

## EXERCICE B – Accélérateur linéaire Linac2 du CERN (5 points)

**Mots clés :** mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme, accélérateur de particules chargées.

L'accélérateur linéaire « Linac2 » permet de communiquer une vitesse importante aux protons que les chercheurs utilisent ensuite dans les expériences menées au laboratoire européen pour la physique des particules (CERN) afin d'explorer la structure de la matière. Les protons, initialement au repos, atteignent l'énergie de 50 MeV à la sortie de l'accélérateur. Ils pénètrent alors dans le « Synchrotron injecteur », le maillon suivant de la suite d'accélérateurs du CERN, qui les porte à une énergie encore plus élevée.



D'après : <https://home.cern/fr/science/accelerators/linear-accelerator-2>.

### Données

- Charge du proton :  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ .
- Masse du proton :  $m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ .
- Champ de pesanteur terrestre :  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .
- $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ .
- $1 \text{ MV} = 10^6 \text{ V}$ .

« Linac2 » est un accélérateur linéaire dans lequel les protons passent par une succession de zones modélisables par des condensateurs plans et où règne un champ électrique et de zones où ne règne aucun champ électrique. Dans une première partie, l'étude porte sur l'accélération initiale des protons par un condensateur plan, puis dans une seconde partie, sur le principe des accélérations successives des protons dans le « Linac2 ».

### 1. Accélération initiale des protons dans un premier condensateur plan

Un proton entre dans le condensateur plan avec une vitesse initiale nulle en O (figure 1). Une tension électrique positive  $U = V_1 - V_2$  est appliquée entre les plaques du condensateur séparées d'une distance  $d$ .

Le champ électrique  $\vec{E}$  créé entre les plaques est supposé uniforme, dirigé dans le sens de l'axe Ox et de norme  $E = \frac{U}{d}$ .

Les plaques sont percées en O et S pour laisser passer les protons.

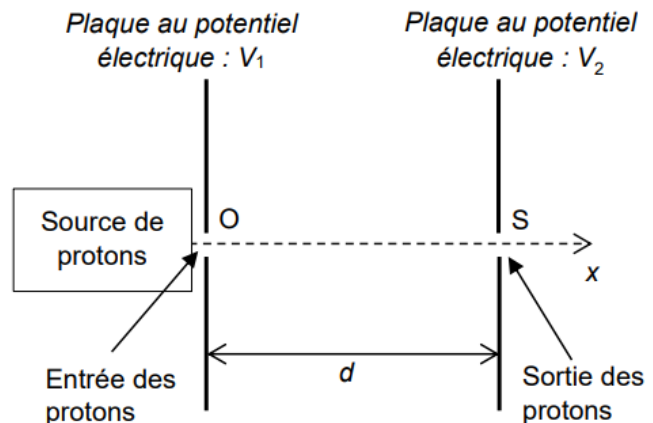


Figure 1. Schéma du condensateur plan

Caractéristiques du condensateur :

- distance entre les plaques :  $d = 10,0 \text{ cm}$  ;
- tension électrique appliquée :  $U = V_1 - V_2 = 2,00 \text{ MV}$ .

Le mouvement du proton dans le condensateur est étudié dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

**1.1.** Représenter, sur le document de l'**ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**, le vecteur champ électrique  $\vec{E}$  au point M. Échelle :  $1 \text{ cm}$  représente  $10 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ .

**1.2.** Comparer la valeur du poids d'un proton avec celle de la force électrique à laquelle il est soumis à l'intérieur du condensateur. Conclure.

- 1.3. Déterminer l'expression du vecteur accélération du proton  $\vec{a}$  en fonction de  $m_p$ ,  $e$ ,  $\vec{E}$ . En déduire la nature de son mouvement dans le condensateur.
- 1.4. En appliquant le théorème de l'énergie cinétique, montrer que la variation d'énergie cinétique du proton entre le point d'entrée O et le point de sortie S du condensateur est égale à :
- $$E_C(S) - E_C(O) = eU.$$
- 1.5. En déduire l'expression de la vitesse  $v_S$  du proton à la sortie du premier condensateur en S en fonction de  $m_p$ ,  $e$  et  $U$ . Déterminer sa valeur et commenter le résultat.

## 2. Principe du Linac2 – accélérateur linéaire

Dans une enceinte où règne un vide poussé, on fait passer les protons dans une série de tubes métalliques reliés alternativement à l'une ou à l'autre des bornes d'un générateur de tension alternative  $U_a(t)$  (voir figure 2). Cette tension crée, dans les intervalles qui séparent les tubes, un champ électrique dans la direction de l'axe Ox.

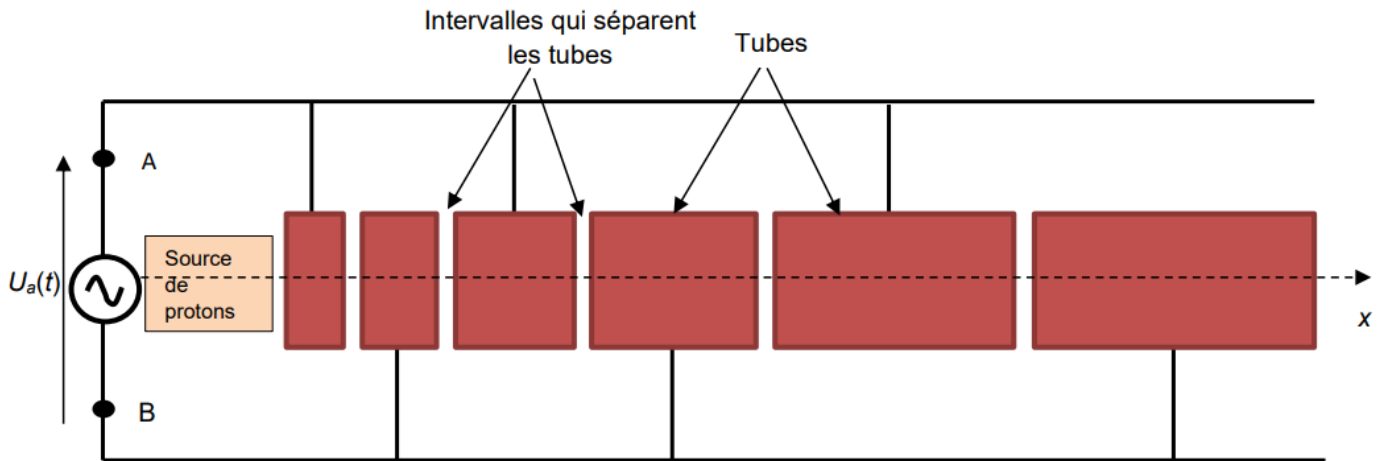


Figure 2. Schéma simplifié du Linac 2.

Le champ électrique régnant dans les intervalles étant variable au cours du temps, la fréquence de la tension  $U_a(t)$  et la longueur des tubes sont choisies très précisément pour que les protons arrivent dans chaque intervalle à l'instant où le sens du champ est tel qu'il permet leur accélération. On considère qu'à l'intérieur des tubes le champ électrique est nul et donc que les particules s'y déplacent à vitesse constante (figure 3).

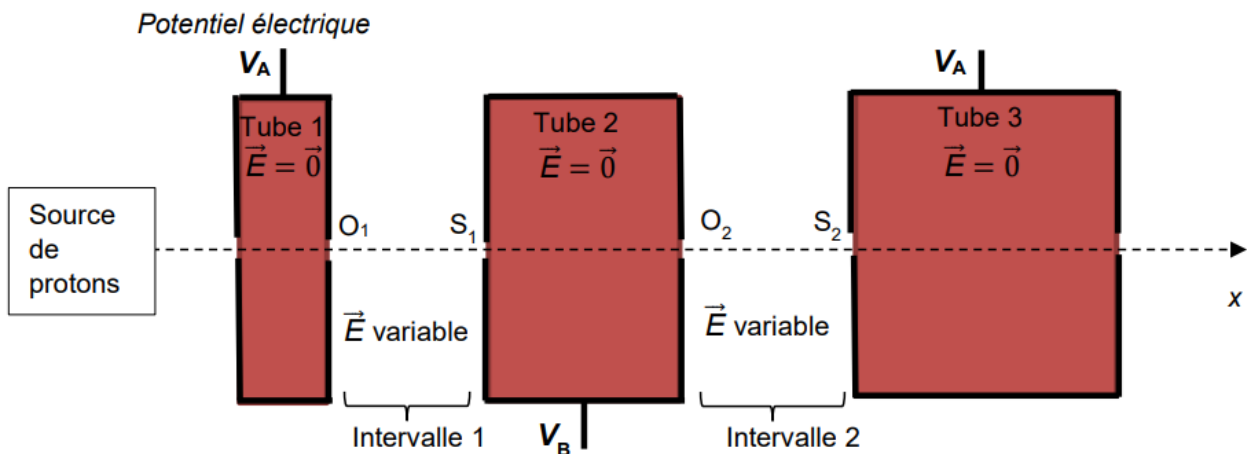


Figure 3. Schéma des deux premiers intervalles (l'échelle n'est pas respectée).

L'énergie cinétique des protons augmentant au passage dans chaque intervalle, l'énergie cinétique atteinte à la sortie de l'accélérateur dépend, entre autres, du nombre de tubes.

L'un des intérêts d'un tel dispositif est qu'il suffit d'ajouter des tubes ou d'augmenter la valeur du champ électrique pour augmenter l'énergie cinétique finale des protons. Son principal inconvénient est son encombrement qui est, pour le Linac2, une longueur de 34 m.

Chaque intervalle se comporte comme le condensateur plan étudié dans la première partie (figure 1).

Le générateur produit une tension sinusoïdale de période  $T = 40$  ns. On donne la courbe de variation de la tension  $U_a$  en fonction du temps (figure 4). Si  $U_a(t) > 0$ , alors  $V_A > V_B$  et si  $U_a(t) < 0$  alors  $V_A < V_B$ .

$U_a(t)$  (MV)

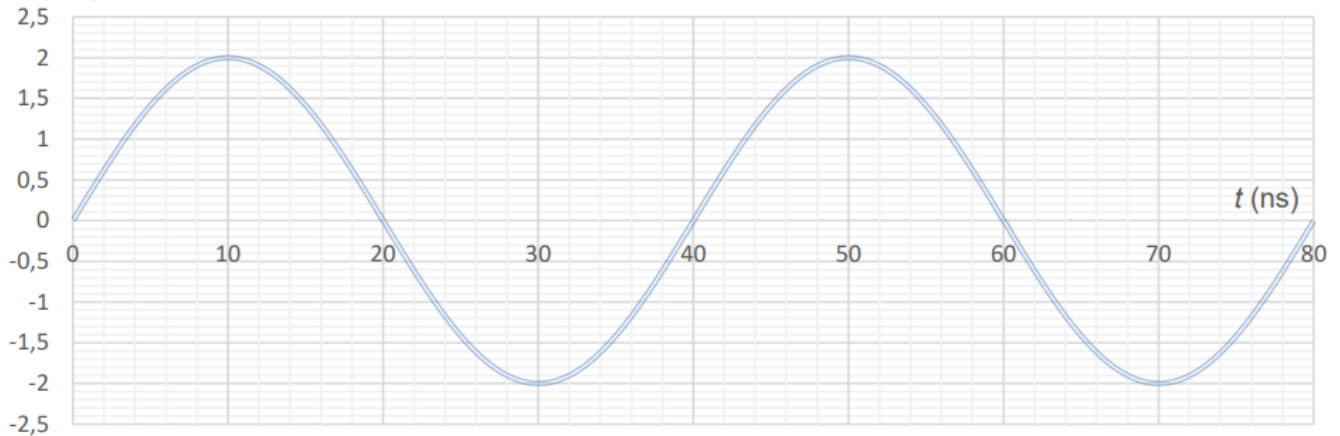


Figure 4. Évolution de la tension électrique  $U_a(t)$  délivrée par le générateur.

- 2.1. Indiquer le sens du champ électrique qui règne dans l'intervalle 1 et dans l'intervalle 2 entre les tubes à l'instant  $t = \frac{T}{4}$ . Représenter, sans soucis d'échelle, le vecteur champ électrique  $\vec{E}$  dans l'intervalle 1 et celui dans l'intervalle 2 sur le schéma de l'**ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**.
- 2.2. Mêmes questions à la date  $t = \frac{3T}{4}$ .
- 2.3. Pour être accélérés de manière optimale dans chaque intervalle, les protons doivent mettre une durée  $\Delta t = \frac{T}{2}$  pour traverser chaque tube. Justifier cette affirmation.
- 2.4. Expliquer qualitativement pourquoi les tubes du Linac2 sont de plus en plus longs.

## EXERCICE C – Observer les cratères lunaires Messier (5 points)

**Mots clés : optique géométrique, lunette astronomique.**

Messier et Messier A sont deux cratères lunaires relativement récents localisés dans la mer de la Fécondité. Le cratère Messier se caractérise par sa forme allongée et juste à côté, on trouve Messier A, un autre cratère de forme et de taille similaire.

Messier et Messier A ont été photographiés par la mission Apollo 11 en 1969 (voir photo ci-contre).



Photo NASA

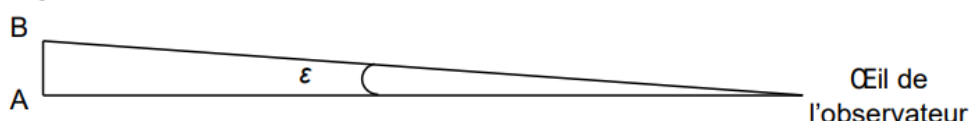
L'objectif de cet exercice consiste à déterminer la caractéristique d'un oculaire d'une lunette astronomique permettant d'observer ces cratères depuis la Terre.

### Données

- Distance Terre - Lune  $D = 3,84 \times 10^5$  km.
- Largeur du cratère Messier  $d = 11,0$  km.
- Fiche technique d'une lunette astronomique d'amateur :

Distance focale de l'objectif	300 mm
Diamètre de l'objectif	70 mm
Masse de la lunette	1,95 kg
Hauteur réglable du trépied	65 à 114 cm
Distance focale des oculaires fournis	35 mm, 20 mm et 10 mm
Prix	59,99 €

- Pouvoir séparateur de l'œil : angle minimal  $\varepsilon$  sous lequel deux points lumineux A et B peuvent être vus séparément. Pour l'œil humain,  $\varepsilon = 3,0 \times 10^{-4}$  rad. A et B ne peuvent donc pas être distingués à l'œil nu sous un angle inférieur à  $\varepsilon$ .



### 1. Étude de la lunette astronomique

Dans le commerce, on trouve des lunettes astronomiques compactes pour astronomes amateurs débutants. Leurs dimensions permettent de les transporter facilement vers des zones où la pollution lumineuse est faible pour faciliter l'observation du ciel nocturne.

- 1.1. Expliquer pourquoi la lunette décrite ci-dessus est commercialisée comme une lunette « 70/300 ».
- 1.2. La lunette est modélisée par l'association de deux lentilles minces convergentes. Le foyer image  $F'_{\text{obj}}$  de l'objectif coïncide avec le foyer objet de l'oculaire  $F_{\text{ocu}}$ . Compléter l'**ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**, en indiquant la marche du rayon lumineux issu du point  $B_{\infty}$  considéré à l'infini au travers de la lunette afocale. Mettre en évidence l'image intermédiaire  $A_1B_1$  ainsi que l'angle  $\theta'$  sous lequel est vu l'image  $A'B'$  de  $A_{\infty}B_{\infty}$  à travers la lunette.
- 1.3. Après avoir défini le terme « afocal », expliquer l'intérêt de disposer d'une lunette afocale.



- 1.4. On suppose que, pour les petits angles exprimés en radian,  $\tan \theta \approx \theta$ . Définir le grossissement de la lunette. Montrer, à partir de l'**ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**, que le grossissement de la lunette a pour expression :

$$G = \frac{f'_{obj}}{f'_{ocu}}$$

où  $f'_{obj}$  et  $f'_{ocu}$  désignent respectivement les distances focales des lentilles de l'objectif et de l'oculaire.

## 2. Observation du cratère lunaire Messier

- 2.1. Montrer que l'angle  $\theta$  sous lequel est vu le cratère Messier depuis la Terre a, sous certaines hypothèses à préciser à l'aide d'un schéma, pour valeur  $\theta = 2,86 \times 10^{-5}$  rad.
- 2.2. L'observation du cratère lunaire Messier est-elle possible à l'œil nu ?
- 2.3. Dans ces conditions, calculer la taille de l'image intermédiaire  $A_1B_1$  du cratère Messier à travers l'objectif de la lunette.
- 2.4. Déterminer le ou les oculaires, parmi les trois fournis dans les données, qu'un astronome amateur doit utiliser pour pouvoir espérer observer le cratère Messier.

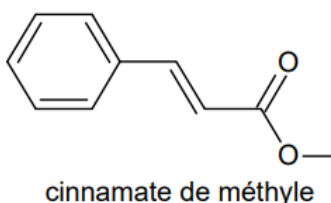
*Dans cette question, le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie, même si elle n'a pas abouti. La démarche est évaluée et nécessite d'être correctement présentée.*

## Exercice 2 - Un champignon parfumé (4 points)

Le *tricholoma matsutake* communément appelé *matsutake*, ou champignon des pins, est un champignon rare et savoureux, recherché pour sa chair blanche parfumée. Ce champignon est très apprécié dans la gastronomie japonaise. Une des espèces chimiques responsable de ses propriétés aromatiques et gustatives est le cinnamate de méthyle dont la formule topologique est donnée ci-après.



Source : Wikipédia



La rareté et le coût élevé du champignon *matsutake* incitent l'industrie agro-alimentaire à synthétiser le cinnamate de méthyle.

On se propose dans cet exercice d'étudier une synthèse de laboratoire de cet arôme.

### Données :

- tableau comparatif des propriétés physico-chimiques de trois solvants :

Solvant	Eau	Dichlorométhane	Éther de pétrole
Pictogrammes de sécurité		 nocif ou irritant	 nocif ou irritant
		 danger pour la santé	 danger pour la santé
Solubilité du chlorure de cinnamoyle	peu soluble	soluble	soluble
Solubilité du méthanol	soluble	soluble	insoluble

- couples acide / base :  $\text{CO}_2(\text{aq}) / \text{HCO}_3^-(\text{aq})$  et  $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) / \text{H}_2\text{O}(\ell)$  ;
- masses molaires :

Chlorure de cinnamoyle	166,6 g·mol <sup>-1</sup>
Méthanol	32,0 g·mol <sup>-1</sup>
Cinnamate de méthyle	162,2 g·mol <sup>-1</sup>

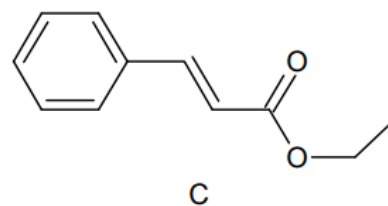
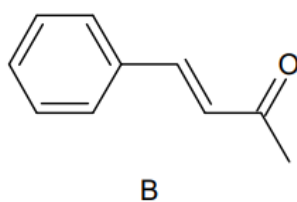
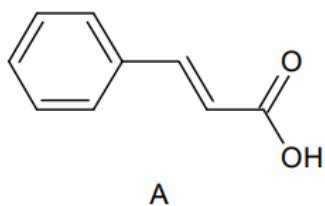
- masse volumique du méthanol :  $\rho = 0,792 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ .

### 1. Étude des réactifs de la synthèse du cinnamate de méthyle

Le cinnamate de méthyle peut être synthétisé à partir du méthanol et de l'acide cinnamique, appelé acide 3-phénylprop-2-énoïque en nomenclature systématique.

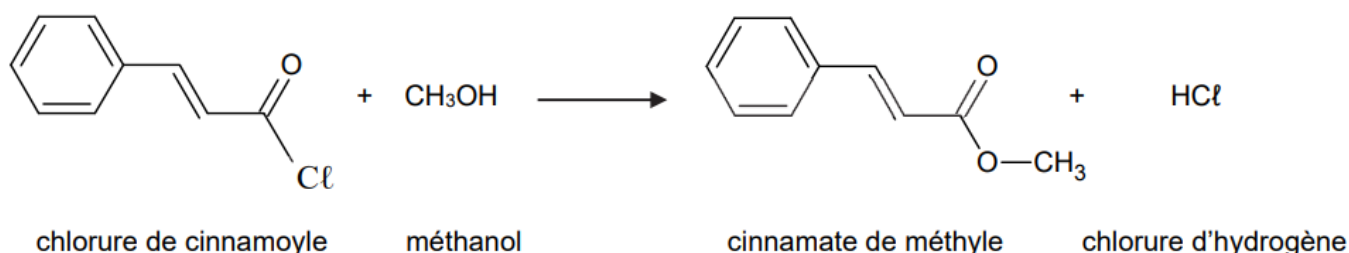
**Q1.** Nommer la famille fonctionnelle à laquelle appartient l'acide cinnamique. Justifier.

**Q2.** En déduire, parmi les trois composés A, B et C dont les formules topologiques sont données ci-dessous, celui qui correspond à l'acide cinnamique. Justifier.



## 2. Synthèse du cinnamate de méthyle à partir du chlorure de cinnamoyl

Dans les conditions expérimentales choisies, la réaction de synthèse du cinnamate de méthyle à partir de l'acide cinnamique et du méthanol se produit avec un rendement de l'ordre de 40 %. On préfère alors faire réagir le méthanol avec le dérivé chloré de l'acide cinnamique : le chlorure de cinnamoyl. La transformation chimique est supposée totale et l'équation de la réaction modélisant la synthèse est la suivante :



**Q3.** Parmi les catégories suivantes, identifier celle à laquelle appartient cette transformation : oxydoréduction, acide-base, addition, élimination, substitution.

Le protocole de la synthèse du cinnamate de méthyle peut se présenter en deux étapes.

- Étape 1 : formation du cinnamate de méthyle
  - verser 5 mL de dichlorométhane dans un ballon de 100 mL contenant 8,3 g de chlorure de cinnamoyl et surmonté d'un tube réfrigérant ;
  - une fois le chlorure de cinnamoyl totalement dissous, ajouter 4,0 mL de méthanol ;
  - chauffer à reflux pendant 10 min.
- Étape 2 : isolement du produit de synthèse
  - une fois refroidi, laver le mélange réactionnel avec une solution aqueuse d'hydrogénocarbonate de sodium ( $\text{Na}^+(\text{aq})$  ;  $\text{HCO}_3^-(\text{aq})$ ) de concentration  $0,50 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  jusqu'à ce que le milieu ne soit plus acide ;
  - sécher la phase organique contenant le cinnamate de méthyle, puis filtrer ;
  - évaporer le dichlorométhane, puis récupérer le produit solide synthétisé.

**Q4.** Indiquer, en les justifiant, les consignes de sécurité qu'il est nécessaire de prendre lors de la mise en œuvre de ce protocole.

**Q5.** Justifier l'utilisation du dichlorométhane comme solvant lors de l'étape 1 de la synthèse.

Dans l'étape 2, lorsqu'on ajoute la solution aqueuse d'hydrogénocarbonate de sodium dans le milieu réactionnel, le chlorure d'hydrogène  $\text{HCl}$  réagit totalement avec l'eau pour former des ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  et des ions chlorure  $\text{Cl}^-$ . Les ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  formés réagissent avec les ions hydrogénocarbonate. On observe une effervescence.

**Q6.** Écrire l'équation de la réaction ayant lieu entre les ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  et les ions hydrogénocarbonate  $\text{HCO}_3^-$ . Justifier l'observation d'une effervescence.

**Q7.** Déterminer le volume minimal de solution aqueuse d'hydrogénocarbonate de sodium nécessaire à la disparition complète des ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  produit par le chlorure d'hydrogène  $\text{HCl}$ , en supposant la synthèse totale.

*Le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie même si elle n'a pas abouti. La démarche suivie est évaluée et nécessite donc d'être correctement présentée.*

**Q8.** La masse du produit solide obtenu expérimentalement vaut  $m = 6,2 \text{ g}$ . Estimer le rendement de la synthèse en supposant que le produit obtenu est pur. Commenter.

### Exercice 3 - Batterie Lithium - Soufre (5 points)

Les appareils électroniques nomades (tablette, téléphone...) sont omniprésents et en évolution permanente. L'autonomie de ces appareils repose sur l'utilisation de batteries qui stockent toujours plus efficacement l'énergie. Les téléphones portables sont actuellement équipés de batteries lithium – ion mais des recherches sont menées pour développer des batteries lithium – soufre.

La batterie lithium – soufre semble être en effet une alternative intéressante en raison de l'abondance et du faible coût du soufre. Cependant, les travaux de recherche visent à améliorer sa durée de vie encore trop faible.

L'objectif de cet exercice est d'étudier quelques caractéristiques d'une batterie lithium – soufre et de les comparer à celles d'une batterie lithium – ion.

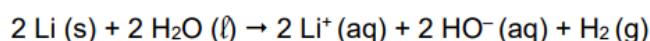
#### Données :

- numéro atomique du lithium :  $Z = 3$  ;
- couples oxydant/réducteur :
  - du lithium :  $\text{Li}^+ / \text{Li}$  ;
  - du soufre :  $\text{S} / \text{S}^{2-}$  ;
- volume molaire de gaz à 20°C et à pression atmosphérique :  $V_m = 24,4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;
- masses molaires atomiques :
  - du soufre :  $M(\text{S}) = 32,1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;
  - du lithium :  $M(\text{Li}) = 6,9 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;
- charge par mole d'électrons :  $F = 96\,500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;
- les ions lithium ( $\text{Li}^+$ ) et les ions sulfure ( $\text{S}^{2-}$ ) réagissent pour donner un précipité de sulfure de lithium très peu soluble en milieu organique ;
- la relation entre la capacité  $Q$ , l'intensité du courant  $I$  supposée constante et la durée d'utilisation  $\Delta t$ , de la pile, est :  $Q = I \times \Delta t$  ;
- la capacité d'une pile peut être exprimée en milliampère-heure :  $1 \text{ mAh} = 3,6 \text{ C}$ .

La batterie lithium – soufre peut être modélisée de façon simplifiée : elle se compose d'une électrode constituée d'un matériau contenant du soufre, un électrolyte organique anhydre et une électrode de lithium métallique.

#### 1. Le lithium

Le lithium réagit spontanément avec l'eau. Cette transformation est exothermique. L'équation de la réaction modélisant cette transformation supposée totale s'écrit :



La batterie d'un téléphone portable contient en moyenne une masse  $m = 0,5 \text{ g}$  de lithium.

**Q1.** Justifier que le lithium se comporte comme un réducteur dans cette transformation.

**Q2.** Déterminer le volume de dihydrogène formé, à 20°C et à pression atmosphérique, si une masse  $m = 0,5 \text{ g}$  de lithium réagit totalement avec l'eau. Justifier l'utilisation d'un électrolyte organique anhydre dans une telle batterie.

#### 2. La batterie lithium – soufre

On donne, sur la figure 1 de **L'ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**, le schéma simplifié de la batterie lithium – soufre quand elle se décharge, c'est-à-dire quand elle fonctionne en tant que pile. Les pôles de cette pile sont indiqués sur la figure 1 de **L'ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**.

**Q3.** Écrire les demi-équations modélisant les réactions électrochimiques qui se déroulent alors à chaque électrode en tenant compte de la polarité de la pile.



**Q4.** Sur le schéma de la figure 1 de **L'ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**, où la polarité de la pile est donnée, indiquer :

- le sens du courant électrique ;
- le sens de déplacement des électrons dans les fils électriques reliant la pile au téléphone ;
- le sens de déplacement des ions formés dans l'électrolyte.

**Q5.** Écrire l'équation de fonctionnement de la pile en tenant compte de la formation d'un précipité dans la pile.

Une batterie lithium – ion de smartphone, de capacité de  $Q = 3\,500\text{ mAh}$ , débite un courant d'intensité  $I = 0,55\text{ A}$  supposée constante, lors de l'utilisation de la fonction lampe torche. La batterie se comporte dans ce contexte comme une pile. La capacité massique moyenne par gramme de matière active d'une batterie lithium – ion a pour valeur  $Q_{\text{massique}} = 300\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ .

**Q6.** Déterminer la durée d'utilisation de la batterie lithium – ion dans ces conditions.

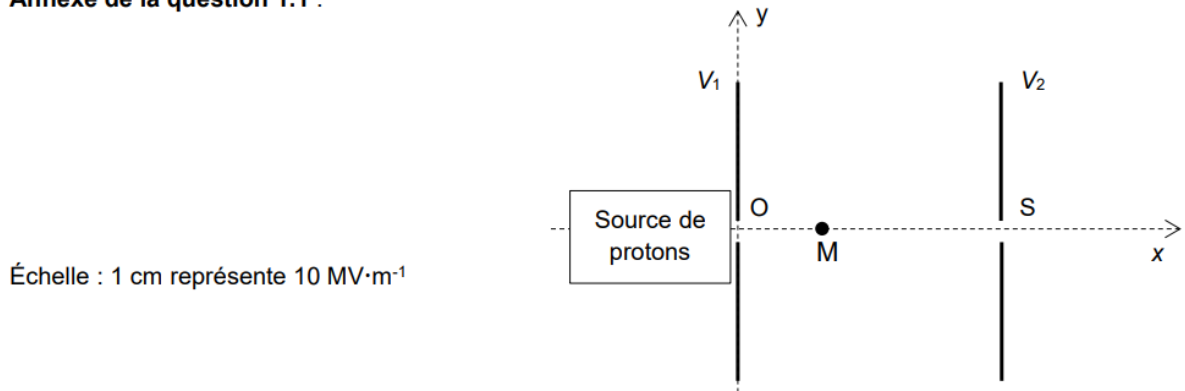
**Q7.** Vérifier, à l'aide des données, qu'une batterie lithium – ion neuve contient environ 12 g de matière active. En déduire la durée d'utilisation ramenée à un gramme de matière active dans ces conditions d'utilisation.

**Q8.** Déterminer la capacité massique par gramme de soufre actif de la batterie lithium – soufre, exprimée en  $\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ . En déduire sa durée d'utilisation par gramme de soufre actif si elle débite un courant d'intensité  $I = 0,55\text{ A}$  supposée constante. Commenter.

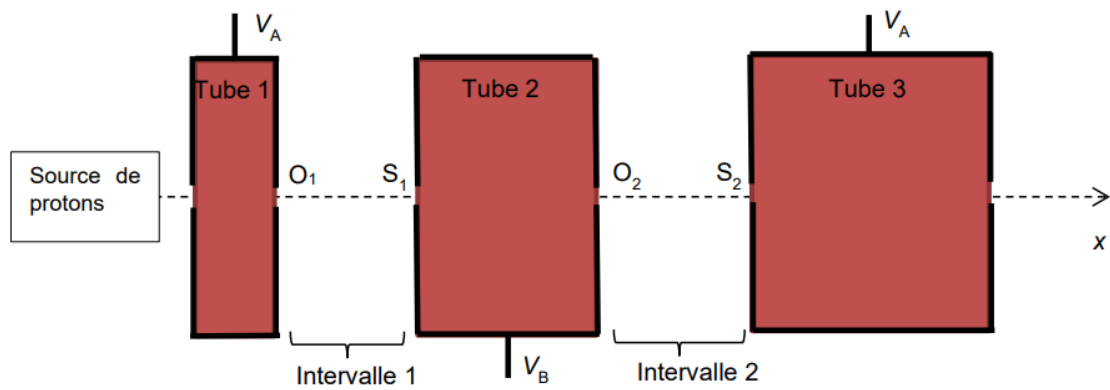
*Le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie, même si elle n'a pas abouti. La démarche est évaluée et doit être correctement présentée.*

**ANNEXE À RENDRE avec la copie de l'exercice B**  
**Accélérateur linéaire Linac2 du CERN**

Annexe de la question 1.1 :



Annexe de la question 2.1 :



**ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**

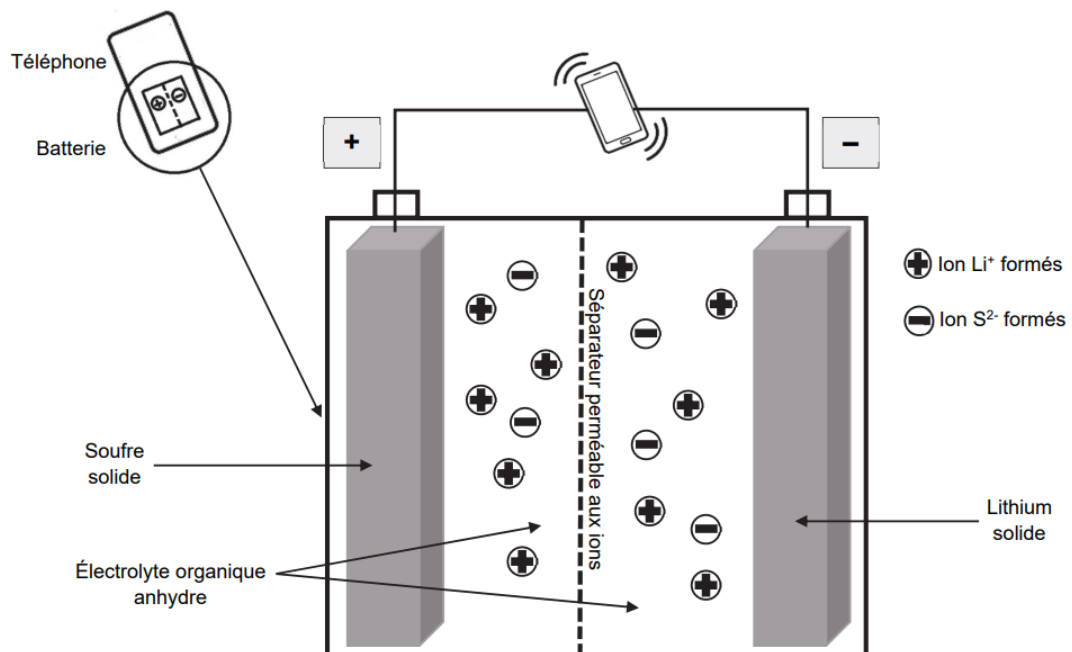


Figure 1. Schéma simplifié de la batterie lithium-soufre lors de sa décharge

# ANNEXE À RENDRE avec la copie de l'exercice C Observer les cratères lunaires Messier

Annexe de la question 1.2.

