à l'origine du décalage des fréquences entre l'onde émise et l'onde perçue ?

b. Quelle est la fréquence de la note f_R entendue par les musiciens situés au bord de la voie ferrée ?

2. La relation permettant de calculer la vitesse V_E d'un émetteur sonore s'approchant d'un observateur immobile est :

$$V_E = V_S \cdot \left(1 - \frac{f_E}{f_R}\right)$$

Calculer la valeur de la vitesse de déplacement du train.

2. Utilisation de l'effet Doppler pour mesurer une vitesse.

21 Contrôle de vitesse

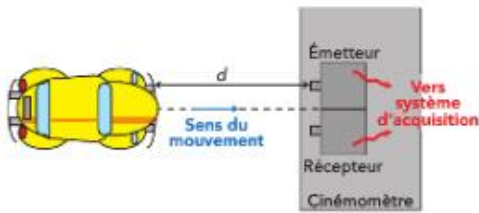
COMPÉTENCE Interpréter un résultat.



Le cinémomètre Mesta 208® est utilisé afin de contrôler par effet Doppler la valeur de la vitesse instantanée des véhicules automobiles.

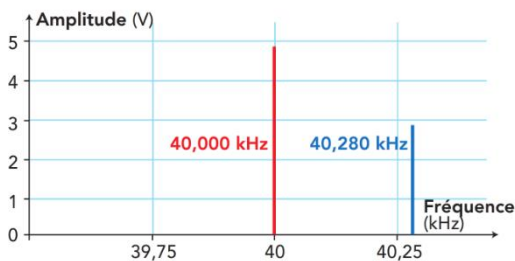
Un élève cherche à modéliser le principe de la mesure. Il dispose d'un émetteur et d'un récepteur d'ondes ultrasonores, ainsi que d'un véhicule jouet pouvant se déplacer à vitesse constante.

La situation est représentée sur le document ci-dessous. Le cinémomètre Mesta 208® mesure la vitesse instantanée des véhicules automobiles. Il fonctionne par application de l'effet Doppler dans le domaine des ondes électromagnétiques (micro-ondes).



- Quelle est la différence entre le principe de fonctionnement du cinémomètre et l'expérience historique de BUYS-BALLOT réalisée en 1845 (voir exercice 26, p. 81) ?
- Quelle propriété des ondes vue en Seconde cette expérience utilise-t-elle ?
- Déterminer, à partir du schéma, si la mesure de la vitesse est faite lorsque le véhicule s'approche ou s'éloigne du cinémomètre.
- On note f_E la fréquence de l'onde émise et f_R celle de l'onde reçue par le récepteur. Lors d'un tel mouvement, f_E est-elle supérieure ou inférieure à f_R ?

2. On réalise l'acquisition informatisée des signaux émis et reçus. Le logiciel permet de repérer les fréquences de chacun des signaux.



Déterminer f_E et f_R .

3. La célérité des ondes ultrasonores V_S est égale à $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. On propose trois relations permettant de calculer la valeur de la vitesse V du véhicule, mesurée par rapport au sol et telle que $V \ll V_S$.

a. Déterminer la relation correcte à partir d'une analyse dimensionnelle (voir fiche n° 5, p. 588) et de la situation illustrée par le document.

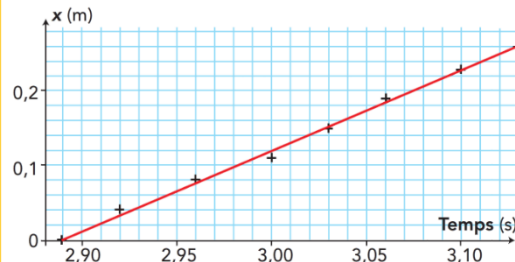
$$(A) f_E = f_R \cdot \left(2V - \frac{V}{V_S} \right); \quad (B) f_R = V \cdot \left(f_E - \frac{2V}{V_S} \right);$$

$$(C) f_E = f_R \cdot \left(1 - \frac{2V}{V_S} \right); \quad (D) f_E = f_R \cdot \left(\frac{2V}{V_S} + 1 \right).$$

b. D'où vient le nombre 2 dans l'expression de la vitesse ? On pourra s'aider d'un schéma.

c. Calculer la valeur de la vitesse V du véhicule.

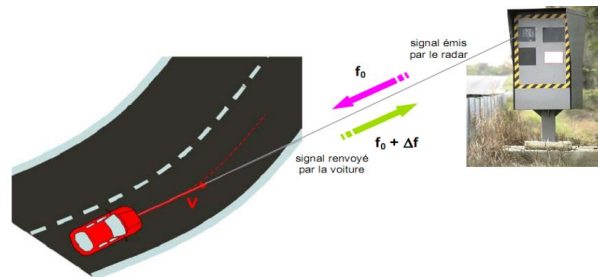
4. Le déplacement du véhicule a été filmé, pour obtenir puis représenter sa position x en fonction du temps.



a. Déterminer graphiquement la vitesse $V_{\text{vidéo}}$ du véhicule obtenue à partir de la vidéo du mouvement.

b. Conclure en comparant les valeurs V et $V_{\text{vidéo}}$.

Activité sur la mesure de vitesse par effet Doppler.



L'onde se réfléchit alors sur la cible et revient vers l'émetteur avec une fréquence f légèrement différente f_0 :

$f = f_0 + \Delta f$ si la cible se rapproche de l'émetteur

$f = f_0 - \Delta f$ si la cible s'éloigne de l'émetteur

} avec $\Delta f = 2.v.f_0/c$

Conclusion : l'effet Doppler est lié à la vitesse v de la cible sur laquelle se réfléchit l'onde.

ACTIVITE 1 : - CHOIX DE LA FREQUENCE DE TRAVAIL f_0

Pour que la cible puisse être détectée, il faut que ses dimensions soient grandes devant la longueur d'onde λ du signal, ce qui nous donne deux familles de systèmes de radars :

- ceux qui travaillent avec des ultrasons (de 20 kHz à 10MHz selon l'application)
- ceux qui travaillent avec des ondes électromagnétiques dans les hyperfréquences (à 9,9 GHz en France)

Dans les trois cas pratiques suivants, calculer la longueur d'onde correspondant au signal :

	A-ultrasons	B-ultrasons	C-hyperfréquences
fréquence	$f_0 = 40 \text{ kHz}$	$f_0 = 2 \text{ MHz}$	$f_0 = 9,9 \text{ GHz}$
vitesse de propagation	$c \approx 340 \text{ m/s}$	$c \approx 340 \text{ m/s}$	$c = 300000 \text{ km/s}$
applications	alarmes, détection d'intrus	échographie médicale	mesure de vitesse de véhicules

Conclure sur l'adéquation entre la fréquence de travail f_0 et la taille de la cible.

ACTIVITE 2 : - EVALUATION DE LA FREQUENCE DOPPLER Δf

Pour chacun des 3 scénarios suivants, caractériser la variation de fréquence Δf liée au mouvement :

⇒ Situation A : la cible du détecteur d'intrus à ultrasons est une personne se déplaçant à 1 km/h

⇒ Situation B : la cible du détecteur est la surface du muscle cardiaque dont la position s'écrit :

$$x(t) = a.\cos(2.\pi.F.t) \text{ avec } a = 3 \text{ mm et } F = 1 \text{ Hz (60 battements/minute)}$$

⇒ Situation C : la cible du détecteur est une voiture roulant à la vitesse constante de 50 km/h

Dans quelle bande de fréquence tombe la variation de fréquence Δf due à l'effet Doppler ?

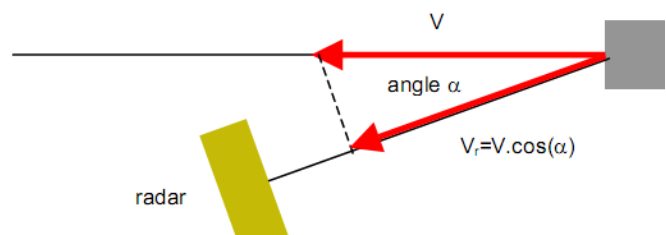
ACTIVITE 3 : - RADAR DE VITESSE

En réalité, la vitesse mesurée par un radar Doppler est la vitesse radiale V_r dans l'axe de l'émission, et pas la vitesse réelle V car le radar fait toujours un angle α avec la direction du mobile.

NB : pour les radars routiers, la procédure réglementaire d'utilisation des radars automatiques, fixes ou mobiles, impose un placement de ceux-ci à 25° par rapport à l'axe de la route.

Si on néglige l'influence de l'angle α , la vitesse est-elle surestimée ou sous-estimée ? Estimer en % l'erreur commise sur la vitesse.

Conclusion : à quoi doit veiller le gendarme lorsqu'il positionne son radar hyperfréquence au bord de la route?




EXERCICE : Utilisation d'un cinémomètre.

La mesure de vitesse intervient dans un très grand nombre de procédés technologiques dans des domaines très variés : industrie, médecine, sport, transport, aérospatiale, ...

Les dispositifs de mesure de vitesse sont généralement appelés cinémomètres. Les cinémomètres les plus courants peuvent être classés en deux catégories : les « cinémomètres Doppler » et les « cinémomètres laser ». Cet exercice s'intéresse à certains aspects du fonctionnement et de l'utilisation du cinémomètre Doppler.

Ce type d'appareil utilise une onde électromagnétique monochromatique. Il comprend essentiellement : un émetteur qui génère une onde de fréquence $f_0 = 24,125$ GHz, un récepteur qui reçoit cette onde après réflexion sur la " cible " et une chaîne de traitement électronique qui compare le signal émis et le signal reçu.

Si la " cible " visée a une vitesse non nulle par rapport au cinémomètre, l'appareil produit un signal périodique dont la fréquence, appelée « *fréquence Doppler* », est proportionnelle à la vitesse de la " cible ".

Données :

- Relation, en première approximation, entre la « fréquence Doppler » et la vitesse de la " cible " :

$$f_D = \frac{2 \cdot f_0 \cdot v_r}{c}$$

f_D : fréquence Doppler
 f_0 : fréquence de l'émetteur
 v_r : vitesse relative à la "cible" par rapport à l'émetteur
 c : vitesse de la lumière dans le vide

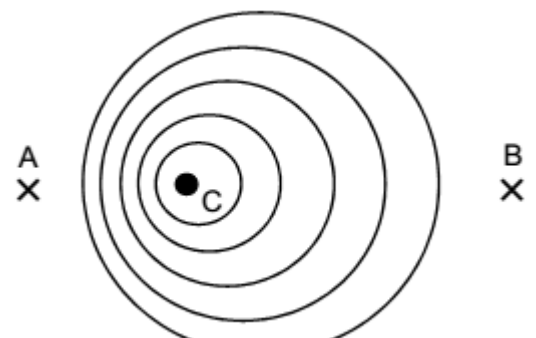
- Célérité des ondes électromagnétiques dans le vide ou dans l'air :
 $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

1. Les cinémomètres Doppler utilisent l'effet Doppler. Expliquer en quelques lignes en quoi consiste ce phénomène.

Un cinémomètre Doppler immobile est utilisé pour mesurer la vitesse d'une " cible " qui s'approche de lui. Les ondes électromagnétiques émises sont réfléchies par la " cible " avant de revenir au cinémomètre.

2. La figure ci-contre modélise de manière très simplifiée l'allure des ondes réfléchies par cette " cible ", notée C.

Déterminer, en explicitant le raisonnement suivi, si le cinémomètre Doppler est situé au point A ou au point B.



3. Un cinémomètre Doppler est utilisé pour mesurer la vitesse des balles de tennis lors des principaux tournois internationaux comme celui de Roland Garros. Au cours de ce tournoi, lors d'un service, l'appareil mesure une fréquence Doppler de valeur $f_D = 7416$ Hz.

3.1. Calculer la valeur de la vitesse de cette balle.

3.2. Ce résultat est-il cohérent avec celui affiché sur la photographie ci-dessous prise lors de ce service ?





3. L'effet Doppler en astronomie.

Bac S 2013 Polynésie EXERCICE II : EFFET DOPPLER ET ASTROPHYSIQUE (6 points)

L'effet Doppler constitue un moyen d'investigation utilisé en astrophysique. Il permet de déterminer la vitesse des astres à partir de l'analyse spectrale de la lumière que ceux-ci émettent.

Cet exercice s'intéresse à deux applications distinctes, à savoir le modèle d'Univers en expansion et la détection d'une étoile double « spectroscopique ».

Les parties 1 et 2 sont indépendantes.

Donnée : $1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm}$

1. Preuve de l'expansion de l'Univers

- 1.1. En utilisant le document 3, déterminer la longueur d'onde médiane du doublet de Ca^{2+} dans le spectre de la galaxie nommée : NGC 691.
Sachant que la longueur d'onde médiane λ_0 de ce doublet mesurée sur Terre pour une source au repos est de $5268 \text{ \AA}$, calculer le « redshift » z caractérisant le décalage vers le rouge de cette galaxie, défini dans le document 1.
- 1.2. Calculer la vitesse d'éloignement de la galaxie NGC 691 par rapport à la Terre.
- 1.3. À l'aide des documents 1 et 2, établir dans le cas non relativiste, la relation entre la vitesse d'éloignement V de la galaxie et sa distance d à la Terre, montrant que V est proportionnelle à d .
- 1.4. À partir des valeurs du nombre z données dans le document 2, montrer que l'expression utilisée pour calculer la vitesse d'éloignement des galaxies donnée dans le document 1 n'est pas applicable dans tous les cas.

2. Détection d'une étoile double « spectroscopique ».

On appelle « étoile double » un système stellaire composé de deux étoiles proches en orbite autour du même point (ce point étant le centre d'inertie G du système). Une étoile double « spectroscopique » est constituée de deux astres trop proches pour être séparés par un télescope optique et ne peut être détectée que par l'étude de son spectre à haute résolution. Le mouvement des deux étoiles provoque en effet un léger déplacement des raies d'absorption du spectre par effet Doppler.

Dans les questions suivantes, on suppose que les deux étoiles A et B décrivent des orbites circulaires de même rayon R , avec la même vitesse $V = V_A = V_B$.

La période de rotation commune aux deux étoiles A et B est notée T : c'est la période de l'étoile double.

- 2.1. Expliquer pourquoi, dans la situation décrite sur le document 4, on $\lambda_A > \lambda_B$.
- 2.2. Sachant que l'effet Doppler ne se manifeste pas lorsque le vecteur vitesse de la source est perpendiculaire à la direction de visée, compléter en justifiant le tableau de l'**ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**. Schématiser sans souci d'échelle le spectre correspondant à chaque configuration et montrer que l'évolution temporelle de ces spectres est périodique de période $T/2$.
- 2.3. En utilisant les spectres du document 5 qui montrent l'évolution temporelle de la position de la raie $H\alpha$ dans le spectre de l'étoile double HD 80715, vérifier que la période T de celle-ci est voisine de 3,8 jours.

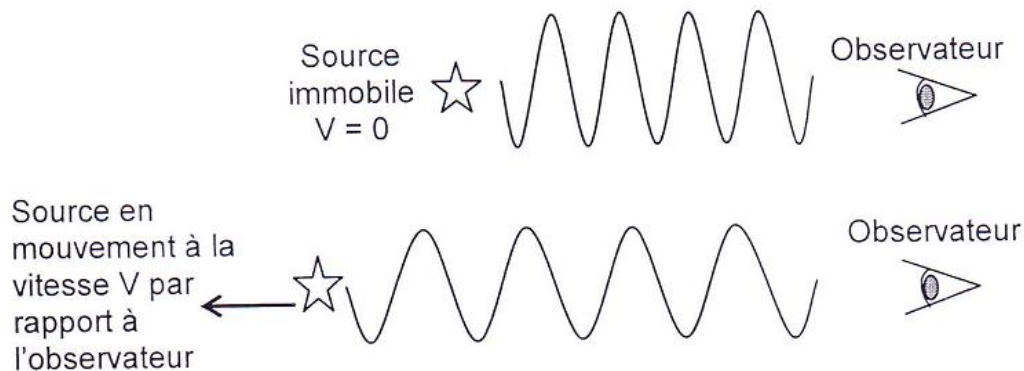
DOCUMENTS DE L'EXERCICE II

Document 1 : principe de l'effet Doppler

On note λ_0 la longueur d'onde de référence de la raie étudiée dans le spectre (source immobile par rapport à l'observateur) et λ la longueur d'onde de la radiation émise par la source en mouvement.

Lorsqu'une étoile s'éloigne de la Terre, on observe un décalage vers les grandes longueurs d'onde appelé

« redshift » et caractérisé par le nombre $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$



La formule de Doppler donne la vitesse d'éloignement V de la source lumineuse par rapport à l'observateur terrestre dans le cas non relativiste :

$$V = c \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

c est la célérité de la lumière dans le vide ($c = 2,99792 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$)

Document 2 : Décalage vers le rouge

En 1930, Edwin HUBBLE avait constaté expérimentalement que plus les galaxies étaient lointaines, plus leur spectre présentait un décalage vers le rouge important.

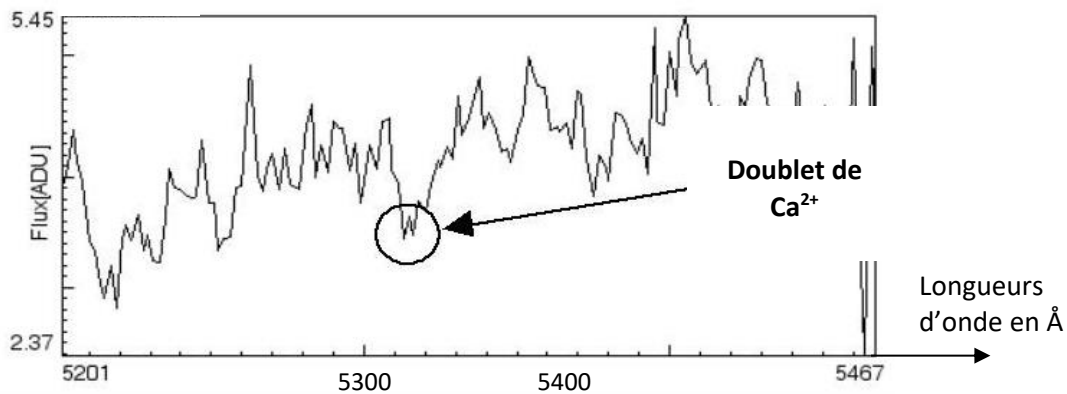
Le « décalage vers le rouge », qui sera appelé « redshift » apparaît, quand il est petit, comme proportionnel

à la distance : $z = \frac{H_0 d}{c}$ où H_0 est une constante appelée constante de Hubble.

Ce décalage est traditionnellement interprété comme étant dû à la vitesse d'éloignement des galaxies. Cette interprétation, si elle est vraie pour les « redshifts » petits est en fait fondamentalement erronée dans une perspective de relativité générale. Les « redshifts » observés vont d'une fraction de l'unité pour la plupart des galaxies, à 4 ou 5 pour les objets plus lointains, quasars, ou certaines autres galaxies.

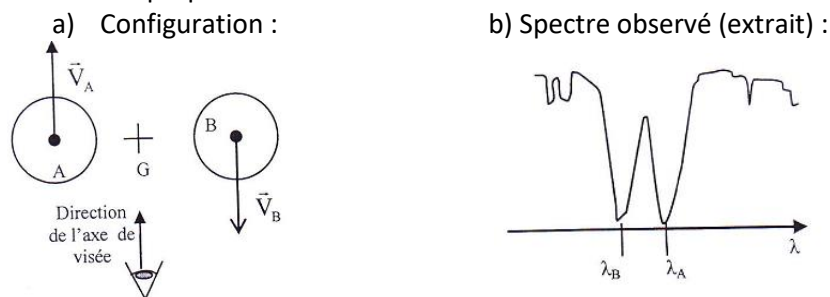
D'après « Cosmologie : Des fondements théoriques aux observations »
Francis Bernardeau (CNRS Éditions – EDP sciences)

Document 3 : Extrait du spectre NGC 691



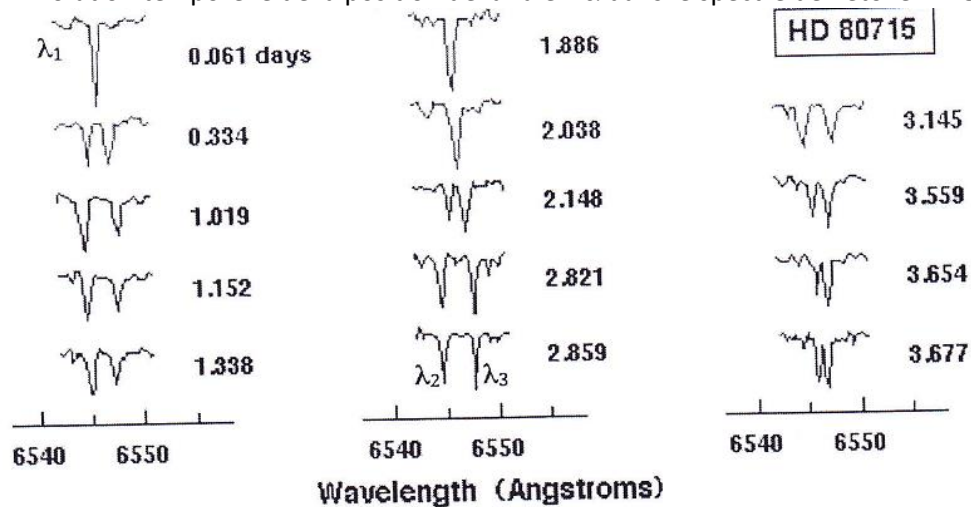
Source : observatoire de Haute Provence, logiciel libre SalsaJ.

Document 4 : Effet du mouvement des deux composantes d'une étoile double sur une raie d'absorption si l'axe reliant les deux étoiles est perpendiculaire à l'axe de visée.



On note : λ_A la longueur d'onde de la raie provenant du spectre de l'étoile A et λ_B la longueur d'onde de la raie provenant du spectre de l'étoile B.

Document 5 : Évolution temporelle de la position de la raie H α dans le spectre de l'étoile HD 80715.



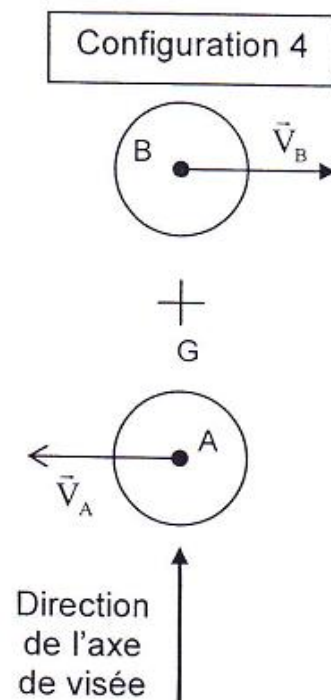
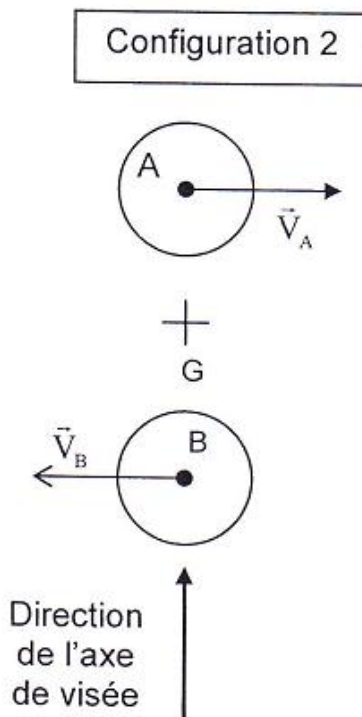
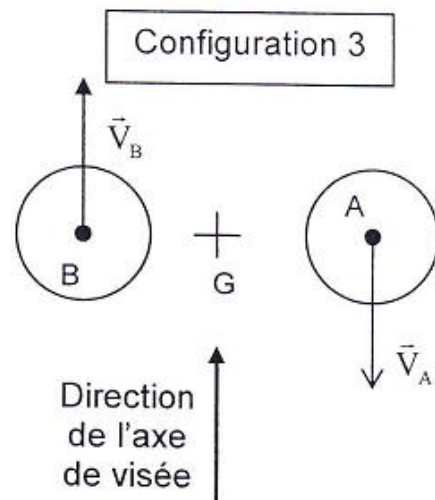
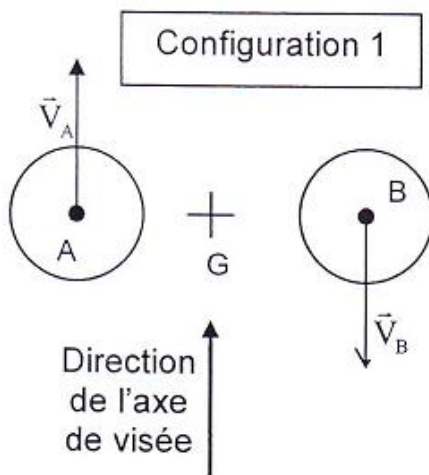
Crédit : « Observatoire de Paris / U.F.E. »

ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE

Question 2.2.

Pour chaque proposition, indiquer la (les) configurations correcte(s).

Relation entre λ_A et λ_B	$\lambda_A = \lambda_B$	$\lambda_A > \lambda_B$	$\lambda_A < \lambda_B$
Configuration(s)			



Sur ces schémas, l'observateur n'est pas représenté car il est à une très grande distance.