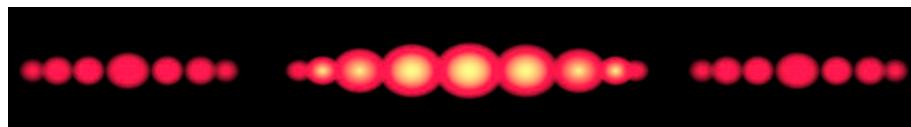


## ► Exercice 1

L'exercice suivant est destiné aborder les interférences et la diffraction de la lumière. Les deux parties sont totalement indépendantes.

## 1. Les fentes d'Young

Lorsqu'on envoie la lumière d'un laser de longueur d'onde  $\lambda = 632,8$  nm sur deux fentes verticales identiques d'ouverture  $a$  et distantes entre elles d'une longueur  $\ell$ , on obtient l'image de la figure sur l'écran, situé à la distance  $D = 2,0$  m des fentes.



- (a) Deux phénomènes caractéristiques des ondes se produisent ici.
  - i. Quels sont ces phénomènes ?
  - ii. Analyser la figure, en précisant la contribution de chaque phénomène.
- (b) On mesure un cart angulaire  $\theta = 1,6 \times 10^{-3}$  rad.
  - i. Quel phénomène est caractérisé par l'écart angulaire ?
  - ii. Calculer l'ouverture des fentes  $a$ .
- (c) On mesure une distance de 9,5 cm entre 11 franges sombres.

La distance  $i$  entre deux franges sombres est donné par la relation :

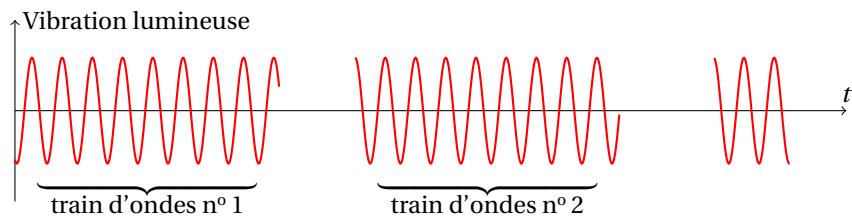
$$i = \frac{\lambda D}{\ell}$$

- i. Que peut-on dire quant aux deux ondes lumineuses au niveau des franges brillantes ? Sombres ?
- ii. Déterminer l'écart  $\ell$  entre les deux fentes.
- (d) Prévoir l'évolution de la figure observé si l'on modifie les paramètres suivants, les autres paramètres expérimentaux restant inchangés :
  - i. on écarte les deux fentes ;
  - ii. on diminue l'ouverture des fentes ;
  - iii. on remplace le laser rouge par un laser vert.

*Données* : Domaine de longueur d'onde du rouge : de 620 nm ; du vert : de 500 à 578 nm.

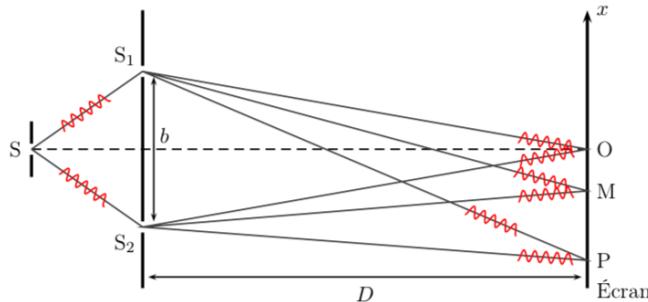
## 2. Interférences avec les raies du sodium

Dans une source de lumière monochromatique, par exemple une lampe à vapeur de sodium qui met une radiation jaune, les atomes excités par une décharge électrique mettent une onde de très courte dure  $\tau = 10^{-11}$  s environ. On parle alors de trains d'ondes. La source met de façon continue, car elle renferme un très grand nombre d'atomes qui se désexcitent puis sont à nouveau excités avant de se désexciter. Deux trains d'ondes mis successivement par le même atome ne sont pas cohérents, car le déphasage entre les deux trains est aléatoire. Les trains d'ondes mis par les autres atomes de la source sont également incohérents.



(a) *Durée et longueur de cohérence*

- La durée d'émission d'un train d'ondes par un atome est appelée durée de cohérence. Justifier cette expression. Quelle est la longueur d'un train d'ondes, appelée longueur de cohérence ?  
*Donnée* : célérité des ondes lumineuses  $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .
- Calculer un ordre de grandeur du nombre d'oscillations d'un train d'ondes.  
*Donnée* : la longueur d'onde de la raie jaune du sodium est  $\lambda = 589 \text{ nm}$ .
- Sur le schéma proposé en figure, y a-t-il interférence visible en O, en M ou en P ? Justifier.



- La largeur de la bande sur l'écran dans laquelle le phénomène d'interférence est visible sur l'écran est-elle plus grande lorsque les fentes sont proches l'une de l'autre ( $b$  petit), ou lorsqu'elles sont plus distantes ( $b$  grand) ? Justifier qualitativement.

(b) *Obtention d'interférences*

On se place maintenant uniquement dans la bande sur l'écran dans laquelle le phénomène d'interférence est visible. La source S est toujours à égale distance des sources  $S_1$  et  $S_2$ .

- Les deux sources  $S_1$  et  $S_2$  mettent-elles en phase ? Justifier.
- Dans ces conditions, les interférences sont-elles constructives ou destructives au point O ? La frange centrale (en O sur le schéma) est-elle noire ou brillante ?
- En un point M d'abscisse  $x$  de l'écran, la différence de marche est donnée par la relation :

$$\delta = \frac{b \cdot x}{D}$$

Où  $b$  est l'écart entre les sources  $S_1$  et  $S_2$  et  $D$  est la distance entre les sources et l'écran.

A quelle distance  $x$  du point O se trouve le milieu de la première frange sombre ? En déduire l'interfrange.

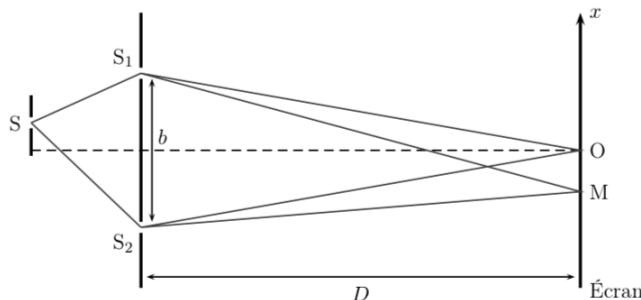
*Donnée* :  $D = 200 \text{ cm}$  et  $b = 200 \mu\text{m}$ .

- Le point d'abscisse  $x = 11,8 \text{ mm}$  est-il au centre d'une frange brillante ou d'une frange sombre ? Justifier.

(c) *Effet d'un déplacement de la source*

On déplace la fente source S, parallèlement au plan des sources secondaires, vers le haut.

- Les deux sources secondaires  $S_1$  et  $S_2$  mettent-elles toujours en phase ? Quelle est la source qui est en retard par rapport à l'autre ?



- On suppose que le déplacement de la fente source S correspond à un retard d'une demi-période d'une source secondaire par rapport à l'autre. Quelle est maintenant la nature de la frange située en O ? Justifier.
- L'interfrange est-il modifié ? Que se passe-t-il si l'on remplace la fente S par une source tendue, de largeur égale à la distance dont on a déplacé la fente S ?

## ► Exercice 2

La houle est un train de vagues régulier généré par un vent soufflant sur une grande étendue de mer sans obstacle, le fetch. En arrivant près du rivage, sous certaines conditions, la houle déferle au grand bonheur des surfeurs !

### 1. Etude de la houle

- Pourquoi peut-on dire que la houle est une onde mécanique progressive ?
- Il est possible de simuler la houle au laboratoire de physique avec une cuve à ondes en utilisant une lame vibrante qui crée à la surface de l'eau une onde progressive sinusoïdale de fréquence  $f = 23$  Hz. On réalise une photographie du phénomène observé. Déterminer, en expliquant la méthode utilisée, la vitesse de propagation  $v$  de l'onde sinusoïdale générée par le vibreur.
- Au large de la pointe bretonne, à une profondeur de 3000 m, la houle s'est formée avec une longueur d'onde de 60 m. En utilisant le document 2, calculer la vitesse de propagation  $v_1$  de cette houle. En déduire sa période  $T$ .
- Arrivée de la houle dans une baie.
  - Sur la photographie aérienne du document 4, quel phénomène peut-on observer ? Quelle est la condition nécessaire à son apparition ?
  - Citer un autre type d'onde pour lequel on peut observer le même phénomène.

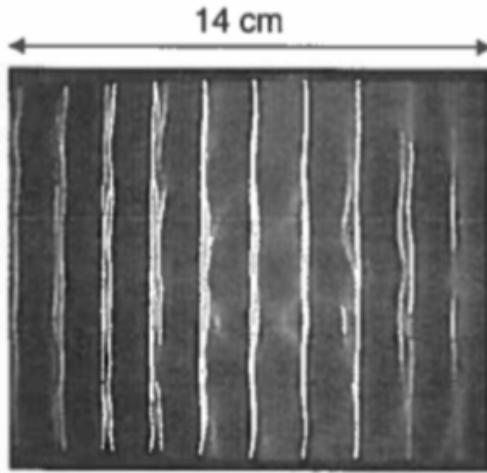
### 2. Etude des vagues

La houle atteint une côte sablonneuse et rentre dans la catégorie des ondes longues.

Calculer la nouvelle vitesse de propagation  $v_2$  de la houle lorsque la profondeur est égale à 4,0 m, ainsi que sa nouvelle longueur d'onde  $\lambda_2$ .

## Documents

**Document 1 :** Simulation de la houle au laboratoire avec une cuve à ondes.



**Document 2 :** Vitesse de propagation des ondes à la surface de l'eau.

— Cas des ondes dites « courtes » (en eau profonde) : longueur d'onde  $\lambda$  faible devant la profondeur  $h$  de l'océan ( $\lambda < 0.5 \cdot h$ ), célérité des ondes donnée par :

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$$

— Cas des ondes dites « longues » (eau peu profonde) : longueur d'onde  $\lambda$  très grande devant la profondeur de l'eau ( $\lambda > 10 \cdot h$ ), célérité des ondes donnée par :

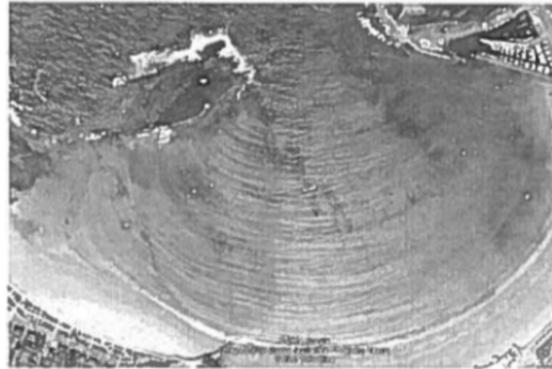
$$v = \sqrt{gh}$$

$g$  est l'intensité de la pesanteur terrestre :

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

**Document 3 :** Déferlement des vagues sur la côte.

En arrivant près de la côte, la houle atteint des eaux peu profondes. Dès que la profondeur est inférieure à la moitié de la longueur d'onde, les particules d'eau sont freinées par frottement avec le sol. La houle est alors ralentie et sa longueur d'onde diminue. Ces modifications des caractéristiques de l'onde s'accompagnent d'une augmentation d'amplitude. La période est la seule propriété de l'onde qui ne change pas à l'approche de la côte. Ainsi en arrivant près du rivage, la vitesse des particules sur la crête est plus importante que celle des particules dans le creux de l'onde, et lorsque la crête n'est plus en équilibre, la vague déferle.

**Document 4 :** Photographie aérienne de l'arrivée de la houle dans une baie.**► Exercice 3**

La mesure du déplacement vers le rouge, par effet Doppler, de raies caractéristiques des spectres mis par des sources lointaines (galaxies, quasars, etc.) est la preuve d'un univers en expansion, aussi bien que le moyen de mesurer la vitesse d'éloignement de ces objets lointains. En faisant appel à des modèles cosmologiques, on peut tirer des informations sur la distance de ces sources à la Terre.

Dans cet exercice, on se propose de déterminer la vitesse d'éloignement d'une galaxie puis sa distance par rapport à un observateur terrestre.

**1. L'effet Doppler (voir le document 1)**

Pour des vitesses largement inférieures à la célérité de la lumière, on se place dans le cadre non relativiste. Choisir, en justifiant, la relation entre  $\lambda_0$ , la longueur d'onde mesurée en observant une source immobile, et  $\lambda'$ , la longueur d'onde mesurée en observant la même source s'éloignant à la vitesse  $v$  :

$$(1) \quad \lambda' = \frac{v}{c} \cdot \lambda_0 \quad (2) \quad \lambda' = \lambda_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right) \quad (3) \quad \lambda' = \lambda_0(c - v) \quad (4) \quad \lambda' = \lambda_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

**2. Détermination de la vitesse d'une galaxie**

- (a) Rechercher les longueurs d'onde des raies  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$  et  $H_\gamma$  pour le spectre de l'hydrogène sur Terre et les longueurs d'onde de ces mêmes raies lorsqu'elles sont issues de la galaxie TGS153Z170. Compléter les deux premières colonnes du tableau.

**(b) Choix du modèle d'étude**

- i. En se plaçant dans le cadre non relativiste, montrer que l'expression de la vitesse  $v$  de la galaxie est :

$$v = c \left( \frac{\lambda'}{\lambda_0} - 1 \right)$$

- ii. Calculer la valeur de la vitesse de la galaxie TGS153Z170 en travaillant avec les valeurs de la raie  $H_\beta$ . On donne la relation d'incertitude suivante pour la vitesse :

$$\Delta v = \sqrt{2} c \frac{\Delta \lambda}{\lambda'}$$

On exprimera le résultat sous la forme :  $v \pm \Delta v$ . Les valeurs numériques sur les spectres sont données  $\pm 1 \text{ nm}$ .

- iii. Dans le cadre relativiste ( $v \approx c$ ), on montre que la vitesse  $v_{\text{rel}}$  a pour expression :

$$v_{\text{rel}} = c \cdot \frac{\left(\frac{\lambda'}{\lambda_0}\right)^2 - 1}{\left(\frac{\lambda'}{\lambda_0}\right)^2 + 1}$$

Pour la galaxie TGS153Z170, on trouve  $v_{\text{rel}} = (1,27 \pm 0,09) \times 10^7 \text{ m/s}$ .

Si l'écart relatif entre les deux vitesses précédemment calculées est inférieur à 5 %, on peut choisir le modèle non relativiste plus simple à utiliser. Justifier le choix du modèle non relativiste pour la suite de l'exercice.

(c) *Décalage vers le rouge*

- En comparant les longueurs d'onde  $\lambda_0$  et  $\lambda'$ , justifier l'expression décalage vers le rouge .
- On définit le décalage spectral relatif  $z$  par :

$$z = \frac{\lambda' - \lambda_0}{\lambda_0}$$

On montre que  $z$  ne dépend pas de la raie choisie. Compléter la troisième colonne du tableau.

- En déduire la meilleure estimation de  $z$  pour la galaxie TGS153Z170.
- A l'aide de la définition de  $z$ , montrer que :

$$z = \frac{v}{c}$$

- Calculer la nouvelle valeur de la vitesse d'éloignement de la galaxie. Expliquer pourquoi cette valeur est plus pertinente que celle calculée auparavant.

### 3. Détermination de la distance d'une galaxie

En 1929, Edwin HUBBLE observe depuis le Mont Wilson aux USA le décalage Doppler de dizaines de galaxies. Ses mesures lui permettent de tracer le diagramme qui porte son nom. Il en déduit une relation simple entre la vitesse d'éloignement  $v$  d'une galaxie et sa distance  $d$  par rapport la Terre :

$$v = H \cdot d$$

où  $H$  est la constante de Hubble.

- Déterminer la valeur de la constante de Hubble  $H$  en  $\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{M}^{-1}$ .
- Etablir l'expression de la distance  $d$  de la galaxie la Terre en fonction de  $c$ ,  $z$  et  $H$ . En déduire la distance en M de la galaxie TGS153Z170 la Terre.

### 4. Comparaison des spectres de deux galaxies

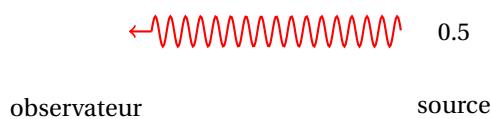
- Lequel des spectres des galaxies TGS153Z170 et TGS912Z356 est un spectre d'absorption ?
- De ces deux galaxies, laquelle est la plus éloignée de la Terre ? Justifier.

## Documents

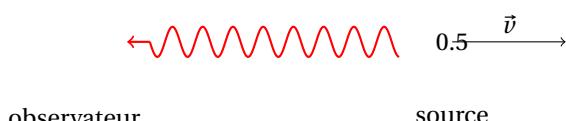
### Données :

- Vitesse de propagation de la lumière dans le vide :  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$ ;
- Le parsec est l'unité de longueur utilisé par les astronomes, de symbole :  $1 \text{ pc} = 3,08 \times 10^{16} \text{ m}$ .

**Document 1 :** Principe de l'effet Doppler.

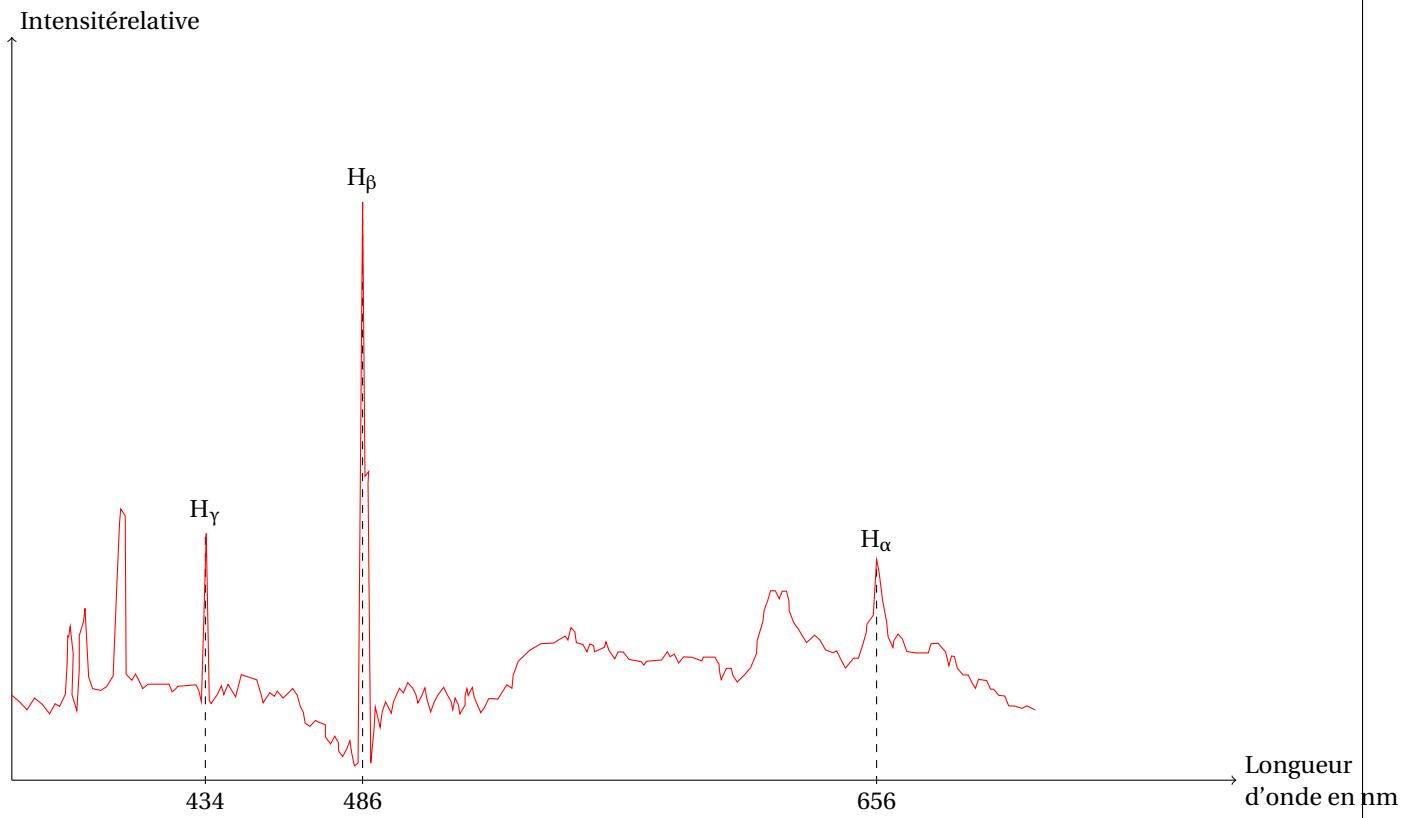


L'observateur mesure la longueur d'onde  $\lambda_0$  du signal lumineux émis par une source immobile. On obtient  $\lambda' = \lambda_0$ .

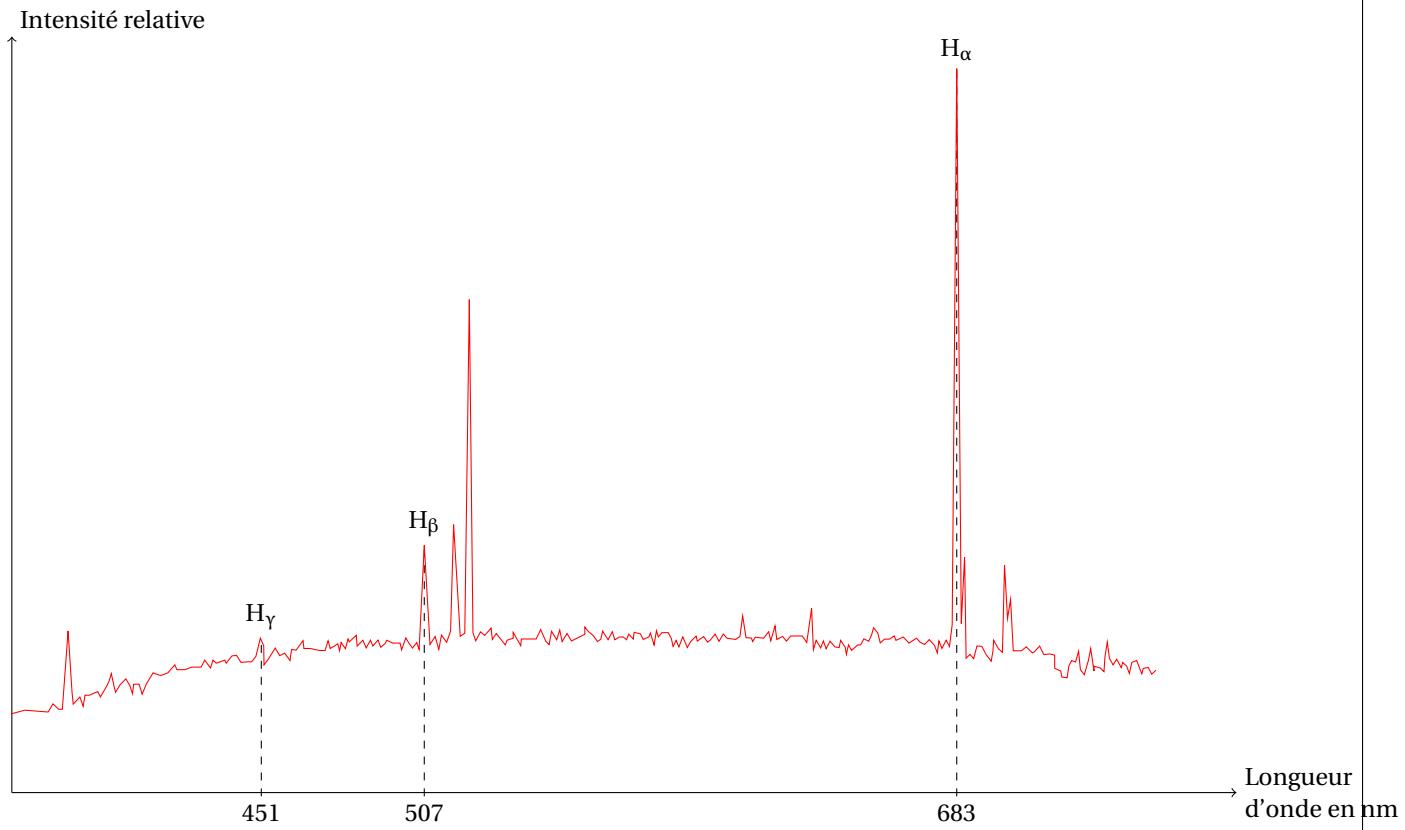


L'observateur mesure la longueur d'onde  $\lambda'$  du signal lumineux émis par la même source s'éloignant la vitesse  $v$ . On obtient  $\lambda' > \lambda_0$ .

**Document 2 :** Spectre d'émission de l'hydrogène mesuré sur Terre obtenu avec une source présente au laboratoire.

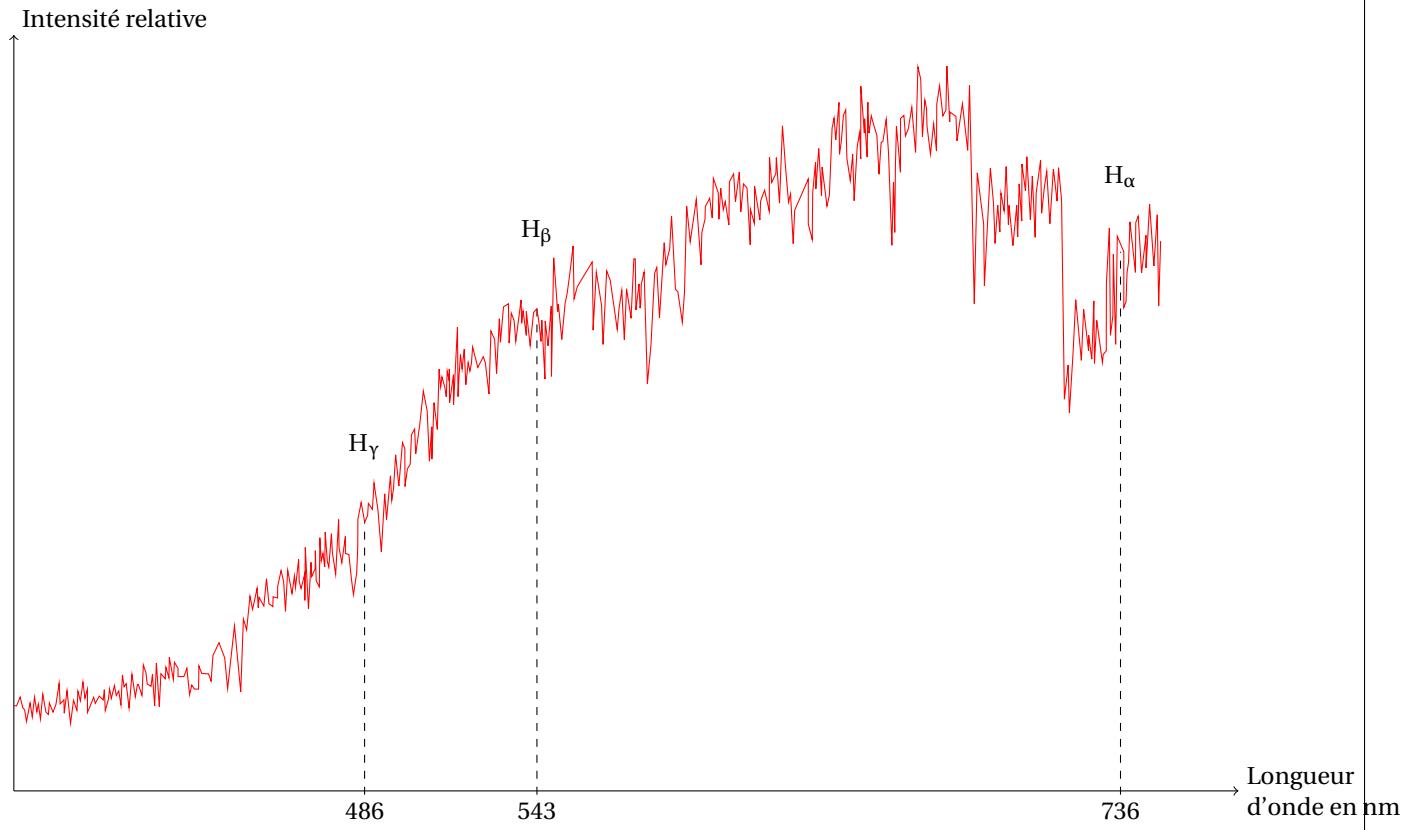


**Document 3 :** Spectre de la galaxie TGS153Z170 avec indexage des raies.



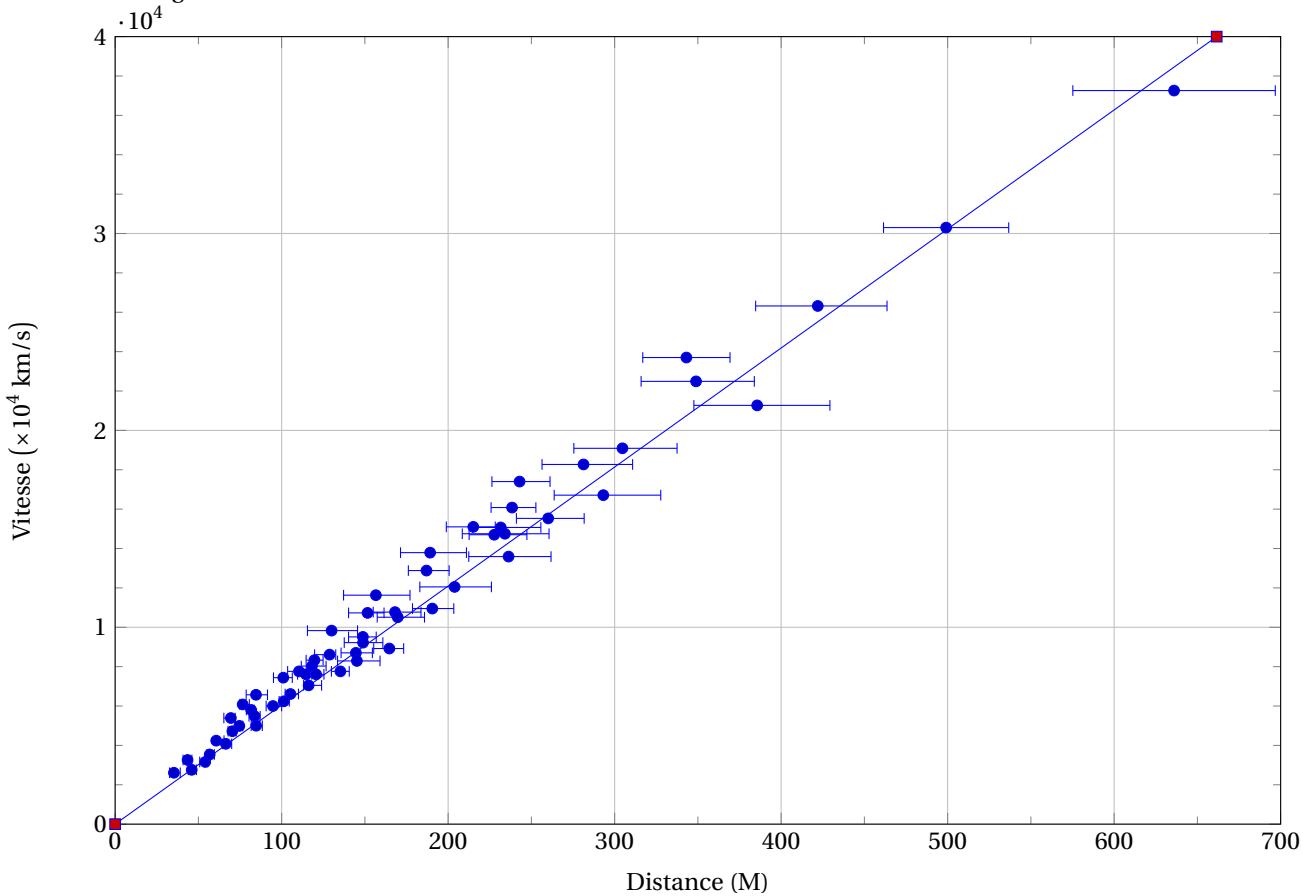
M. COLLESS et coll. *The 2dF Galaxy Redshift Survey : spectra and redshifts*, Mon. Not. R. Astron. Soc. 328, 1039–1063 (2001).

**Document 4 :** Spectre de la galaxie TGS912Z356 avec indexage des raies.



M. COLLESS et coll. *The 2dF Galaxy Redshift Survey : spectra and redshifts*, Mon. Not. R. Astron. Soc. 328, 1039-1063 (2001).

**Document 5 :** Diagramme de HUBBLE.



R. P. KIRSHNER, PNAS 2004;101:8-13.

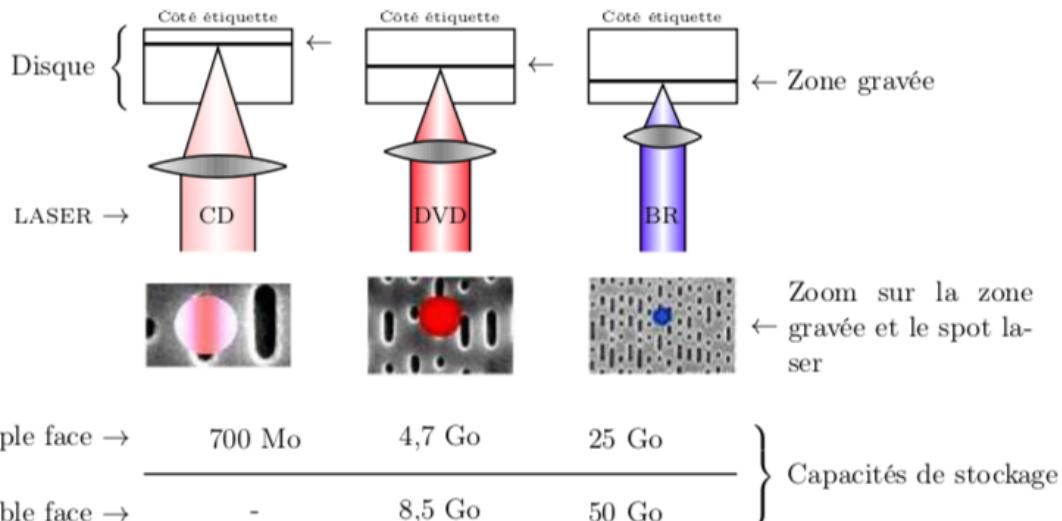
## ► Exercice 4

Saviez-vous que si vous regardez des DVD, naviguez sur le web, scannez les codes barre et si certains peuvent [suite à une opération] se passer de leurs lunettes, c'est grâce à l'invention du LASER, il y a 50 ans !

Intéressons-nous aux lecteurs CD et DVD qui ont envahi notre quotidien. La nouvelle génération de lecteurs comporte un laser bleu (le blu-ray) dont la technologie utilise une diode laser fonctionnant à une longueur d'onde  $\lambda_B = 405 \text{ nm}$  d'une couleur bleue (en fait violacée) pour lire et écrire les données. Les CD et les DVD conventionnels utilisent respectivement des lasers infrarouges et rouges. Les disques Blu-ray fonctionnent d'une manière similaire à celle des CD et des DVD.

Le laser d'un lecteur blu-ray émet une lumière de longueur d'onde différente de celles des systèmes CD ou DVD, ce qui permet de stocker plus de données sur un disque de même taille (12 cm de diamètre), la taille minimale du point sur lequel le laser grave l'information étant limitée par la diffraction.

Pour stocker davantage d'informations sur un disque, les scientifiques travaillent sur la mise au point d'un laser ultra violet.



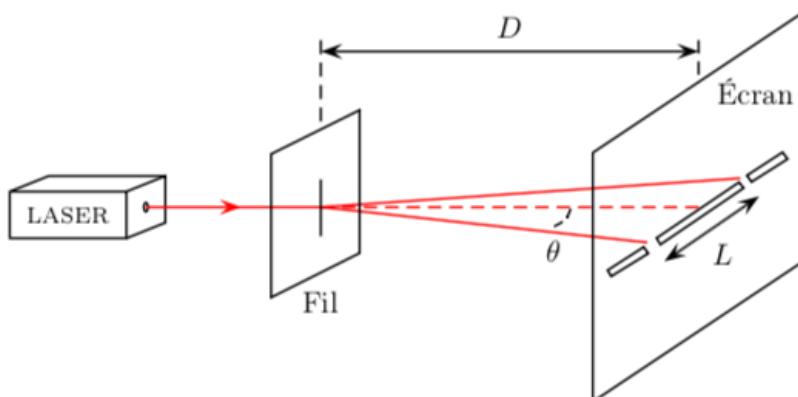
### 1. A propos du texte

- Quel est le nom du phénomène physique responsable de l'irisation d'un CD ou d'un DVD éclairé en lumière blanche ?
- Calculer la valeur de la fréquence  $v_B$  de la radiation utilisée dans la technologie blu-ray.  
Donnée : Célérité de la lumière dans le vide et dans l'air :  $c = 3,008 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .
- Comparer la longueur d'onde du laser blu-ray à celle des systèmes CD ou DVD.

### 2. Diffraction

On veut retrouver expérimentalement la longueur d'onde  $\lambda_D$  de la radiation monochromatique d'un lecteur DVD.

On utilise pour cela le montage suivant,  $a$  étant le diamètre du fil,  $\theta$  le demi-écart angulaire.



### 1. Expression de $\lambda$

- Etablir la relation entre  $\theta$ ,  $L$  (largeur de la tache centrale de diffraction) et  $D$  (distance entre le fil et l'écran). On supposera  $\theta$  suffisamment petit pour considérer  $\tan \theta \simeq \theta$  avec  $\theta$  en radian.
- Donner la relation entre  $\theta$ ,  $\lambda_D$  et  $a$ , en indiquant l'unité de chaque grandeur.
- En déduire la relation :

$$\lambda_D = \frac{La}{2D}$$

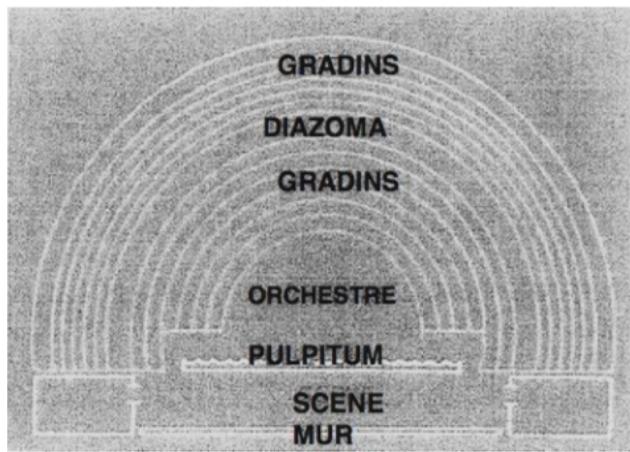
### 2. Détermination de la longueur d'onde $\lambda_D$ de la radiation d'un laser de lecteur DVD.

Pour la figure de diffraction obtenue avec un laser « DVD », on mesure  $L = 4,8$  cm.

On remplace alors le laser « DVD » par le laser utilisé dans le lecteur blu-ray, sans modifier le reste du montage. On obtient une tache de diffraction de largeur  $L' = 3,0$  cm.

A partir de ces deux expériences, calculer la valeur de la longueur d'onde  $\lambda_D$  de la radiation monochromatique d'un lecteur DVD.

## ► Exercice 5



Le théâtre antique d'Aspendos (50 km d'Antalya, en Turquie) est le mieux conservé de toute l'Asie Mineure. Construit au II<sup>e</sup> siècle après J.C., sa célébrité est due à son excellent état de conservation, mais aussi à son acoustique remarquable qui, comme l'ensemble des théâtres antiques, révèle la réussite de son architecte. Les spectateurs assis au dernier rang de ce théâtre, doté d'une capacité d'accueil de 15 000 personnes, peuvent en effet entendre très distinctement les paroles d'un acteur situé sur la scène à une distance de plusieurs dizaines de mètres !

Cet exercice a pour objectif de comprendre comment les architectes ont réussi, par ce type de construction, à obtenir de tels résultats acoustiques.

### 1. Généralités

- Le son est une onde mécanique progressive. Définir les termes soulignés.
- Dans un espace à combien de dimensions se propage une onde sonore ?

### 2. Utilisation d'un émetteur ultrasonore

Un émetteur ultrasonore est utilisé pour réaliser cette simulation. On rappelle les informations suivantes :

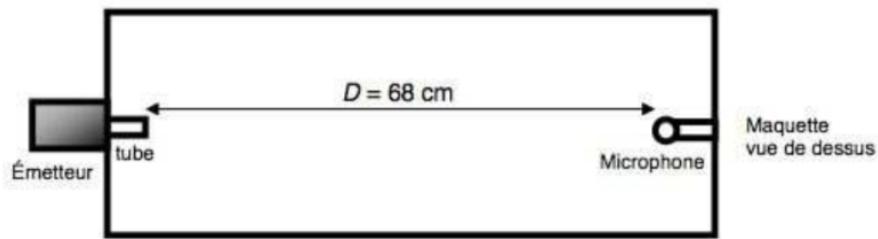
- les sons audibles par l'oreille ont une fréquence  $f$  comprise entre 20 Hz et 20 kHz ;
- lorsque la fréquence  $f$  est supérieure à 20 kHz, on parle d'ultrasons ;
- ordre de grandeur de la célérité des sons émis par la voix et des ultrasons dans l'air dans les conditions habituelles :  $v = 340 \text{ m.s}^{-1}$ .

- Définir en une phrase ce qu'est la longueur d'onde  $\lambda$ .
- Donner la relation existant entre la longueur d'onde  $\lambda$ , la célérité  $v$  et la fréquence  $f$  d'une onde.
- Déduire, de ce qui précède, que la longueur d'onde des ultrasons est inférieure à celle des sons moyens de la voix. Justifier précisément la réponse.
- Justifier alors l'intérêt d'utiliser ce type d'ondes dans le cadre d'une simulation avec une maquette.
- Définir ce qu'on appelle un milieu dispersif.
- L'air est-il un milieu dispersif pour les ondes sonores et ultrasonores ? Justifier la réponse.

### 3. Influence du plafond

Les salles de concert couvertes n'ont pas la même acoustique que les théâtres en plein air. On se propose dans cette partie d'étudier l'impact d'un plafond recouvrant totalement la salle de concert sur l'acoustique de cette salle. Pour cela on utilise une maquette rectangulaire dont le couvercle est amovible.

Une des parois latérales est traversée par un tube, relié comme précédemment à un émetteur ultrasonore. La longueur d'onde du son émis est là encore réduite dans le rapport indiqué par l'échelle de la maquette. Sur la paroi opposée est disposé un microphone :



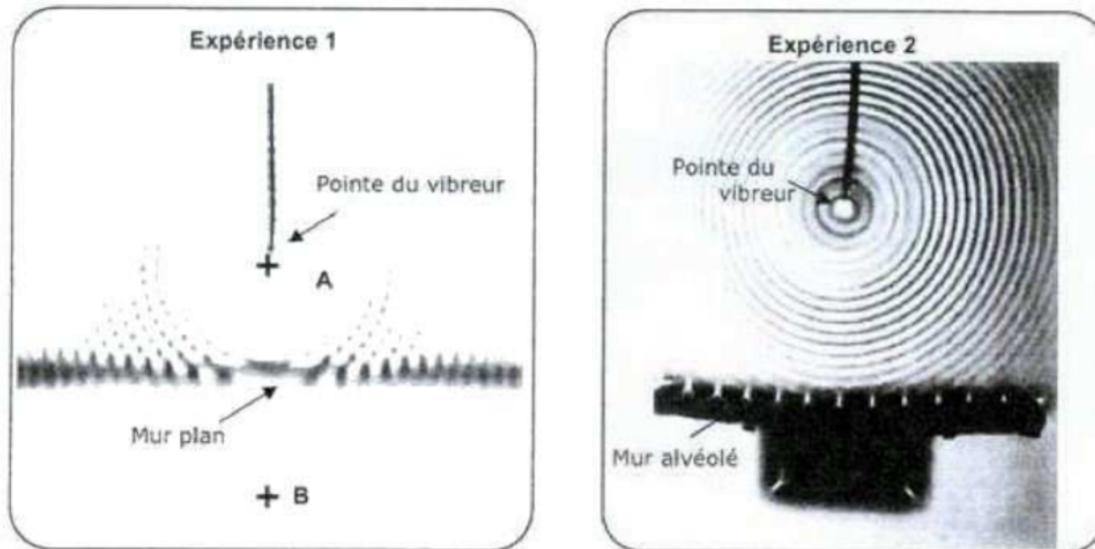
L'expérience consiste à envoyer pendant un temps très court (1 ms), un top d'émission (au niveau de l'extrémité du tube). Un microphone est situé à une distance  $D$  du tube.

Un oscilloscope permet de recevoir d'abord l'émission arrivant directement, puis tous les échos successifs. Le TOP est reçu avec un retard  $\tau$  par rapport au TOP émis. On réalise 3 expériences :

- Expérience ① avec le couvercle ;
- Expérience ② avec un couvercle recouvert de moquette ;
- Expérience ③ sans couvercle.

Les résultats obtenus sont présentés en annexe.

- (a) A l'aide des données de l'énoncé (la célérité  $v$  des ultrasons dans l'air n'ayant pas changé), évaluer le retard  $\tau$  entre l'émission et la réception du top par le microphone.
- (b) Comparer les résultats des trois expériences en termes d'amortissement de l'écho.
- (c) Parmi les trois expériences, quelle est la situation la plus intéressante d'un point de vue acoustique ? Justifier la réponse.
- (d) Justifier alors que le plafond des salles de concert est toujours recouvert de dalles alvéolées constituées d'un matériau très absorbant.



### 4. Règle du mur : simulation à l'aide d'une cuve à ondes

La propagation des ondes et leur comportement quand elles rencontrent une surface réfléchissante peuvent être assez bien matérialisés au moyen d'une cuve à ondes.

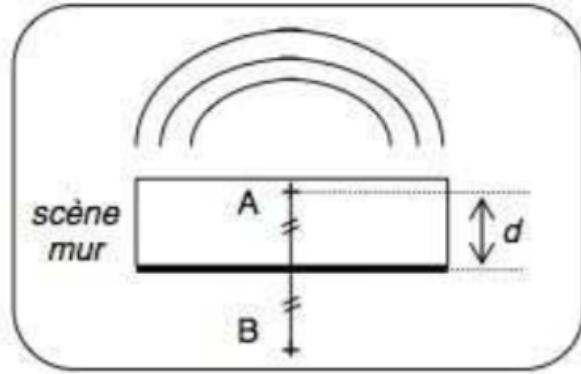
Un vibreur muni d'une pointe, frappe verticalement, avec une fréquence connue, la surface de l'eau contenue dans une cuve à ondes.

**Expérience 1 :** On réalise l'expérience en plaçant un mur plan. On constate la présence d'échos. Tout se passe comme s'il y avait une deuxième source.

**Expérience 2 :** On utilise cette fois-ci un mur alvéolé.

On obtient les images reproduites ensuite.

- Les ondes créées par le vibreur à la surface de l'eau sont-elles longitudinales ou bien transversale ? Justifier.
- Dans le cas de l'expérience 1, l'onde émise au point A rencontre le mur plan ce qui génère une onde réfléchie qui semble provenir de B, symétrique de A par rapport au plan formé par le mur. Celle-ci se superpose alors à l'onde incidente issue de A. En comparant les images de deux expériences, expliquez en quoi un mur plan est gênant pour la réception sonore dans les gradins.
- A l'aide du cliché en tenant compte de l'échelle du document, déterminer, le plus précisément possible, la valeur de la longueur d'onde  $\lambda$  en expliquant brièvement la méthode employée.
- En analysant les expériences 1 et 2, justifier la forme du pupitrum ainsi que la présence de niches et de colonnes dans le mur des théâtres antiques.
- Les ondes réfléchies par le mur ne pouvant être totalement évitées, l'essentiel est que tous ces échos n'arrivent pas avec un trop grand retard. En effet, ce sont les consonnes qui forment l'armature de la parole. Leur durée d'émission est très courte de l'ordre de  $1/25$  de seconde. Pour qu'elles ne se juxtaposent pas, il faut que leur écho arrive avant la fin de leur émission.



Si l'orateur est placé en A, à une distance  $d$  du mur formant le fond de la scène, exprimer la distance AB en fonction de  $d$ .

- En déduire l'expression en fonction de  $d$  et de  $v$  du retard  $\Delta t$  entre l'onde sonore émise par l'orateur au point A et l'onde réfléchie par le mur, qui semble issue du point B.
- Déterminer la profondeur maximale  $d_{\max}$  de la scène qui permet à la parole de rester nettement compréhensible. Pour faciliter le calcul numérique, on considérera une célérité des ondes sonores égale à  $350 \text{ m.s}^{-1}$ .

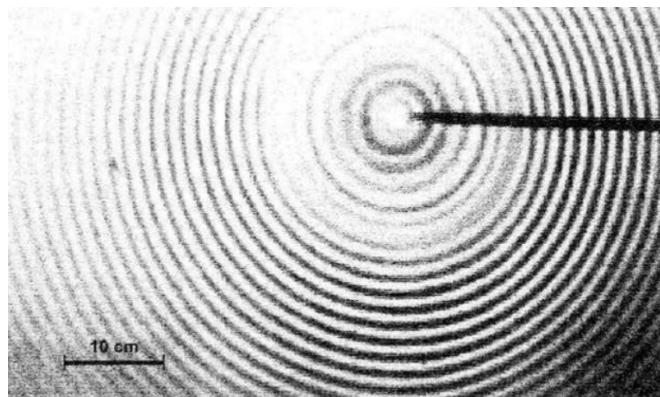
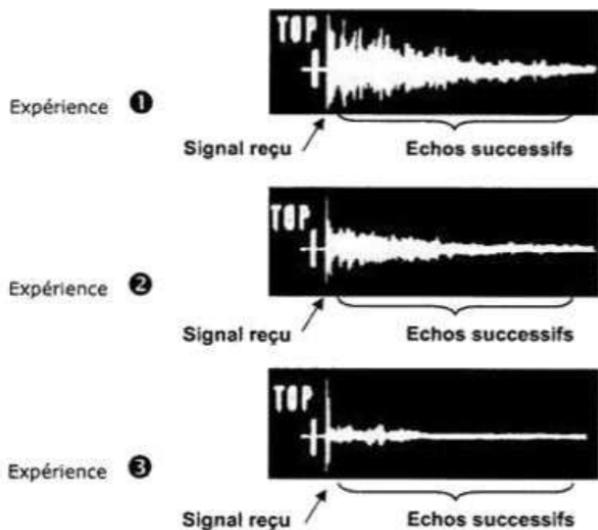
## 5. Conclusion (sans questions)

Une condition importante est aussi que les rayons n'arrivent pas affaiblis. Si les spectateurs étaient disposés dans un plan horizontal, leurs rangées successives absorberaient les ondes sonores et une faible énergie arriverait au dernier rang. Une inclinaison des gradins de  $30^\circ$  environ et croissante vers le haut empêche cette absorption.

Toutes ces remarques imposent les conditions suivantes :

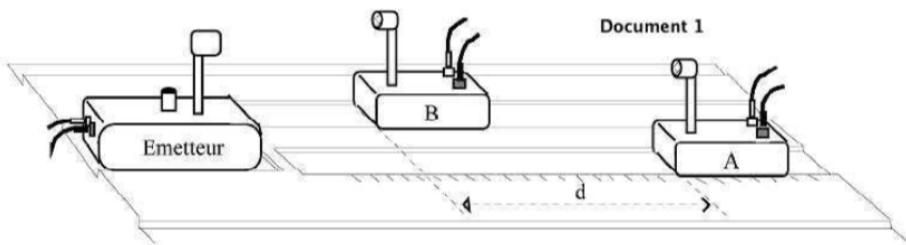
- Orchestre réfléchissant et bien dégagé ;
- Hauteur faible de la scène et profondeur généralement inférieure à  $6,50 \text{ m}$  ;
- Inclinaison moyenne des gradins de  $30^\circ$  environ.

Ainsi, la bonne audition en ces points n'avait pas échappé aux architectes de l'époque, et il est remarquable que tout cela a été fait sans l'emploi des moyens modernes d'investigation (microphones, haut-parleurs, oscilloscopes...), mais uniquement en utilisant l'oreille et la géométrie.

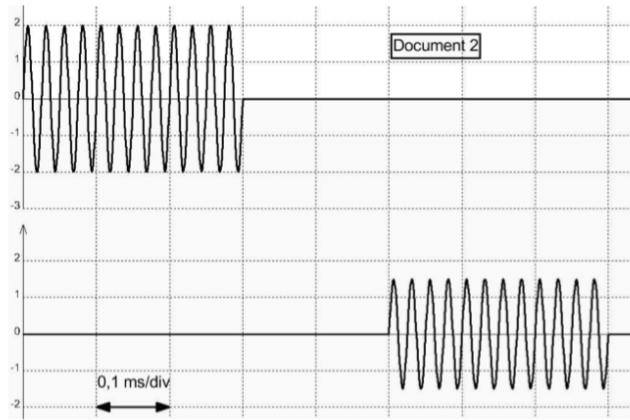


### ► Exercice 6

Un émetteur produit dans l'air des ultrasons par salves. Face à lui sont placés deux récepteurs distants de la distance  $d = 17,1$  cm l'un de l'autre (voir ci-dessous). Les salves ultrasonores reçues par ces récepteurs sont transformées en signaux électriques visualisés sur un oscilloscope.



Le coefficient de balayage (ou base de temps) des deux voies de l'oscilloscope est de  $0,10$  ms/div. Les oscillogrammes sont ceux des tensions produites par les deux récepteurs après réception d'une salve ultrasonore émise par l'émetteur.



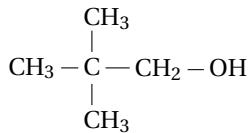
1. Quel est le retard  $\tau$  du récepteur 2 par rapport au récepteur 1 ?
2. Calculer la célérité  $v$ , en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , des ultrasons dans l'air.
3. Si on avait sélectionné le calibre de  $0,5$  ms/div, quel serait le décalage (exprimés en divisions) entre les deux oscillosgrammes ?
4. Si la distance séparant les deux récepteurs était  $d = 9,0$  cm, de combien de divisions seraient décalés les deux oscillosgrammes ? Le coefficient de balayage reste à  $0,10$  ms/div.
5. A l'aide des oscillosgrammes, déterminer la période  $T$  puis la fréquence  $f$  des ondes ultrasonores émises.

## ► Exercice 1

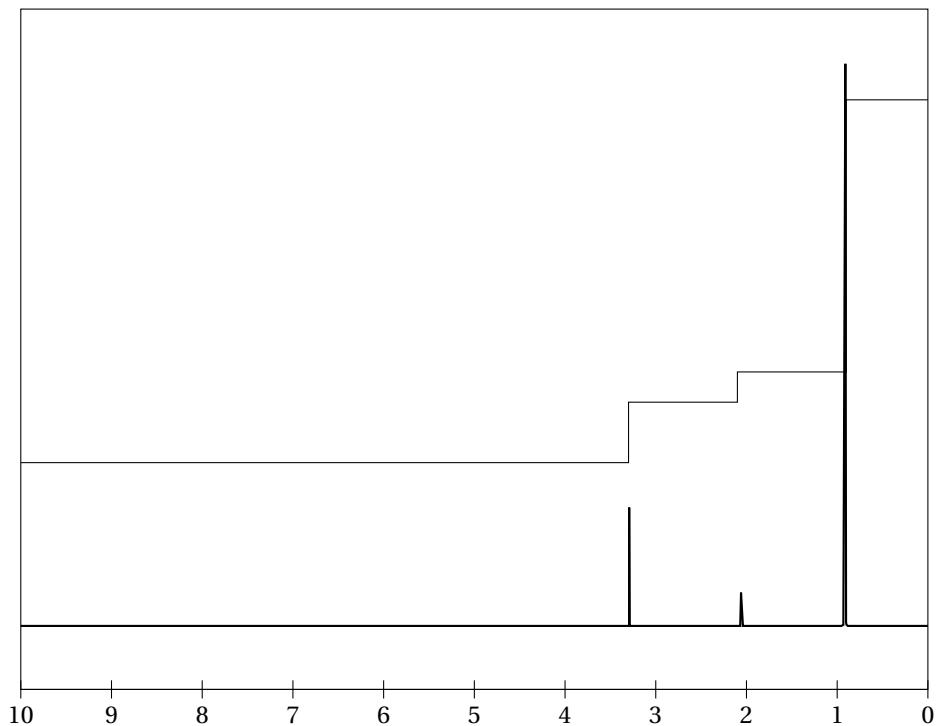
Le spectre RMN d'une molécule organique de formule brute  $C_4H_8O$  est donné en figure suivante. Cette molécule peut-elle être la butanone ? Justifier soigneusement.

## 1. Une molécule organique

On considère la molécule organique suivante :



Le spectre RMN 300 MH de cette molécule et son intégration sont représentées ensuite.

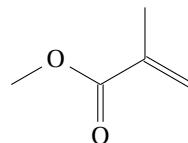


- Donner le nom systématique (nomenclature officielle) de la molécule organique.
- Exploiter le spectre RMN et sa courbe d'intégration pour attribuer à chaque pic son groupe de protons équivalents.

## 2. Le MAM

Le méthacrylate de méthyle, noté MAM, est une espèce chimique employée pour produire le polyméthacrylate de méthyle dont les marques commerciales les plus connues sont l'altuglas et le plexiglas.

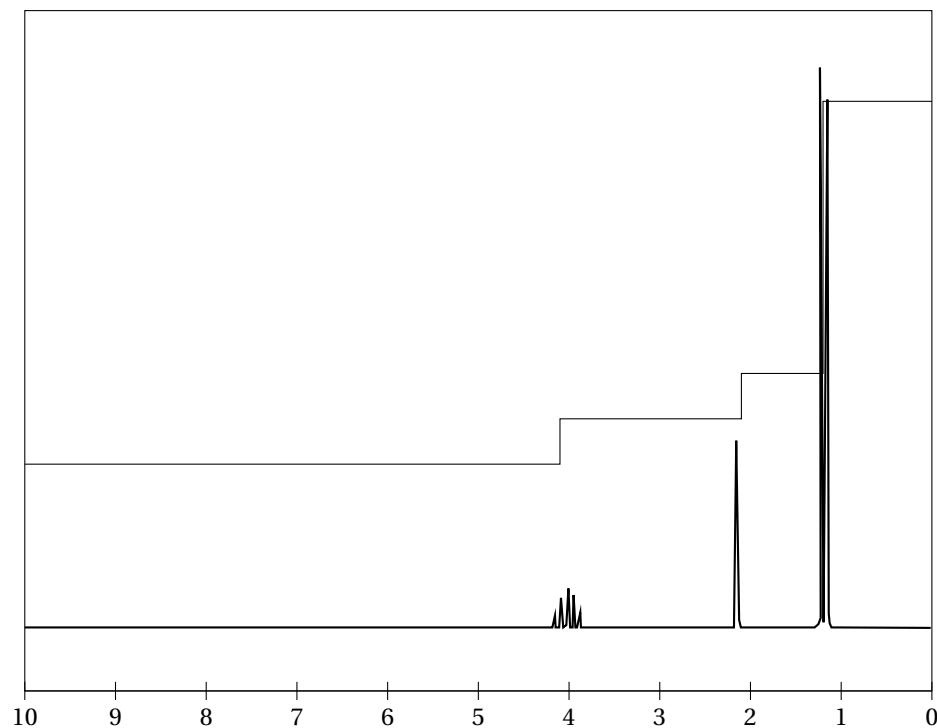
La formule topologique du MAM est représentée ci-dessous :



- Ecrire la formule semi-développée de cette molécule, en entourant son groupe caractéristique. Nommer la famille chimique associée.
- Quels pics le spectre RMN devrait présenter ?

### 3. Classe d'un alcool

Le spectre RMN d'un composé organique oxygéné A, de formule  $C_3H_8O$ , est donné ensuite.



- Ecrire la formule semi-développée de tous les isomères de formule brute  $C_3H_8O$ .
- Montrer que le spectre de la figure permet d'identifier le composé A sans ambiguïté. Le nommer.
- Quelle est la classe de cet alcool ?
- L'oxydation ménagée de l'alcool A précédent donne un composé B. Donner le nom et la formule de B.
- Quelle serait l'allure du spectre RMN de B ?

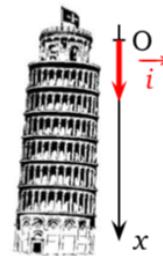
Table de données pour la spectroscopie RMN.

Type de proton	$\delta$ (ppm)
$CH_3 - C$	0,9
$CH_3 - C - O$	1,4
$C - CH_2 - C$	1,5
$CH_3 - CO - O - R$	2,0
$R - OH$	2,0
$CH_3 - CO - R$	2,2
$C - CH_2 - CO - O - R$	2,2
$C - CH_2 - CO - R$	2,4
$C - CH_2 - O$	3,3
$CH_3 - O - CO - R$	3,7
$C - CH_2 - O - CO - R$	4,1

► Exercice 1

## Galilée à Pise

Selon la légende, GALILÉE (1564-1642) aurait étudié la chute des corps en lâchant divers objets du sommet de la tour de PISE (Italie), sa ville de naissance. Il y fait référence dans deux ouvrages : *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* et *Discours concernant deux sciences nouvelles* dans lesquels il remet notamment en question les idées d'ARISTOTE. Dans cette partie, on présente trois courts extraits de ces deux livres. Il s'agit de retrouver certains résultats avancés par GALILÉE concernant la chute verticale dans l'air d'un boulet sphérique en fer, lâché sans vitesse initiale. Pour cette étude, on choisit le référentiel terrestre, supposé galiléen, auquel on adjoint un repère d'espace ( $Ox$ ) vertical orienté vers le bas



Donnée : Intensité du champ de pesanteur, supposé uniforme :  $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

### Etude des hauteurs de chute

Extrait n°1 :

« Avant tout, il faut considérer que le mouvement des corps lourds n'est pas uniforme : partant du repos, ils accélèrent continuellement (...). Si on définit des temps égaux quelconques, aussi nombreux qu'on veut, et si on suppose que, dans le premier temps, le mobile, partant du repos, a parcouru tel espace, par exemple une aune(\*), pendant le second temps, il en parcourra trois, puis cinq pendant le troisième (...) et ainsi de suite, selon la suite des nombres impairs. »

(\*) Une aune = 1,14 m.

Le boulet est lâché au point O, d'abscisse  $x_0 = 0$  à la date  $t_0 = 0$  S. On suppose l'action de l'air négligeable ; dans ce cas, l'équation horaire du mouvement du centre d'inertie G du boulet est :  $x(t) = \frac{1}{2}gt^2$ .

- Soient  $x_1$  la distance parcourue au bout de la durée  $\tau$ ,  $x_2$  la distance parcourue au bout de la durée  $2\tau$  et ainsi de suite, exprimer  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  en fonction de  $g$  et de  $\tau$ .
- Exprimer la différence  $h_1 = x_1 - x_0$  en fonction de  $g$  et de  $\tau$  puis les différences  $h_2 = x_2 - x_1$  et  $h_3 = x_3 - x_2$  en fonction de  $h_1$ .
- Retrouve-t-on la suite des hauteurs de chute annoncée par GALILÉE dans l'extrait n°1 ? Justifier.

### Etude de la durée de la chute

Les points de vue d'ARISTOTE et de GALILÉE, au sujet de l'influence de la masse  $m$  du boulet sur la durée totale  $\Delta t$  de sa chute, différent.

Extrait n°2 :

« Cherchons à savoir combien de temps un boulet, de fer par exemple, met pour arriver sur la Terre d'une hauteur de cent coudées(\*).

ARISTOTE dit qu'une « boule de fer de cent livres(\*\*), tombant de cent coudées, touche terre avant qu'une boule d'une livre ait parcouru une seule coudée », et je vous dis, moi, qu'elles arrivent en même temps.

Des expériences répétées montrent qu'un boulet de cent livres met cinq secondes pour descendre de cent coudées »

(\*) Une coudée correspond à une distance de 57 cm ;

(\*\*) Une livre est une unité de masse.

- Parmi les propositions ci-dessous, attribuer celle qui correspond à la théorie d'ARISTOTE et celle qui correspond à la théorie de GALILÉE :
  - La durée de chute augmente quand la masse du boulet augmente ;
  - La durée de chute diminue quand la masse du boulet augmente ;
  - La durée de chute est indépendante de la masse.
- En utilisant l'expression  $x(t) = \frac{1}{2}gt^2$ , calculer la durée  $\Delta t$  de la chute d'un boulet qui tombe d'une hauteur totale  $H = 57 \text{ m}$  (100 coudées).

Ce résultat est différent de la valeur annoncée dans l'extrait n°2. Proposer une explication à l'écart constaté.

## Galilée à Venise

En 1592, GALILÉE quitte PISE pour l'Université de PADOUE, dépendant de VENISE. Cette dernière ville possède un arsenal tout-à-fait considérable, et la légende raconte qu'il était inutile de chercher GALILÉE dans les salles de l'Université, que l'on avait plus de chance de le trouver sur les chantiers navals, dont il appréciait l'ambiance, et où il a pu faire preuve de son incroyable ingéniosité. GALILÉE a notamment le premier indiqué qu'il faut pointer les canons avec un angle de 45° afin de permettre la distance de tir la plus grande possible.

Dans les navires de guerre de l'époque, de lourds canons sont fixés au pont, et projettent des boulets de 200 livres (environ 100 kg) portant jusqu'à 1 200 toises (environ 2 400 m). La structure d'un navire est très robuste pour résister à la réaction considérable du boulet et leur échantillon(\*) est ordinairement très fort.

(\*) Echantillon : dimension et épaisseur des pièces utilisées en construction navale.

### Action de la poudre de canon sur le boulet

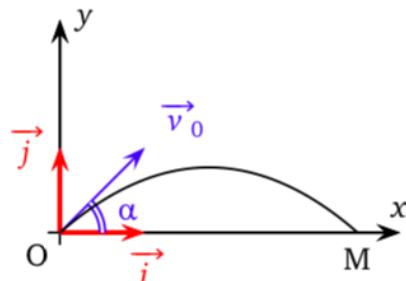
L'éjection du boulet est provoquée par la combustion de la poudre. Une force de poussée est donc exercée sur le boulet par l'ensemble {navire + canon + gaz}.

6. Justifier l'expression soulignée dans le texte encadré ci-dessus, à l'aide d'une des trois lois de NEWTON. Enoncer cette loi (on pourra s'aider d'un schéma).

### La trajectoire du boulet

On souhaite étudier la trajectoire du centre d'inertie G du boulet de masse  $m$ . L'étude est faite dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen. Le repère d'étude est  $(O, \vec{i}, \vec{j})$  et l'origine des dates est choisie à l'instant où le boulet part du point O.

Le vecteur vitesse initiale  $\vec{v}_0$  du point G est incliné d'un angle  $\alpha$  (appelé angle de tir) par rapport à l'horizontale. Une fois le boulet lancé, la force de poussée de la partie précédente n'intervient plus.



Données : boulet utilisé : volume  $V = 12,7 \text{ dm}^3 = 12,7 \text{ L}$  et masse  $m = 100 \text{ kg}$ .

La masse volumique du fer est  $\rho_{\text{fer}} = 7,873 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

La masse volumique de l'air est  $\rho_{\text{air}} = 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

7. Calculer la valeur de la poussée d'Archiméde. Grand prince, je vous donne gracieusement son expression littérale  $F_A = \rho_{\text{air}} g V$ .
8. Calculer la valeur P du poids du boulet après avoir précisé son expression littérale.
9. Dans cet exercice, on pourra négliger la poussée d'ARCHIMÉDE devant le poids si la valeur de ce dernier est au moins cent fois plus grande que celle de la poussée d'ARCHIMÉDE.  
Montrer que l'on est dans cette situation.
10. Pendant le vol, compte tenu de la masse, de la vitesse et de la forme du boulet, on fait l'hypothèse que les forces de frottement dans l'air sont négligeables devant le poids. En tenant compte de la remarque et des résultats précédents, établir le bilan des forces exercées sur le système {boulet} pendant le vol.

### Equation de la trajectoire

Dans toute cette partie, on négligera la poussée d'ARCHIMÉDE et on ne tiendra pas compte des forces de frottement dues à l'air.

11. En appliquant la deuxième loi de NEWTON, montrer que les équations horaires du mouvement du point G s'écrivent :

$$\begin{cases} x(t) = v_0 \cos \alpha t \\ y(t) = -\frac{1}{2} g t^2 + v_0 \sin \alpha t \end{cases} \quad (1)$$

12. Montrer que l'équation de la trajectoire peut se mettre sous la forme  $y(x) = Ax^2 + B$ . On donnera les expressions littérales de A et B et on prédira leurs unités respectives.

## ► Exercice 2

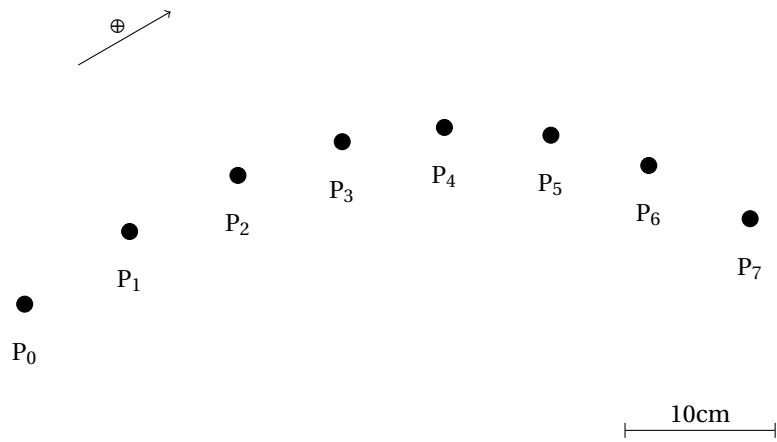
### 1. Choisir un référentiel d'étude

- (a) Pour chacun des mouvements suivants, préciser le référentiel d'étude adapté.
- (b) Une libellule sortant du bois pour aller envahir les salles P12 ou P14;
- (c) Le bus 13 dans son ascension de la voie romaine devant le lycée;
- (d) Un élève dans ce même bus, qui appuie sur le bouton « arrêt demandé »;
- (e) La station spatiale internationale en orbite autour de la Terre;
- (f) La planète Mars en orbite autour du Soleil.

### 2. Tracer des vecteurs vitesse et accélération

Le document donne l'enregistrement des positions successives du centre de gravité P d'un solide en mouvement. La durée entre deux marques consécutives est  $\tau = 60 \text{ ms}$ .

- (a) Calculer les valeurs des vitesses aux point  $P_2$  et  $P_4$ .
- (b) Tracer, à une échelle de 5 cm sur la feuille pour  $1\text{m/s}$ , les deux vecteurs vitesse correspondants.
- (c) Construire le vecteur  $\vec{\Delta v}_3 = \vec{v}_4 - \vec{v}_2$ .
- (d) En utilisant l'échelle précisée précédemment, calculer la valeur de ce vecteur.
- (e) En déduire la valeur de l'accélération  $\vec{a}_3$ .
- (f) Représenter le vecteur accélération  $\vec{a}_3$  à une échelle de 1 cm sur la feuille pour  $1\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ .



### ► Exercice 3

La station spatiale internationale ISS (International Space Station) est à ce jour le plus grand des objets artificiels placés en orbite terrestre une altitude de 400 km.

Elle est occupée en permanence par un équipage international qui se consacre la recherche scientifique dans l'environnement spatial. Jusqu'à présent, cinq vaisseaux cargos ATV ont permis de ravitailler la station ISS.

La station spatiale internationale, suppose ponctuelle et note S, évolue sur une orbite qu'on admettra circulaire, dont le plan est incliné de 51,6 ° par rapport au plan de l'équateur.

**Données :**

- rayon de la Terre :  $R = 6380 \text{ km}$  ;
- masse de la station :  $m = 435 \text{ tonnes}$  ;
- masse de la Terre, suppose ponctuelle :  $M = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$  ;
- constante de gravitation universelle :  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$  ;
- altitude de la station ISS :  $h = 400 \text{ km}$  ;
- expression de la valeur de la force d'interaction gravitationnelle  $F$  entre deux corps A et B ponctuels, de masses respectives  $m_A$  et  $m_B$ , distants de  $d = AB$  :

$$F = G \cdot \frac{m_A \cdot m_B}{d^2}$$

1. Représenter sur un schéma :

- la Terre et la station S, suppose ponctuelle ;
- un vecteur unitaire  $\vec{u}$  orient de la station S vers la Terre (T) ;
- la force d'interaction gravitationnelle exercée par la Terre sur la station S.

Donner l'expression vectorielle de cette force en fonction du vecteur unitaire  $\vec{u}$ .

2. En considérant la seule action de la Terre, établir l'expression vectorielle de l'accélération  $\vec{a}_S$  de la station dans le référentiel géocentrique, suppos galiléen, en fonction de  $G$ ,  $M$ ,  $h$ ,  $R$  et du vecteur unitaire  $\vec{u}$ .

3. Vitesse du satellite

(a) Montrer que, dans le cas d'un mouvement circulaire, la valeur de la vitesse du satellite de la station a pour expression :

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{R + h}}$$

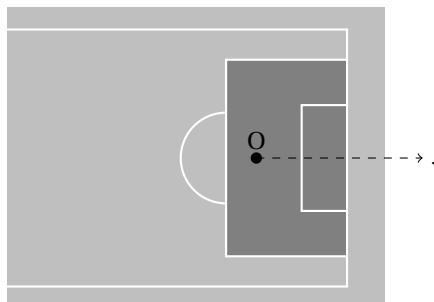
(b) Calculer la valeur de la vitesse de la station, en m/s.

4. Combien de révolutions autour de la Terre un astronaute présent à bord de la station spatiale internationale fait-il en 24 h ?

### ► Exercice 4

Antonin PANENKA, footballeur international tchécoslovaque, est connu pour avoir laissé son nom à une technique particulière pour tirer les penalty ou « tirs au but ». Au lieu de frapper en force, il frappe doucement le ballon qui prend alors une trajectoire en « cloche ». Son geste est devenu célèbre au soir de la finale de la Coupe d'Europe des Nations de 1976, où la Tchécoslovaquie battait la république Fédérale d'Allemagne tenante du titre. Antonin PANENKA marquant le dernier penalty par cette technique de balle « en cloche » venait d'inventer la « Panenka ».

Lors d'un match de football, un joueur doit tirer un penalty et décide de tenter une « Panenka ». Le joueur dépose le ballon au point de penalty O, pris comme origine du repère.

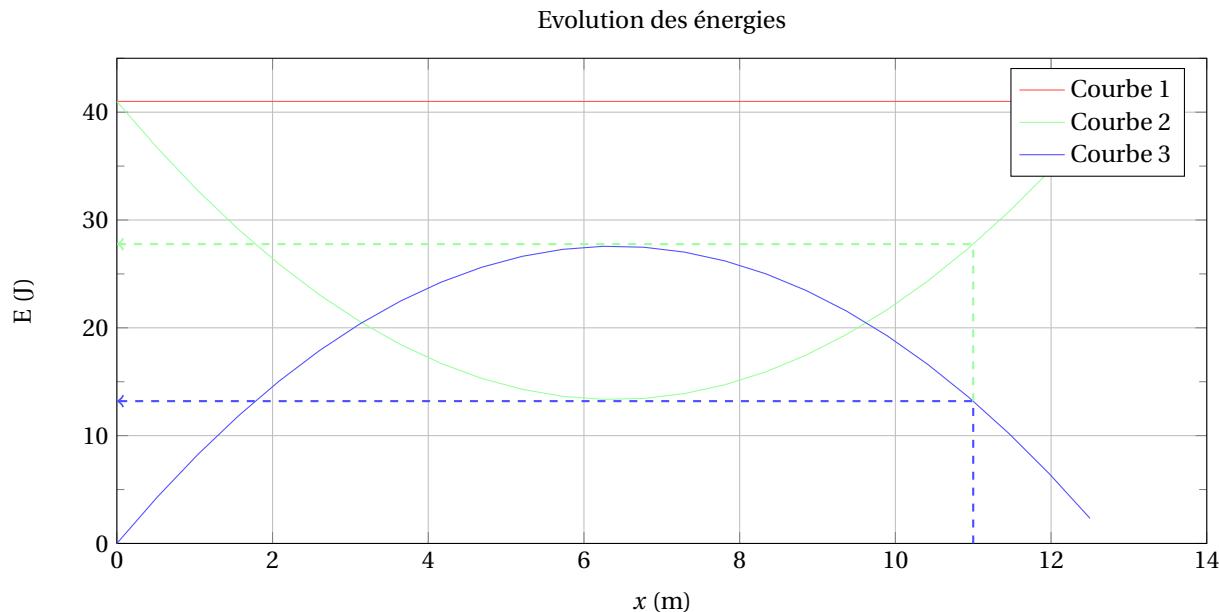


## Schématisation du problème

- Tracer un repère orthonormé ( $Ox, Oz$ ) et représenter, dans ce repère, la situation de penalty, sans souci d'échelle. Les grandeurs suivantes devront apparaître : le vecteur
- On note A le point où se situe le ballon lorsqu'il franchit la ligne de but. Quelles conditions doivent vérifier les coordonnées  $(x_A; z_A)$  de ce point pour que le penalty soit réussi ?

## Étude énergétique du mouvement du ballon

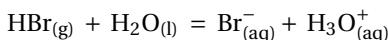
- On admet que le ballon passe au niveau de la ligne de but à une hauteur  $z_A = h_A$ . Rappeler les expressions de l'énergie cinétique  $E_c$ , de l'énergie potentielle de pesanteur  $E_{pp}$  et de l'énergie mécanique  $E_m$ . On choisira un axe vertical ascendant et une énergie potentielle de pesanteur nulle à l'origine. En explicitant votre raisonnement, associer à chaque courbe du document la forme d'énergie correspondante.
- À l'aide du document, déterminer les valeurs de la hauteur  $h_A$  et de la vitesse  $v_A$  lorsque le ballon franchit la ligne de but.
- Que peut-on dire de l'énergie mécanique du ballon lors de son mouvement ? Utiliser cette caractéristique du mouvement pour retrouver la valeur  $v_A$  de la vitesse du ballon lorsqu'il franchit la ligne de but et comparer le résultat trouvé avant. Conclure.



## ► Exercice 1

## 1. Montrer qu'une réaction est totale

Une solution S d'acide bromhydrique est obtenue en faisant réagir du bromure d'hydrogène avec de l'eau, selon la réaction d'équation :



La concentration molaire en soluté apporté est  $C = 4,00 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$ . Le volume de la solution est  $V = 50,0 \text{ mL}$  et son pH vaut  $\text{pH} = 2,4$ .

- (a) Rappeler ce qu'est un acide, selon la définition de Brönsted.
- (b) Etablir le tableau d'avancement de la réaction.
- (c) Calculer l'avancement maximal  $x_{\text{max}}$ , puis l'avancement final  $x_{\text{final}}$  de la réaction.
- (d) La réaction étudiée est-elle totale ? Comment cela se traduit-il dans l'écriture de l'équation de la réaction ?

## 2. Calculer une constante d'acidité

L'acide salicylique  $\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_3$ , extrait notamment de l'écorce de saule, donne lieu à un équilibre chimique avec l'eau.

- (a) Ecrire l'équation de la réaction correspondante.
- (b) Ecrire l'expression de la constante d'acidité  $K_a$  associée au couple de l'acide salicylique.
- (c) Pour un état d'équilibre donné, on a :

$$\begin{aligned} [\text{C}_7\text{H}_5\text{O}_3^-]_f &= [\text{H}_3\text{O}^+]_f = 1,8 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1} \\ [\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_3]_f &= 3,2 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1} \end{aligned}$$

Calculer la valeur de la constante d'acidité  $K_a$ .

- (d) En déduire la valeur du  $\text{pK}_a$  associée au couple de l'acide salicylique.
- (e) Calculer la valeur du pH de la solution considérée.

## 3. Montrer qu'un acide est faible dans l'eau

L'acide ascorbique, ou vitamine C, est présent dans de nombreux fruits. Une solution aqueuse d'acide ascorbique de volume  $V = 100 \text{ mL}$  est obtenue en dissolvant une masse  $m = 1,32 \text{ g}$  d'acide ascorbique  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6(\text{s})$  dans le volume d'eau nécessaire. Le pH de la solution préparée est égal à 2,6.

- (a) Etablir le tableau d'avancement de la réaction entre l'acide ascorbique  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6(\text{aq})$  et l'eau.
- (b) Calculer l'avancement maximal  $x$ , puis l'avancement final  $x$  de la réaction.
- (c) En déduire que l'acide ascorbique est un acide faible dans l'eau.
- (d) Calculer la valeur de la constante d'acidité  $K_a$  ainsi que la valeur du  $\text{pK}_a$ .

## ► Exercice 2

La glycine est l'acide  $\alpha$ -aminé le plus simple. La formule semi-développée de la glycine est la suivante :



1. En solution aqueuse, la glycine ne reste pas sous la forme semi-développée indiquée ci-dessus, mais subit un échange de proton intramoléculaire aboutissant à la formation d'un amphion. Donnez la formule semi-développée de cet amphion.
2. L'amphion est un ampholyte. Donnez la définition de ce terme.
3. Donnez les formules semi-développées des couples acide/base auxquels appartient l'amphion.
4. Tracer le diagramme de prédominance de la glycine. Pour ce diagramme, si vous estimez que les formules semi-développées sont un peu difficiles à recopier, vous pouvez noter le cation  $\text{AH}_2^+$ , l'amphion  $\text{AH}^+$  et l'anion  $\text{A}^-$ .

Données :  $\text{pK}_{a1} = 2,3$  et  $\text{pK}_{a2} = 9,8$ .

## ► Exercice 3

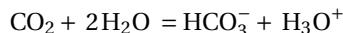
Le pH des liquides biologiques doit être maintenu dans des fourchettes étroites pour que la vie soit possible. Un changement de pH perturberait très sérieusement le métabolisme des organismes vivants. Les différents milieux disposent de systèmes tampon performant pour maintenir constant leur pH.

L'objectif de l'exercice est de comprendre le maintien et la régulation du pH des milieux biologiques, puis d'effectuer une étude de l'acide lactique, acide intervenant dans des processus biologique de notre organisme.

Données : pour un couple acido-basique symbolisé A/B, on peut écrire :

$$pH = pK_a + \log \frac{[A^-]}{[AH]}$$

Demi-équation associée au couple  $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$  :



### 1. Les solutions tampon : maintien du pH des milieux biologiques

#### Document 1

Dans les milieux biologiques, les systèmes tampon amortissent les variations de pH lorsqu'il y a une perturbation de l'équilibre acide-base. L'effet du système tampon est plus efficace si la concentration en chacune des espèces le constituant est grande et si le  $pK_a$  du système tampon est proche du pH des milieux biologiques ; l'effet est maximum lorsque  $pH = pK_a$ .

Dans le corps humain, le pH du sang et des fluides extracellulaires varie peu autour de 7,4 et le pH normal intracellulaire est de 6,8 à 7,0 selon les cellules.

Ainsi, le pH intracellulaire est maintenu pratiquement constant grâce au système « phosphate »  $\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{HPO}_4^{2-}$ .

#### Document 2

Un autre système tampon important dans l'organisme fait intervenir le couple dioxyde de carbone / ion hydrogénocarbonate. Dans les conditions normales de respiration, la concentration molaire en dioxyde de carbone dans le sang est telle que :

$$[\text{CO}_2] = \alpha \times p(\text{CO}_2)$$

$\alpha$  est la constante de solubilité de valeur  $\alpha = 0,030 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{mmHg}^{-1}$  et  $p(\text{CO}_2)$  la pression partielle du dioxyde de carbone dans l'alvéole pulmonaire exprimée en millimètre de mercure (mmHg). Sa valeur est normalement  $p(\text{CO}_2) = 40 \text{ mmHg}$ . La concentration molaire des ions hydrogénocarbonate est  $[\text{HCO}_3^-] = 24 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ .

- Donner une estimation de la valeur du  $pK_a$  du couple  $\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{HPO}_4^{2-}$ .
- Sachant que le  $pK_a$  du couple  $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$  est égal à 6,1 à 37°, montrer que le pH du sang humain est maintenu à la valeur habituelle dans les conditions normales de respiration.

### 2. Les perturbations et les mécanismes régulateurs

#### Document 3

Les perturbations portant sur la régulation du pH dans l'organisme peuvent provenir du métabolisme. Par exemple, les acidoses métaboliques peuvent être dues à une activité physique importante au cours de laquelle un acide est fabriqué par l'organisme suite à une mauvaise oxygénation des tissus.

Dans les acidoses métaboliques, la réaction ventilatoire est rapide, elle implique une hyperventilation pour abaisser la quantité de dioxyde de carbone dans le sang, qui doit normalement diminuer en quelques minutes.

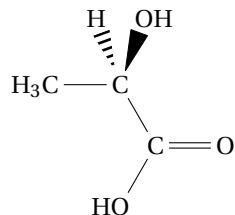
Le sang contient, à l'état normal,  $1,65 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  d'ions hydrogénocarbonate et  $0,060 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  de dioxyde de carbone dissous, les concentrations en base et en acide pouvant être régulées par contrôle de leur excrétion :  $\text{CO}_2$  par voie respiratoire (rapide) et  $\text{HCO}_3^-$  par voie rénale (lente).

A l'aide de l'expression de la constante d'acidité du couple  $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$ , expliquer comment une hyperventilation permet de corriger une acidose métabolique.

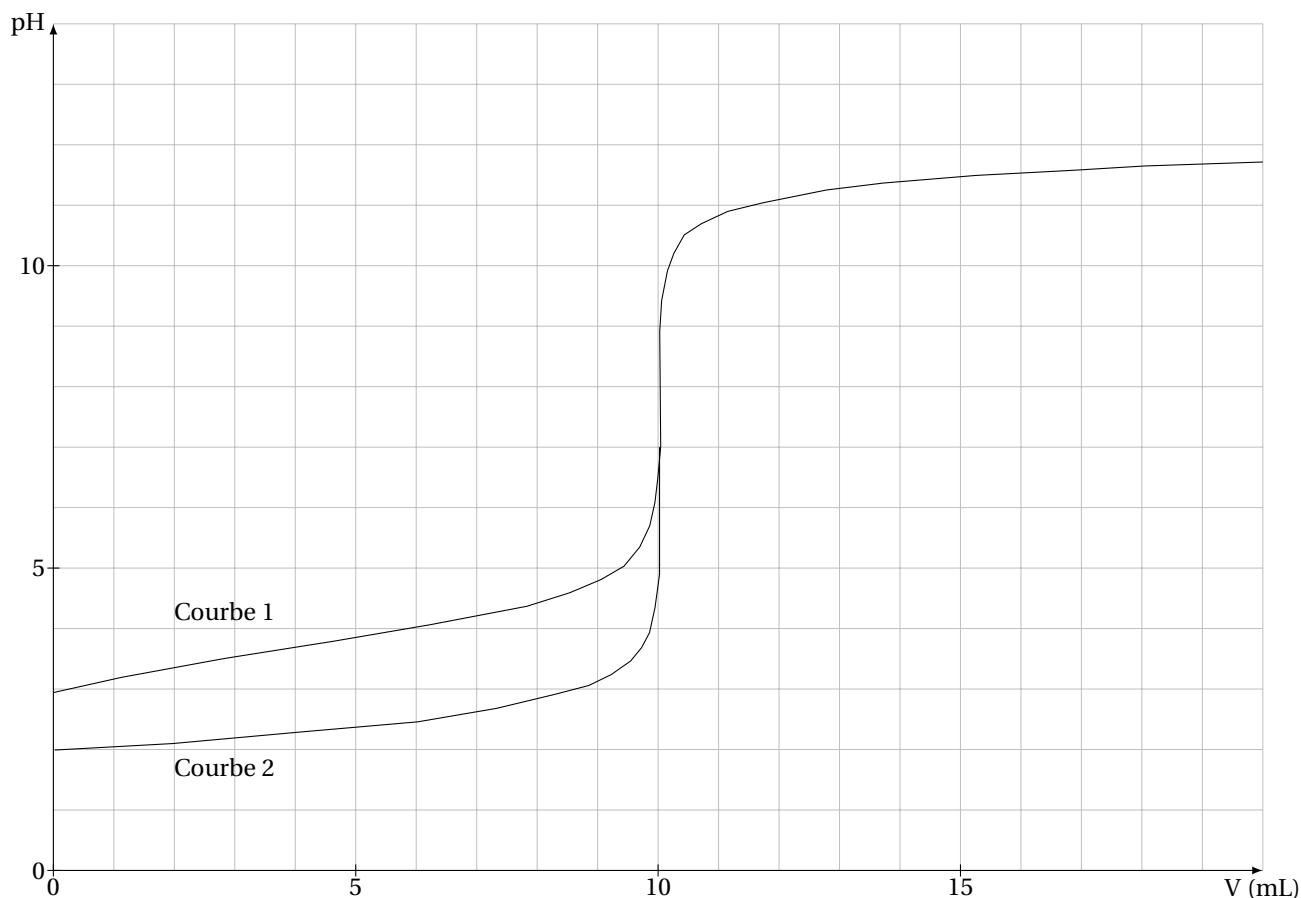
### 3. Un acide de l'organisme : l'acide lactique

L'acide produit par l'organisme lors d'une acidose métabolique est l'acide lactique. C'est un acide faible de formule brute  $C_3H_6O_3$ .

- (a) Recopier la représentation de l'acide lactique figurant ci-dessous, puis entourer et nommer les groupes caractéristiques.



- (b) La figure représente deux courbes de titrage pH-métrique de deux solutions aqueuses acides différentes par une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium. Les deux acides sont l'acide chlorhydrique, un acide fort et l'acide lactique, un acide faible.



La concentration molaire en soluté apporté des deux solutions aqueuses d'acide est  $c = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$ .

- Calculer le pH de la solution d'acide fort avant l'ajout de la solution aqueuse de soude et en déduire la courbe correspondant à son titrage pH-métrique.
- L'acide lactique est l'acide du couple  $\text{CH}_3 - \text{CHOH} - \text{COOH}/\text{CH}_3 - \text{CHOH} - \text{COO}^-$ . Ecrire l'équation de la réaction de titrage de l'acide lactique par la solution aqueuse d'hydroxyde de sodium.
- Quelles propriétés doit avoir une réaction de dosage ?
- Définir l'équivalence.
- Utiliser la méthode des tangentes pour déterminer les coordonnées du point équivalent ( $V_E, pH_E$ ). Le tracé doit rester apparent sur l'annexe, à rendre avec la copie.
- On envisage de recommencer ce dosage de façon régulière et on souhaite gagner du temps. Pour cette raison on envisage un dosage colorimétrique et non pH-métrique. Voici quelques indicateurs colorés typiques, indiquer et justifier quel indicateur pourrait convenir, et décrire le ou les changements de couleur qui seraient observés à l'équivalence.

Indicateur coloré	Teinte acide	Teinte basique	$pK_a$
Hélianthine	Jaune orangé	Rouge	3,7
Vert de bromocrésol	Jaune	Bleu	4,7
Bleu de bromothymol	Jaune	Bleu	7,0
Phénolphtaléine	Incolore	Fuschia	9,4

- vii. Montrer que pour un volume de solution aqueuse de soude ajouté égal à  $\frac{V_E}{2}$ , le pH de la solution vaut  $pK_a$ . En déduire une estimation du  $pK_a$  de l'acide lactique.

## ► Exercice 4

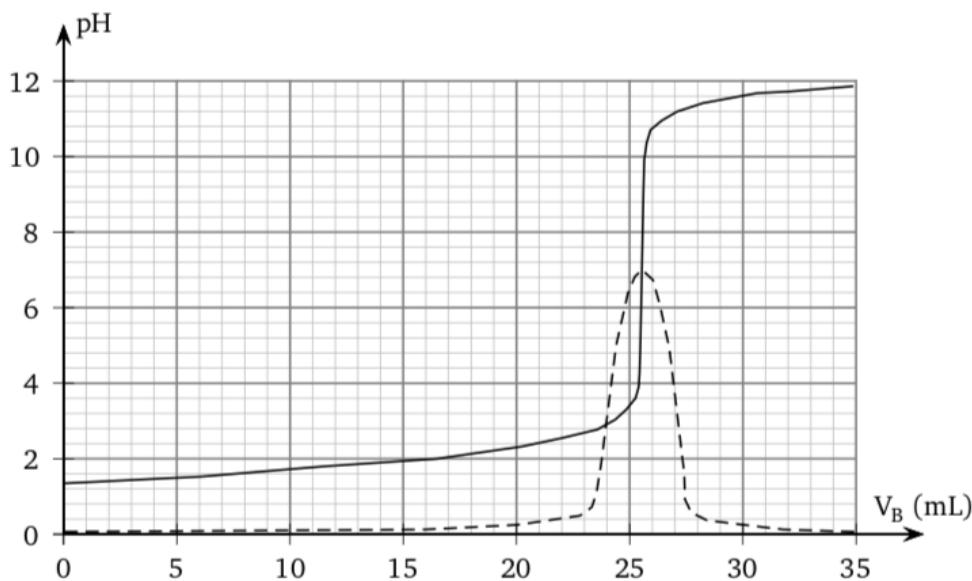
*L'aquariophilie est une passion qui touche de plus en plus d'amateurs mais aussi de néophytes. De nombreux facteurs peuvent contribuer à un déséquilibre dangereux pour la vie et la santé des poissons. Il est donc nécessaire de contrôler régulièrement la qualité de l'eau.*

*Le pH de l'eau est la première grandeur qu'il faut mesurer, au moins une fois par semaine, et ajuster éventuellement. En effet, certains poissons ne peuvent évoluer que dans un milieu acide (c'est le cas des poissons d'Amazonie comme les Néons ou les Tétras), d'autres dans un milieu basique (c'est le cas des poissons d'Amérique Centrale comme les Platys et les Mollys). Aucun de ces poissons ne tolère une trop forte teneur en ions ammonium  $\text{NH}_4^+$  ou en ions nitrite  $\text{NO}_2^-$  : le cycle de l'azote doit donc être surveillé en évitant soigneusement la surpopulation de l'aquarium et l'excès de nourriture.*

*D'après « Poissons et aquariums »— édition Larousse.*

### 1. Etude d'une solution commerciale destinée à diminuer le pH de l'aquarium

Sur l'étiquette du produit on peut lire que la solution commerciale  $S_0$  est constituée d'acide chlorhydrique (+) mais aucune concentration n'est indiquée. La transformation conduisant à l'acide chlorhydrique étant totale, la concentration  $c_0$  de la solution commerciale est égale à la concentration en ions  $\text{H}_3\text{O}^+$ . On cherche à déterminer cette concentration en faisant un titrage pH-métrique. Pour cela on dilue 50 fois la solution commerciale et on procède au titrage d'un volume  $V_A = 20,0 \text{ mL}$  de la solution diluée  $S_A$  à l'aide d'une solution d'hydroxyde de sodium  $S_B$  de concentration molaire en soluté apporté  $c_B = 4,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ . On obtient la courbe de la figure. On a également fait apparaître la courbe représentant la dérivée du pH en fonction du volume de soude versé.



- Ecrire l'équation de la réaction support du titrage.
- Quelles propriétés doit avoir une réaction de dosage ?
- Définir l'équivalence.
- En déduire la valeur de la concentration des ions oxonium dans la solution diluée  $S_A$ .
- Montrer que dans la solution commerciale, la concentration des ions oxonium  $\text{H}_3\text{O}^+$  est voisine de  $2,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ . Cette valeur sera utilisée pour la suite de l'exercice.

vi. Parmi les indicateurs suivants, lequel utiliser comme indicateur de fin de réaction du dosage et pourquoi ?

Indicateur coloré	Teinte acide	Teinte basique	
Hélianthine	Jaune orangé	Rouge	3,7
Vert de bromocrésol	Jaune	Bleu	4,7
Bleu de bromothymol	Jaune	Bleu	7,0
Phénolphtaléine	Incolore	Fuschia	9,4

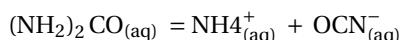
vii. Représenter son diagramme de prédominance.

viii. Décrire le changement de couleur observé lors de l'équivalence.

ix. On désire diminuer le pH de l'eau de l'aquarium et l'amener à une valeur proche de 6 alors qu'il était initialement égal à 7. Sur le mode d'emploi du fabricant on peut lire qu'il faut verser, en une fois, 20 mL de la solution commerciale dans 100 L d'eau. Pour simplifier le calcul, on considérera que le volume final reste égal à 100 L. Quelle serait la valeur du pH final de l'eau de l'aquarium s'il n'y avait qu'une simple dilution des ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  ?

## 2. Etude de la formation des ions ammonium.

L'urée, de formule  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ , est un polluant de l'aquarium. Elle est contenue dans les déjections de certains poissons et conduit, au cours d'une réaction lente, à la formation d'ions ammonium et d'ions cyanate  $\text{OCN}^-$  selon l'équation :



L'étude de la cinétique de cette réaction (1) peut être réalisée par conductimétrie. Pour cela on prépare un volume  $V = 100,0 \text{ mL}$  d'une solution d'urée de concentration molaire en soluté apporté égale à  $c = 0,020 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  et on suit sa décomposition en la maintenant dans un bain marie à  $45^\circ\text{C}$ . à différentes dates, on mesure la conductivité  $\sigma$  de la solution.

(a) Montrer que la concentration de la solution en ions  $\text{NH}_4^+$  peut être déterminée à partir de la mesure de la conductivité  $\sigma$  de la solution, les conductivités molaires ioniques étant connues.

(b) *Evolution du système chimique*

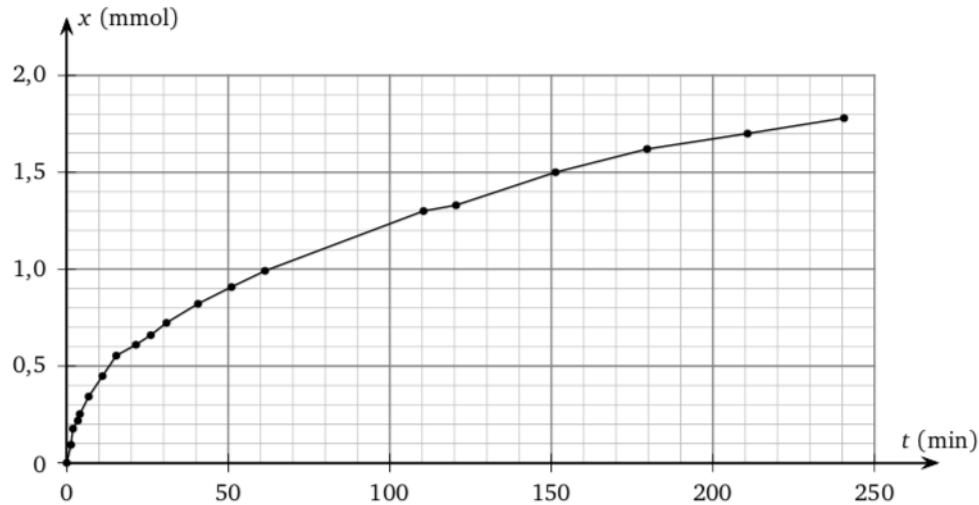
i. Compléter littéralement le tableau descriptif de l'évolution du système.

Équation		$(\text{NH}_2)_2\text{CO}_{(\text{aq})} \rightleftharpoons \text{NH}_4^+_{(\text{aq})} + \text{OCN}^-_{(\text{aq})}$		
État	Avancement (mol)	Quantités de matière (mol)		
État initial	$x = 0$			
État en cours	$x$			
État final en considérant la réaction totale	$x_{\text{max}} =$			

ii. En déduire la relation, à chaque instant, entre la concentration en ions ammonium en solution et l'avancement de la réaction.

iii. Calculer l'avancement maximal  $x_{\text{max}}$ .

- (c) On peut représenter l'évolution de l'avancement de la réaction en fonction du temps. Par lecture graphique, trouver  $x_{110} = x(t=110 \text{ min})$  l'avancement à l'instant de date  $t = 110 \text{ min}$  et en déduire le taux d'avancement  $\tau = \frac{x_{110}}{x_{\max}}$ .



- (d) En poursuivant l'expérience pendant une durée suffisante, on obtient une concentration finale :  $[\text{NH}_4^+]_f = 2,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ .

Déterminer le taux d'avancement final de cette transformation. Cette transformation est-elle totale ?

- (e) Les ions ammonium finissent par se transformer en ions nitrate dont l'accumulation risque de compromettre la vie des poissons. Ces derniers ions constituent un aliment essentiel pour les plantes vertes de l'aquarium. Expliquer pourquoi dans les livres d'aquariophilie, on dit que l'aquarium doit être « bien planté ».

## ► Exercice 1

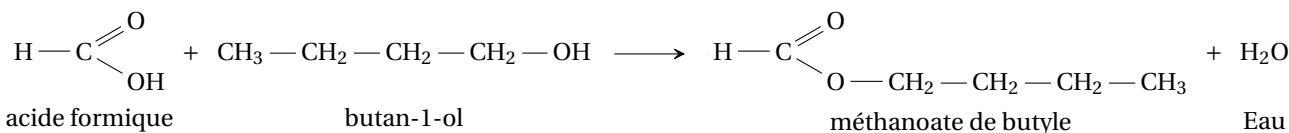
Les esters ont souvent une odeur agréable. On les trouve naturellement dans les fruits dont ils sont souvent responsables de l'arôme. La parfumerie et l'industrie alimentaire utilisent aussi les esters et les obtiennent par extraction ou par synthèse. De tout temps, certains « nez » éduqués ont été capables de distinguer des odeurs très voisines et d'identifier ainsi des esters. De nos jours, les espèces organiques peuvent être identifiées par des méthodes spectroscopiques (infrarouge, résonance magnétique nucléaire, etc.).

Il est relativement aisément de passer d'un produit ayant une odeur âcre, comme l'acide formique, à l'odeur fruitée d'un ester. C'est ce qu'illustre le protocole décrit ci-après de la synthèse du méthanoate de butyle à partir de l'acide formique.

**Protocole**

Préparer un bain-marie à une température d'environ 50 °C. Sous la hotte, verser dans un erlenmeyer 7,5 mL d'acide formique, puis 18,0 mL de butan-1-ol, et ajouter 3 gouttes d'acide sulfurique concentré. Surmonter l'rlenmeyer contenant le mélange d'un réfrigérant à air, le placer dans le bain-marie et assurer une agitation douce.

L'équation de la réaction de synthèse est :



On se propose d'étudier les caractéristiques de la synthèse du méthanoate de butyle à partir de l'acide formique puis d'identifier des esters.

**1. Réaction de synthèse du méthanoate de butyle et son mécanisme**

- Quel est le nom en nomenclature officielle de l'acide formique ?
  - Recopier l'équation de la réaction de synthèse étudiée en utilisant une écriture topologique. Encadrer les groupes caractéristiques et nommer les fonctions correspondantes.
  - Décrire la modélisation de l'étape ① du mécanisme réactionnel dans le **document 1**.
  - Après avoir recopié les étapes ② et ③, compléter chaque étape à l'aide des flèches courbes nécessaires. Pour chacun des cas, indiquer s'il s'agit d'une formation ou d'une rupture d'une liaison.
  - Comment peut-on expliquer l'existence des charges positives portées par les atomes d'oxygène et de carbone dans l'étape ③ ?
- Données :  $Z(\text{C}) = 12$  et  $Z(\text{O}) = 16$ .

**2. Optimisation du protocole de synthèse**

- Le mélange de réactifs dans le protocole décrit est-il stoechiométrique ? Justifier.
- Identifier dans le **document 2**, la courbe correspondant au protocole décrit. Justifier.
- Déterminer le rendement de la synthèse dans le cas de ce protocole.
- Effectuer une analyse détaillée de l'influence des conditions expérimentales sur la synthèse du méthanoate de butyle.
- Présenter les conditions optimales de la synthèse du méthanoate de butyle et les justifier.

**Données**

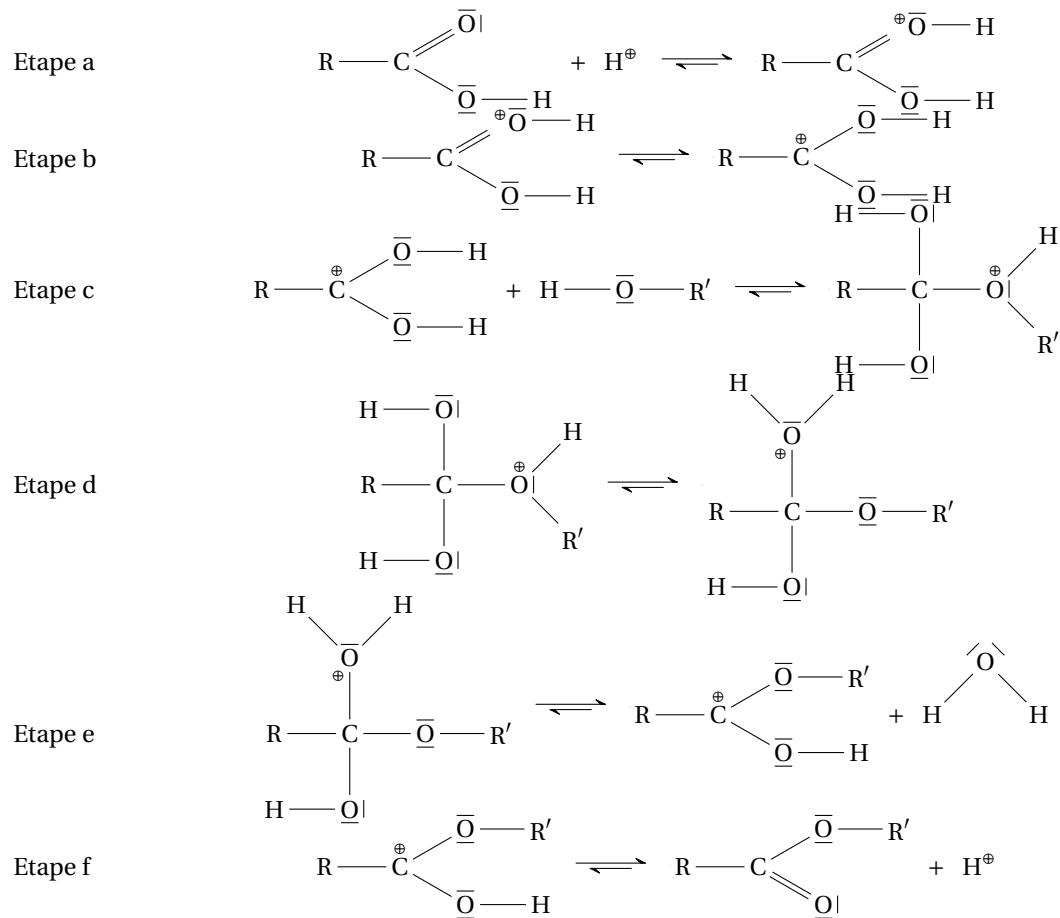
TAB. 2 – Masses molaires moléculaires et densités.

Espèce chimique	masse molaire moléculaire	Densité
	(g.mol <sup>-1</sup> )	
acide formique	46,0	1,22
butan-1-ol	74,0	0,81

- Masse volumique de l'eau :  $\rho_{\text{eau}} = 1,0 \text{ g.ml}^{-1}$  ;
- Masses molaires atomiques :  $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$  ;  $M(\text{O}) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$ .

## Documents de l'exercice 1

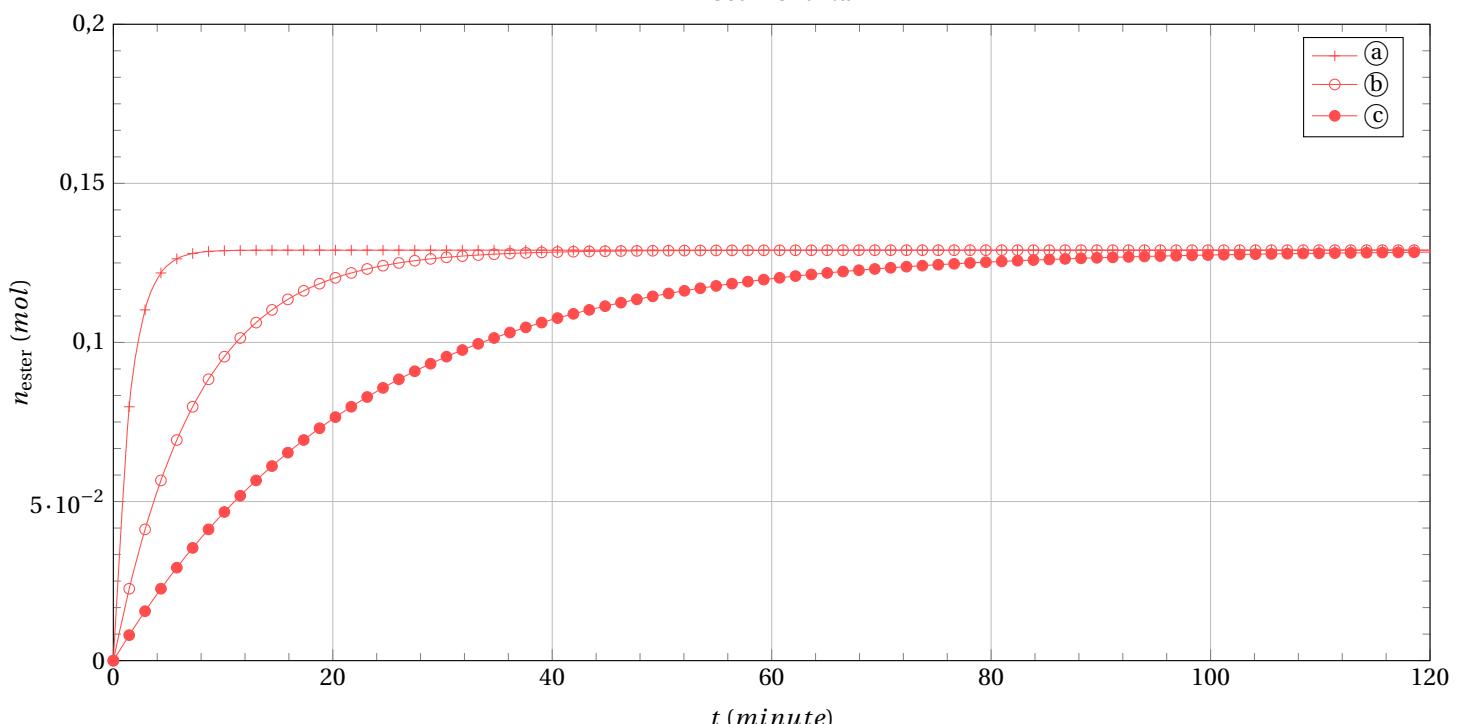
### Document 1 – Mécanisme réactionnel de la synthèse du méthanoate de butyle.



### Document 2 – Etude expérimentale de la synthèse du méthanoate de butyle

Pour optimiser cette synthèse, des études expérimentales sont menées dans différentes conditions. La quantité initiale de butan-1-ol utilisée est celle du protocole. Les résultats sont représentés par les graphiques ci-dessous.

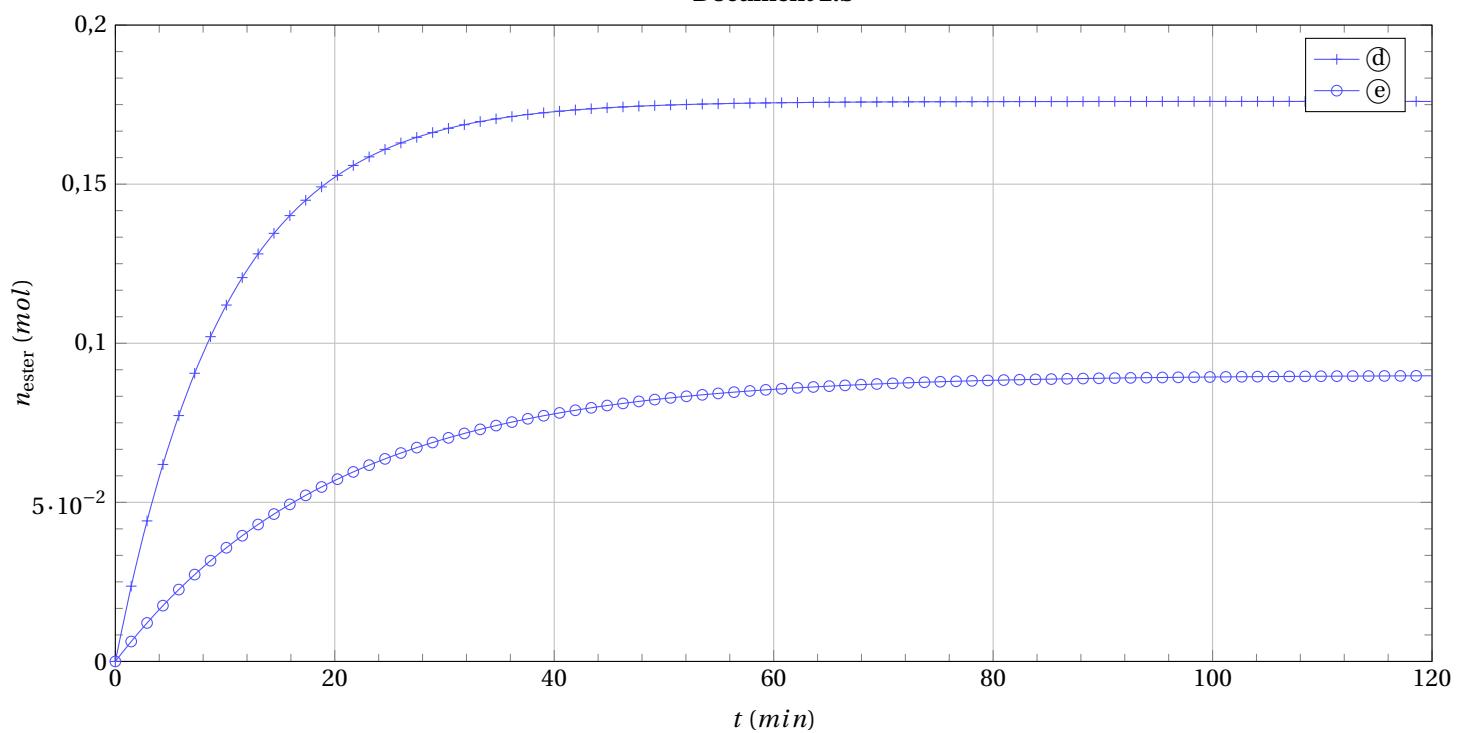
#### Document 2.a



a : 50 °C, avec ajout d'acide sulfurique, réactifs en proportions stœchiométriques.

b : 20 °C, avec ajout d'acide sulfurique, réactifs en proportions stœchiométriques.

c : 50 °C, sans ajout d'acide sulfurique, réactifs en proportions stœchiométriques.

**Document 2.b**

d : 20 °C, avec ajout d'acide sulfurique, acide formique en excès .

e : 20 °C, avec ajout d'acide sulfurique, réactifs en proportions stoechiométriques.

## ► Exercice 2

Utilisé dans la synthèse automatisée des peptides mise au point par Robert Bruce Merrifield, le dicyclohexylcarbodiimide (DCC) est un réactif utile dans la synthèse des amides à partir des acides carboxyliques. Sa structure est représentée sur la fig1.

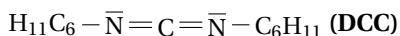


FIGURE 1 – Le dicyclohexylcarbodiimide

1. En justifiant la réponse, identifier le site accepteur de doublet d'électrons dans le groupe  $-\bar{\text{N}} = \text{C} = \bar{\text{N}} -$ .

On étudie la synthèse du N-méthyléthanamide  $\text{CH}_3 - \text{CO} - \text{NH} - \text{CH}_3$  à partir de l'acide éthanoïque  $\text{CH}_3 - \text{CO}_2\text{H}$ . La première étape du mécanisme réactionnel est représentée sur la fig2.

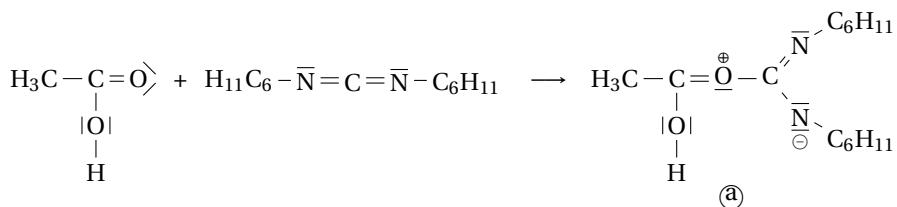


FIGURE 2 – Première étape du mécanisme réactionnel

2. Recopier cette étape. En justifiant, identifier le site donneur de doublet d'électrons dans l'acide éthanoïque. Le relier par une flèche courbe au site accepteur du DCC, identifié à la question 1., et représenter toute autre flèche courbe qui explique la formation de l'espèce ④.
3. Après réarrangement interne de l'espèce ④ en une espèce ⑤, l'étape suivante passe par la réaction de la méthanimine sur l'espèce ⑤, représenté sur la fig3.

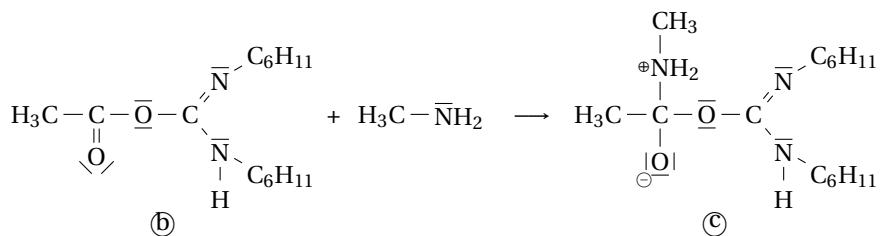


FIGURE 3 – étape suivante du mécanisme réactionnel

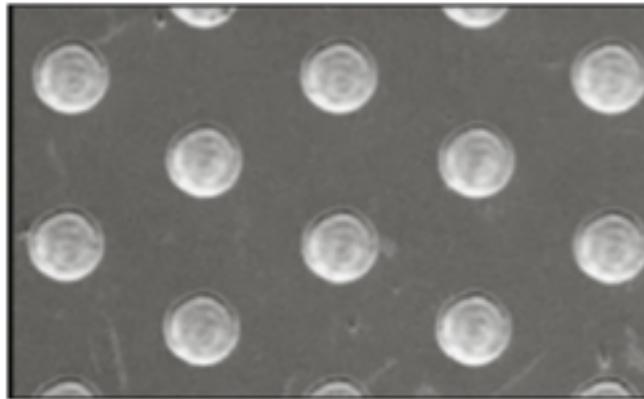
- En justifiant, identifier le site donneur de doublet d'électrons dans la méthanimine.
- En justifiant, identifier le site accepteur de doublet électrons sur la liaison double  $\text{C} = \text{O}$  de l'espèce ④.
- Recopier la troisième étape. Relier par une flèche courbe les sites donneur et accepteur identifiés aux questions 3.a. et 3.b. et représenter toute autre flèche courbe qui explique la formation de l'espèce ⑤.

**Données** Les valeurs de l'électronégativité, dans l'échelle actuelle de Pauling, des éléments carbone, azote et oxygène, sont respectivement égales à 2,6, à 3,0 et à 3,4.

### ► Exercice 1

La micro texturation de surface est une technologie qui permet d'optimiser la lubrification des pièces métalliques en contact, par exemple dans les moteurs employés dans les sports mécaniques (Formule 1, moto grand prix, etc.).

Cette micro texturation est réalisée sur des matériaux appelés DLC (Diamond Like Carbon) déposés en fines couches sur les pièces à lubrifier.

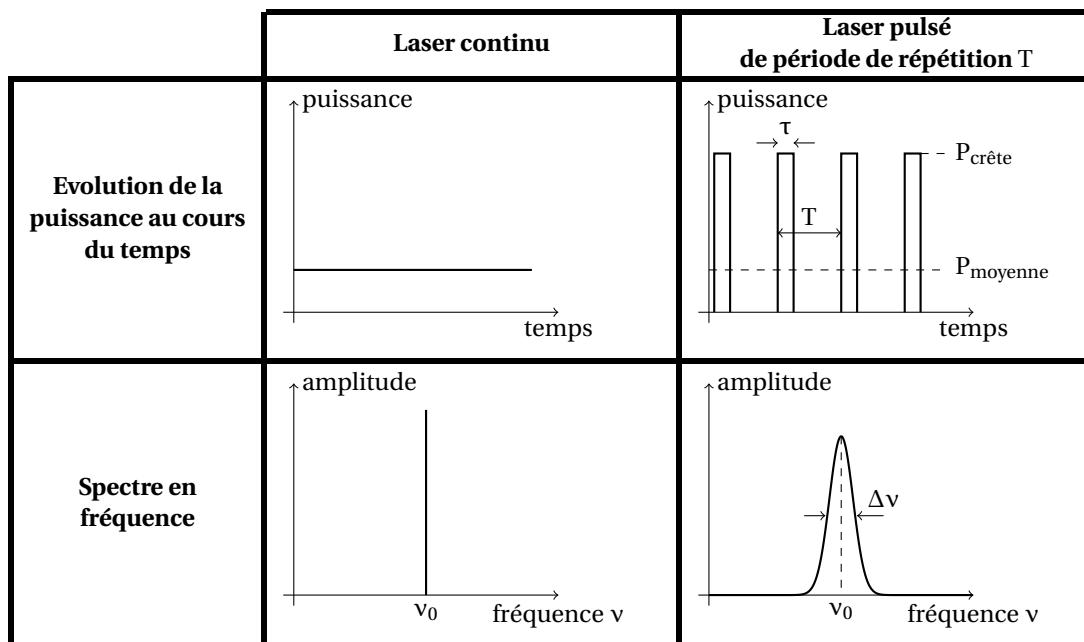


Grâce à l'utilisation d'un laser à impulsions ultra-brèves, on crée à la surface des pièces mécaniques un réseau de motifs (cavités, rainures, etc.) ayant des dimensions de quelques dizaines de micromètres qui se comportent comme des micros réservoirs d'huile (après lubrification).

#### Les lasers pulsés

A la différence d'un laser conventionnel qui produit un rayonnement continu, les lasers pulsés émettent des flashes lumineux très brefs qu'on appelle des impulsions. La durée  $\tau$  et la cadence (fréquence)  $f$  de ces impulsions sont réglables. Un laser pulsé est dit « femtoseconde » si la durée  $\tau$  est de l'ordre d'une à quelques centaines de femtosecondes. Contrairement aux lasers continus qui produisent un rayonnement monochromatique, les lasers pulsés émettent un rayonnement polychromatique dans une bande de fréquence de largeur  $\Delta v$  centrée sur une fréquence  $v_0$  (voir schéma). Les énergies des impulsions femtosecondes peuvent paraître faibles (de l'ordre du mJ à  $f = 1 \text{ kHz}$  mais leur brièveté fait que la puissance instantanée du laser durant une impulsion (puissance de crête) peut atteindre plusieurs gigawatts dans le domaine industriel.

TAB. 3 – Comparaison d'un laser « continu » et d'un laser pulsé.



TAB. 4 – Caractéristiques techniques d'un laser « femtoseconde » infrarouge.

Caractéristique	Valeur
Fréquence centrale du rayonnement émis	$v_0 = 375$ terahertz
Largeur de la bande de fréquence d'émission	$\Delta v = 100$ terahertz
Cadence (fréquence) des impulsions	$f = 1,0$ kHz
Durée d'une impulsion	$\tau = 150$ fs
Puissance de crête atteinte durant une impulsion	$P_{\text{crête}} = 1,0$ GW
Diamètre de la section circulaire du faisceau	$D = 98$ $\mu\text{m}$

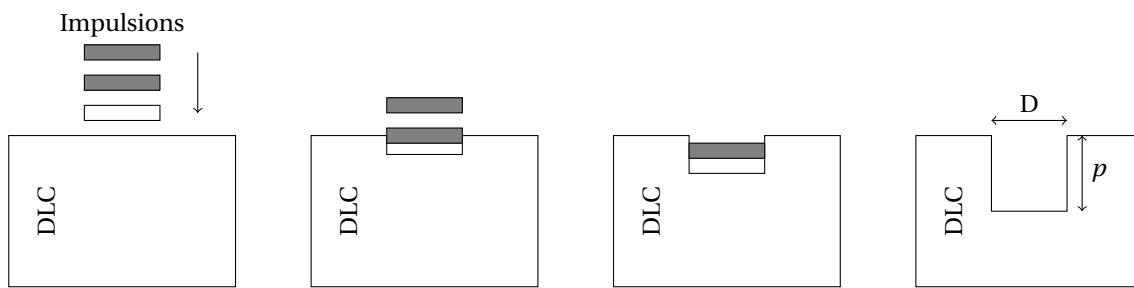
### Cavité de diamètre D et de profondeur p dans une couche de DLC

Lorsqu'on dirige un faisceau laser pulsé femtoseconde vers une surface recouverte de DLC, chaque impulsion laser apporte suffisamment d'énergie pour graver (creuser) une cavité cylindrique dans la couche de DLC. On admet que le diamètre de la cavité gravée correspond au diamètre D du faisceau laser utilisé.

On a tracé ci-dessous la courbe donnant le taux d'ablation du DLC par impulsion, c'est-à-dire la profondeur de la cavité gravée par une seule impulsion laser, en fonction de la fluence F du laser utilisé.

La fluence est obtenue en divisant l'énergie d'une impulsion laser (en Joule) par la surface circulaire gravée (en  $\text{cm}^2$ ).

On admettra, comme le montrent les schémas ci-dessous, que la profondeur totale p de la cavité gravée est proportionnelle au nombre d'impulsions reçues et donc à la durée  $\Delta t$  de la gravure.



### Données

- La valeur de la célérité de la lumière dans le vide (ou dans l'air) doit être connue par le candidat ;
- Constante de Planck :  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J.s.

#### 1. Caractéristiques d'une impulsion du laser femtoseconde

- Montrer que l'énergie transportée par une seule impulsion du laser précédent est égale à 0,15 mJ.
- Evaluer le nombre de photons produits par le laser durant une seule impulsion.

#### 2. Gravure par le laser femtoseconde

On utilise le laser femtoseconde pour graver une cavité dans une couche de DLC.

Déterminer la fluence du laser étudié, puis la durée  $\Delta t$  nécessaire à la gravure d'une cavité circulaire cylindrique de 98  $\mu\text{m}$  de diamètre et de 6  $\mu\text{m}$  de profondeur.

## ► Exercice 2

Rendue possible par la découverte de la nature ondulatoire de la matière par Louis de Broglie en 1924, la microscopie électronique a été inventée en 1931 et sans cesse développée depuis. Alors que les microscopes optiques classiques permettent de voir des détails allant jusqu'au dixième de micromètre, la résolution des meilleurs microscopes électroniques actuels est inférieure au dixième de nanomètre.

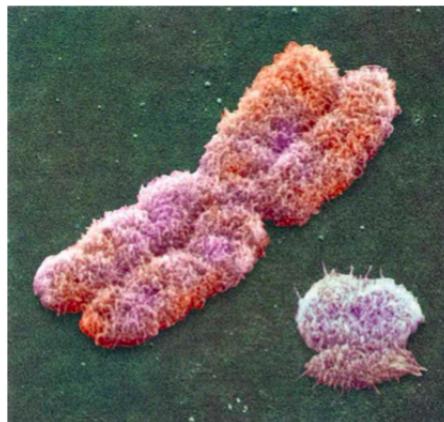


FIGURE 1 – Les chromosomes sexuels humains vus par un microscope électronique

Le principe général de fonctionnement d'un microscope électronique est le même que celui d'un microscope optique : l'objet à analyser est éclairé et des lentilles permettent de grossir son image. Mais au lieu d'éclairer avec de la lumière, le microscope électronique utilise un faisceau d'électrons produit par un canon à électrons. Au lieu de grossir l'image à l'aide de lentilles en verre, il emploie des lentilles magnétiques.

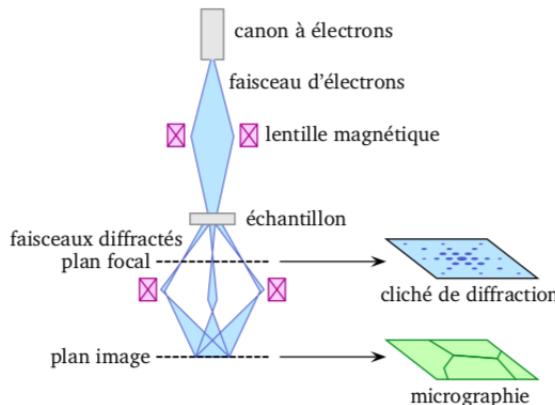


FIGURE 2 – Principe d'un microscope électronique en transmission

### Données

- masse d'un électron :  $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$  kg;
- charge élémentaire :  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C;
- constante de Planck :  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s;
- conversion d'énergie : 1 eV =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  J.

#### 1. Etude du canon à électrons

Le canon à électrons comporte une électrode chauffée de laquelle des électrons sont arrachés avec une vitesse initiale nulle, dans une enceinte où règne un vide poussé. Ils sont ensuite accélérés par un champ électrique uniforme régnant entre deux armatures A et B.

- Donner l'expression de l'énergie acquise à la sortie du canon en fonction de  $e$  et de la tension  $U_{AB}$  régnant entre les armatures.
- En déduire que l'énergie cinétique d'un électron à la sortie du canon est  $E_c = eU_{AB}$ .
- Si l'électron n'est pas relativiste, cette énergie cinétique peut se mettre sous la forme  $E_c = \frac{p^2}{2m_e}$ , où  $p$  est la valeur de la quantité de mouvement de l'électron. En déduire l'expression de  $p$  en fonction de  $e$ ,  $m_e$  et  $U_{AB}$ .

## 2. Résolution du microscope

La taille du plus petit détail observable par un microscope optique est proportionnelle à la longueur d'onde de la lumière utilisée. De même, la résolution d'un microscope électronique dépend de la longueur d'onde des électrons envoyés sur l'objet à observer.

- (a) Donner les valeurs des longueurs d'onde limites du domaine visible.
- (b) Expliquer alors l'intérêt d'utiliser des électrons plutôt que de la lumière visible pour effectuer de la microscopie.
- (c) Rappeler l'expression de la longueur d'onde d'un électron en fonction de  $h$  et de la valeur  $p$  de la quantité de mouvement de l'électron.
- (d) En utilisant la réponse à la question 1.c., en déduire que

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e E U_{AB}}}.$$

- (e) Calculer lorsque  $U_{AB} = 1,00 \text{ kV}$ .

## 3. Différents types d'observations

Il existe plusieurs types de microscopes électroniques. Si les objets à analyser ne sont pas trop épais, il est possible de faire de la microscopie électronique en transmission. Deux modes d'observation sont alors possibles : soit la figure de diffraction est observée, soit le faisceau transmis en ligne droite est projetée.

- (a) Lequel de ces deux modes d'observation est analogue à l'observation classique dans un microscope optique ?
- (b) Lequel de ces deux modes d'observation relève du caractère ondulatoire de l'électron ?
- (c) Lors de la traversée de l'échantillon, quel type d'interaction peut survenir entre l'électron et la matière ? Montrer qu'un autre type d'observation est alors possible.

## 4. Vitesse des électrons

L'un des avantages de la microscopie électronique est que la vitesse des électrons, donc leur longueur d'onde, est facilement ajustable.

- (a) Faut-il augmenter ou diminuer  $U_{AB}$  pour diminuer  $\lambda$  ? Justifier.
- (b) Un électron est accéléré par une tension  $U_{AB} = 400 \text{ kV}$ . En utilisant la relation donnée à la question 2.d., déterminer sa longueur d'onde.
- (c) Déterminer également la valeur  $p$  de sa quantité de mouvement, puis la valeur  $v$  de sa vitesse.
- (d) Ce dernier résultat vous paraît-il admissible ? Quelle hypothèse faite est ici remise en question ?