Exercice 1 : Un exercice qui fait impression

5 points

1) La goutte porte une charge négative et sa trajectoire s'incurve vers le haut, c'est-à-dire vers P_1. Deux charges de signes contraires s'attirent : la plaque P_1, qui attire la goutte, porte donc des charges **positives**, et la plaque P_2, qui la repousse, des charges **négatives**.

Entre les armatures d'un condensateur plan, le champ électrique pointe de l'armature positive vers l'armature négative : $\vec{E}$ est donc dirigé de P_1 vers P_2, vers le bas. On le retrouve avec la force : $\vec{F} = q\,\vec{E}$ et $q < 0$, donc $\vec{E}$ a le sens contraire de $\vec{F}$, qui est dirigée vers le haut. C'est bien l'écriture $\vec{E} = -E\,\vec{k}$ de l'énoncé.

2) Système étudié : la goutte G, dont la masse m ne varie pas ; référentiel : terrestre, considéré comme galiléen. Comme on ne tient compte ni de la pesanteur ni de l'air, il ne reste que l'action du champ, $\vec{F} = q\,\vec{E}$.

La deuxième loi de Newton donne $m\,\vec{a}_G = q\,\vec{E}$, d'où :

$$\boxed{\vec{a}_G = \frac{q}{m}\,\vec{E}}$$

Le champ étant uniforme, cette accélération est constante ; avec $q < 0$, elle pointe vers le haut, dans le même sens que $\vec{F}$.

3) Comme $\vec{E}$ a pour coordonnées $(0\,;\,-E)$, l'accélération a pour coordonnées $a_x = 0$ et $a_z = -\dfrac{q\,E}{m}$ (grandeur positive, puisque $q < 0$).

Le vecteur accélération est la dérivée du vecteur vitesse. En cherchant des primitives, puis en fixant les constantes avec la vitesse initiale $\vec{v}_0 = v_0\,\vec{i}$ (coordonnées v_0 et 0) :

$$v_x(t) = v_0 \qquad v_z(t) = -\frac{q\,E}{m}\,t$$

Le vecteur vitesse est la dérivée du vecteur position $\overrightarrow{\mathrm{OG}}$. Une nouvelle recherche de primitives, avec G en O à $t = 0$ (constantes nulles), conduit à :

$$x_G(t) = v_0\,t \qquad z_G(t) = -\frac{1}{2}\,\frac{q\,E}{m}\,t^2$$

4) La goutte quitte le déflecteur quand son abscisse atteint L : $v_0\,t_S = L$, soit

$$t_S = \frac{L}{v_0} = \frac{1{,}5 \times 10^{-2}\,\mathrm{m}}{16\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}} = \boxed{9{,}4 \times 10^{-4}\,\mathrm{s}}$$

HS correspond à la cote z_G atteinte à l'instant t_S (on garde la valeur non arrondie de t_S) :

$$HS = z_G(t_S) = -\frac{q\,E\,L^2}{2\,m\,v_0^2} = -\frac{(-1{,}5 \times 10^{-13}) \times 8{,}0 \times 10^{5} \times (1{,}5 \times 10^{-2})^2}{2 \times 1{,}0 \times 10^{-10} \times 16^2} = 5{,}3 \times 10^{-4}\,\mathrm{m}$$

soit $HS \approx 0{,}5\,\mathrm{mm}$: c'est la valeur annoncée.

5) On remplace t par $t_S = L/v_0$ dans les coordonnées de la vitesse trouvées à la question 3 :

$$v_{Sx} = v_0 = 16\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}} \qquad v_{Sz} = -\frac{q\,E}{m}\,t_S = -\frac{q\,E\,L}{m\,v_0} \approx 1{,}1\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$$

6) L'angle α est l'angle que fait le vecteur $\vec{v}_S$ avec l'horizontale. Ses coordonnées v_{Sx} (horizontale) et v_{Sz} (verticale) jouent le rôle des côtés adjacent et opposé à α, donc :

$$\tan\alpha = \frac{v_{Sz}}{v_{Sx}} = -\frac{q\,E\,L}{m\,v_0} \times \frac{1}{v_0} = -\frac{q\,E\,L}{m\,v_0^2}$$

7) Valeur numérique : $\tan\alpha = -\dfrac{(-1{,}5\times10^{-13})\times 8{,}0\times10^{5}\times 1{,}5\times10^{-2}}{1{,}0\times10^{-10}\times 16^2} = 0{,}070$ (soit $\alpha \approx 4°$).

Après S, la goutte suit une droite dirigée selon $\vec{v}_S$. Le triangle $\mathrm{SS'I}$ a un angle droit en $\mathrm{S'}$ et un côté horizontal $\mathrm{SS'} = D$: il en découle $\mathrm{S'I} = D\tan\alpha = 2{,}5\times10^{-2}\times0{,}070 = 1{,}8\times10^{-3}\,\mathrm{m}$.

La hauteur d'impact est donc $\mathrm{S'I}$, à laquelle s'ajoute la déviation HS subie entre les plaques ($\mathrm{H'S'} = HS$) :

$$H'I = HS + D\tan\alpha = 5{,}3\times10^{-4} + 1{,}76\times10^{-3} = 2{,}3\times10^{-3}\,\mathrm{m} = \boxed{2{,}3\,\mathrm{mm}}$$

Cette valeur est voisine de $h = 2{,}5\,\mathrm{mm}$, taille habituelle des caractères : le modèle rend bien compte de la taille des inscriptions, compte tenu de la précision des données (deux chiffres significatifs).

8) En combinant les résultats des questions 4 et 7 :

$$H'I = -\frac{q\,E\,L}{m\,v_0^2}\left(\frac{L}{2}+D\right) = \frac{|q|\,E\,L}{m\,v_0^2}\left(\frac{L}{2}+D\right)$$

Pour obtenir un caractère plus haut, il faut augmenter $H'I$; d'après cette expression, on peut :

- augmenter E, c'est-à-dire la tension appliquée entre les plaques ;
- charger davantage les gouttes (augmenter $|q|$) ;
- utiliser des plaques plus longues (augmenter L) ou placer le support plus loin (augmenter D) ;
- éjecter les gouttes moins vite (diminuer v_0), la goutte met alors plus de temps à traverser le déflecteur.

Limite pratique : les quatre réglages qui agissent dans le déflecteur (E, $|q|$, L, v_0) font aussi croître HS, et la goutte pourrait heurter $\mathrm{P_1}$. Reculer le support ne change rien à l'intérieur du déflecteur : c'est le réglage le plus sûr.

Exercice 2 : Un nouveau sport olympique ?

5 points

Partie A : étude du lancer

1) Système : la gerbe, modélisée par le point M de masse m ; référentiel terrestre, considéré comme galiléen. En l'absence d'air, une seule force agit : le poids, $m\,\vec{g}$.

D'après la deuxième loi de Newton, $m\,\vec{a} = m\,\vec{g}$, d'où l'égalité $\vec{a} = \vec{g}$. Le champ de pesanteur est vertical et dirigé vers le bas, en sens contraire de $\vec{j}$:

$$\boxed{a_x(t) = 0 \qquad a_y(t) = -g}$$

2) La vitesse initiale se décompose en $v_0 \cos\alpha$ (horizontale) et $v_0 \sin\alpha$ (verticale) ; une primitive de l'accélération ajustée à ces valeurs donne :

$$v_x(t) = v_0 \cos\alpha \qquad v_y(t) = -g\,t + v_0 \sin\alpha$$

Position de départ : $\mathrm{M}_0\,(0\,;\,H)$. Une seconde intégration fournit alors :

$$\boxed{x(t) = v_0 \cos\alpha\; t \qquad y(t) = -\frac{1}{2}\,g\,t^2 + v_0 \sin\alpha\; t + H}$$

3) La première équation horaire donne $t = \dfrac{x}{v_0 \cos\alpha}$. En reportant cette expression dans $y(t)$:

$$y = -\frac{1}{2}\,g\,\frac{x^2}{v_0^2 \cos^2\alpha} + v_0 \sin\alpha \times \frac{x}{v_0 \cos\alpha} + H = -\frac{1}{2}\,g\,\frac{x^2}{v_0^2 \cos^2\alpha} + x \tan\alpha + H$$

car $\dfrac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = \tan\alpha$.

4) La barre se trouve à l'abscisse $x = D = 1{,}5\,\mathrm{m}$. On calcule l'altitude de M à cette abscisse (calculatrice en degrés) :

$$y(D) = -\frac{1}{2} \times 9{,}8 \times \frac{1{,}5^2}{9{,}5^2 \times \cos^2(78°)} + 1{,}5 \times \tan(78°) + 2{,}60 = \boxed{6{,}8\,\mathrm{m}}$$

Cette altitude dépasse la hauteur de la barre, $6{,}00\,\mathrm{m}$, d'environ $0{,}8\,\mathrm{m}$: la gerbe **franchit** la barre. Même en tenant compte de la taille de la gerbe ($0{,}60\,\mathrm{m}$ de long, centrée sur M), elle passe entièrement au-dessus.

5) Avec $E_{\mathrm{pp}} = 0$ au sol :

$$E_{\mathrm{c}}(\mathrm{M}_0) = \frac{1}{2}\,m\,v_0^2 = \frac{1}{2} \times 7{,}0 \times 9{,}5^2 = \boxed{3{,}2 \times 10^2\,\mathrm{J}}$$

$$E_{\mathrm{pp}}(\mathrm{M}_0) = m\,g\,H = 7{,}0 \times 9{,}8 \times 2{,}60 = \boxed{1{,}8 \times 10^2\,\mathrm{J}}$$

6) Sans action de l'air, seul le poids travaille ; cette force est conservative, si bien que la somme $E_{\mathrm{c}} + E_{\mathrm{pp}}$ (énergie mécanique E_{m}) se conserve pendant tout le vol.

- **Proposition I : fausse.** Une grandeur constante n'a pas de maximum particulier : E_{m} a la même valeur en M_0, en M_1 et en M_2.
- **Proposition II : fausse.** En M_1, la vitesse verticale s'annule, mais la vitesse horizontale reste égale à $v_0 \cos\alpha = 9{,}5 \times \cos(78°) \approx 2{,}0\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$. L'énergie cinétique en M_1 vaut donc $\frac{1}{2} \times 7{,}0 \times 2{,}0^2 \approx 14\,\mathrm{J}$, et non zéro.
- **Proposition III : fausse.** Les points M_0 et M_2 se trouvent à une altitude identique : leurs énergies potentielles sont égales. L'énergie mécanique étant la même en ces deux points, l'énergie cinétique l'est aussi : $E_{\mathrm{c}}(\mathrm{M}_2) = E_{\mathrm{c}}(\mathrm{M}_0)$.

7) Les frottements de l'air sont des forces non conservatives qui s'opposent au mouvement : leur travail est négatif et l'énergie mécanique diminue au cours du vol.

- **Proposition I : vraie.** E_{m} ne fait que décroître après le lancer : sa plus grande valeur est

atteinte au départ, en M_0.

- **Proposition II : fausse.** La gerbe continue d'avancer horizontalement au sommet de sa trajectoire : sa vitesse, donc son énergie cinétique, n'y est pas nulle.
- **Proposition III : vraie.** Entre M_0 et M_2, l'énergie mécanique a diminué alors que l'énergie potentielle a retrouvé sa valeur de départ ; la différence porte sur l'énergie cinétique : $E_\mathrm{c}(\mathrm{M}_2) < E_\mathrm{c}(\mathrm{M}_0)$.

Partie B : l'enceinte de l'animateur

8) Niveau d'intensité sonore à $1{,}0\,\mathrm{m}$:

$$L_1 = 10\log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) = 10\log\left(\frac{5{,}0\times10^{-3}}{1{,}0\times10^{-12}}\right) = \boxed{97\,\mathrm{dB}}$$

9) $97\,\mathrm{dB}$ est compris entre 95 et $101\,\mathrm{dB}$: la durée limite est comprise entre 4 et 15 minutes par jour (environ $10\,\mathrm{min}$). Rester plus de quelques minutes à $1{,}0\,\mathrm{m}$ de l'enceinte expose à un traumatisme irréversible.

10) On isole P dans la relation $I_1 = \dfrac{P}{4\pi d_1^2}$, avec $d_1 = 1{,}0\,\mathrm{m}$:

$$P = 4\pi\, d_1^2\, I_1 = 4\pi \times 1{,}0^2 \times 5{,}0\times10^{-3} = 6{,}3\times10^{-2}\,\mathrm{W}$$

On retrouve la valeur annoncée.

11) Convertissons la limite fixée en niveau d'intensité sonore :

$$L_\mathrm{max} = 10\log\left(\frac{2{,}5\times10^{-4}}{1{,}0\times10^{-12}}\right) = 84\,\mathrm{dB}$$

La manifestation dure $2\,\mathrm{h}$; le tableau autorise une exposition de $2\,\mathrm{h}$ par jour à $86\,\mathrm{dB}$. Comme $84 < 86$, des spectateurs présents pendant toute la compétition ne risquent pas de traumatisme auditif : c'est ce qui justifie la valeur choisie.

12) À $d = 4{,}0\,\mathrm{m}$, emplacement des barrières, l'intensité vaut :

$$I = \frac{P}{4\pi d^2} = \frac{6{,}3\times10^{-2}}{4\pi\times4{,}0^2} = \boxed{3{,}1\times10^{-4}\,\mathrm{W\cdot m^{-2}}}$$

Cette intensité dépasse la valeur maximale de $2{,}5\times10^{-4}\,\mathrm{W\cdot m^{-2}}$: les barrières sont **trop proches** de l'enceinte.

Pour respecter la limite, il faudrait $d \geq \sqrt{\dfrac{P}{4\pi I_\mathrm{max}}} = \sqrt{\dfrac{6{,}3\times10^{-2}}{4\pi\times2{,}5\times10^{-4}}} \approx 4{,}5\,\mathrm{m}$: il faut placer les barrières à $4{,}5\,\mathrm{m}$ au moins de l'enceinte.

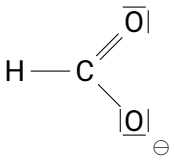
Exercice 3 : Comment ressentir la force (d'un acide) ?

5 points

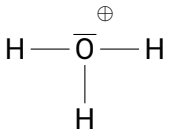
1) Un acide est qualifié de faible lorsque sa transformation avec l'eau est **limitée** (non totale) : à l'équilibre, l'acide et sa base conjuguée coexistent, et le taux d'avancement final est inférieur à 1.

2) Deux couples interviennent : $HCOOH/HCOO^-$ et H_3O^+/H_2O. L'acide méthanoïque perd un ion hydrogène, $HCOOH \rightleftharpoons HCOO^- + H^+$, que l'eau gagne, $H_2O + H^+ \rightleftharpoons H_3O^+$. La réaction est un échange d'ion H^+ entre l'acide d'un couple et la base d'un autre couple : c'est une réaction acide-base au sens de Brönsted.

3) Doublets non liants complétés (traits) et charges :



ion méthanoate $HCOO^-$



ion oxonium H_3O^+

Dans l'ion méthanoate, l'oxygène doublement lié porte deux doublets non liants ; l'oxygène lié par une simple liaison en porte trois et la charge négative. Dans l'ion oxonium, l'oxygène, engagé dans trois liaisons, ne garde qu'un doublet non liant et porte la charge positive.

4) D'après la relation $\mathrm{pH} = \mathrm{p}K_\mathrm{A} + \log \dfrac{[\mathrm{HCOO^-}]}{[\mathrm{HCOOH}]}$, le pH est égal au $\mathrm{p}K_\mathrm{A}$ lorsque les deux formes sont en même proportion (le logarithme de 1 est nul). Sur la figure 3, les deux courbes se coupent à $50\,\%$, à l'abscisse :

$$\boxed{\mathrm{p}K_\mathrm{A} \approx 3{,}75}$$ (lecture acceptée entre 3,7 et 3,8)

5) L'eau, solvant, est en excès ; la quantité initiale d'acide est $c_A\,V$, et l'acide est le réactif limitant.

Équation		$HCOOH(aq)$ +	$H_2O(l)$	$\rightleftharpoons$ $HCOO^-(aq)$ +	$H_3O^+(aq)$
État	Avanc. (mol)	Quantités de matière (mol)			
Initial	0	c_AV	excès	0	0
Final réel	x_f	$c_AV - x_\mathrm{f}$	excès	x_f	x_f
Final si totale	x_max	$c_AV - x_\mathrm{max}$	excès	x_max	x_max

6) La constante d'acidité est la valeur du quotient de réaction à l'équilibre :

$$K_\mathrm{A} = \frac{[\mathrm{HCOO^-}]\,[\mathrm{H_3O^+}]}{[\mathrm{HCOOH}]\,c^\circ}$$

Le tableau montre qu'à l'état final les ions méthanoate et oxonium sont en même quantité, x_f : $[\mathrm{HCOO^-}] = [\mathrm{H_3O^+}] = \dfrac{x_\mathrm{f}}{V}$. Pour l'acide restant : $[\mathrm{HCOOH}] = \dfrac{c_AV - x_\mathrm{f}}{V} = c_A - \dfrac{x_\mathrm{f}}{V} = c_A - [\mathrm{H_3O^+}]$.

En reportant ces deux égalités :

$$K_\mathrm{A} = \frac{[\mathrm{H_3O^+}]^2}{\left(c_A - [\mathrm{H_3O^+}]\right) c^\circ}$$

7) La dernière ligne du tableau donne $x_\mathrm{max} = c_A V$ (tout l'acide aurait disparu). Par définition, $\tau_\mathrm{f} = \dfrac{x_\mathrm{f}}{x_\mathrm{max}}$, donc $x_\mathrm{f} = \tau_\mathrm{f}\, c_A V$ et $[\mathrm{H_3O^+}] = \dfrac{x_\mathrm{f}}{V} = \tau_\mathrm{f}\, c_A$.

On remplace dans l'expression de la question 6, puis on simplifie par c_A :

$$K_\mathrm{A} = \frac{\tau_\mathrm{f}^2\, c_A^2}{(c_A - \tau_\mathrm{f}\, c_A)\, c^\circ} = \frac{\tau_\mathrm{f}^2\, c_A^2}{c_A\,(1-\tau_\mathrm{f})\, c^\circ} = \frac{\tau_\mathrm{f}^2\, c_A}{(1-\tau_\mathrm{f})\, c^\circ}$$

8) On chasse le dénominateur : $K_\mathrm{A}\, c^\circ\,(1-\tau_\mathrm{f}) = c_A\, \tau_\mathrm{f}^2$, c'est-à-dire, en regroupant tous les termes dans le membre de droite :

$$c_A\, \tau_\mathrm{f}^2 + K_\mathrm{A}\, c^\circ\, \tau_\mathrm{f} - K_\mathrm{A}\, c^\circ = 0$$

On identifie terme à terme avec $A\,\tau_\mathrm{f}^2 + B\,\tau_\mathrm{f} + C = 0$, puis on traduit en reprenant les variables du script (`cA`, `KA`, `c0`) :

```
11   A = cA          12   B = KA*c0          13   C = -KA*c0
```

9) Seule la racine positive a un sens, car τ_f doit appartenir à l'intervalle $[0\,;\,1]$: donc $\tau_\mathrm{f} = 0{,}057$ et la valeur $-0{,}061$ est écartée.

D'après la question 7, $[\mathrm{H_3O^+}] = \tau_\mathrm{f}\, c_A = 0{,}057 \times 5{,}0 \times 10^{-2} = 2{,}9 \times 10^{-3}\ \mathrm{mol{\cdot}L^{-1}}$, d'où :

$$\mathrm{pH} = -\log \frac{[\mathrm{H_3O^+}]}{c^\circ} = -\log(2{,}9 \times 10^{-3}) = \boxed{2{,}5}$$

Vérification : ce pH est inférieur au $\mathrm{p}K_\mathrm{A}$ (3,75), la forme acide HCOOH prédomine, ce qui s'accorde avec un taux d'avancement de seulement $5{,}7\,\%$: l'acide méthanoïque est bien un acide faible.

Exercice 4 : Comment brasser de l'air avec de l'alcool ?

5 points

Partie A : étude du fonctionnement de la pile au méthanol

1) Un catalyseur est une espèce chimique qui rend une transformation plus rapide, sans apparaître dans l'équation de la réaction : il est intégralement régénéré à la fin.

2) Le catalyseur n'est pas consommé : le platine se retrouve intact et continue d'agir tant que la pile fonctionne. Il n'a pas besoin d'être remplacé, d'où la longue durée de vie de la pile.

3) Le méthanol, à l'électrode 1, libère des électrons, qui figurent parmi les produits de sa demi-équation. Il subit donc une **oxydation** et l'électrode 1 est l'**anode**.

Côté électrode 2, O_2 gagne des électrons : il subit une **réduction**, l'électrode 2 est donc la **cathode**.

4) Les électrons libérés à l'électrode 1 partent de cette électrode dans le circuit extérieur ; ils rejoignent l'électrode 2, qui les capte. Les électrons sortant toujours d'une pile par sa borne négative, l'électrode 1 est le **pôle négatif** et l'électrode 2 le **pôle positif**.

5) Dans la pile, les électrons ne traversent pas l'électrolyte : c'est la migration des ions H^+, formés à l'anode puis utilisés à la cathode, qui fait passer le courant à travers la membrane. Celle-ci ferme ainsi le circuit électrique et maintient la neutralité électrique de part et d'autre, ce qui permet à la pile de continuer à débiter.

6) Pour que les électrons s'éliminent, on multiplie la demi-équation de l'électrode 1 par 2 et celle de l'électrode 2 par 3 (12 électrons de part et d'autre). Après addition et suppression des espèces présentes des deux côtés (12 H^+ et 2 H_2O) :

$$2\,CH_3OH\,(aq) + 3\,O_2(g) \longrightarrow 2\,CO_2(g) + 4\,H_2O\,(l)$$

7) La solution contient $15\,\%$ de méthanol en volume : $V(CH_3OH) = 0{,}15 \times V$. On passe au volume à la masse par la masse volumique, puis à la quantité de matière par la masse molaire :

$$n(CH_3OH)_i = \frac{\rho \times 0{,}15 \times V}{M} = \frac{0{,}792\,g{\cdot}mL^{-1} \times 0{,}15 \times 8{,}0\,mL}{32{,}0\,g{\cdot}mol^{-1}} = 2{,}97 \times 10^{-2}\,mol \approx 3{,}0 \times 10^{-2}\,mol$$

On garde la valeur non arrondie pour la suite.

8) Le méthanol n'est apporté qu'une fois, en quantité déterminée. Le dioxygène de l'air, en revanche, est puisé dans l'air ambiant, avec lequel la pile reste en contact : il est sans cesse renouvelé et ne peut pas manquer. Le dioxygène est donc en excès, et c'est le méthanol qui limite la transformation (la figure 5 montre d'ailleurs du dioxygène en excès en sortie).

9) La pile cesse de fonctionner lorsque le méthanol est épuisé. Avec les nombres stœchiométriques (2 pour CH_3OH, 3 pour O_2) :

$$n(O_2) = \frac{3}{2}\,n(CH_3OH)_i = 1{,}5 \times 2{,}97 \times 10^{-2} = 4{,}46 \times 10^{-2}\,mol$$

Volume de dioxygène correspondant : $V(O_2) = n(O_2) \times V_m = 4{,}46 \times 10^{-2} \times 24{,}0 = 1{,}07\,L$.

L'air ne contient que $21\,\%$ de dioxygène en volume, donc $V(O_2) = 0{,}21 \times V(\text{air})$:

$$V(\text{air}) = \frac{V(O_2)}{0{,}21} = \frac{1{,}07\,L}{0{,}21} = \boxed{5{,}1\,L}$$

Partie B : alimentation d'un petit ventilateur

10) Q_{max} désigne la charge électrique totale susceptible d'être débitée avant l'épuisement du réactif limitant, le méthanol. La demi-équation de l'électrode 1 montre que chaque mole de méthanol fournit 6 moles d'électrons :

$$n(e^-) = 6 \times n(CH_3OH)_i = 6 \times 2{,}97 \times 10^{-2} = 0{,}178\,mol$$

Chaque mole d'électrons transporte une charge égale à la constante de Faraday :

$$Q_{\max} = n(e^-) \times \mathcal{F} = 0{,}178 \times 9{,}65 \times 10^4 = 1{,}7 \times 10^4\,\text{C}$$

C'est la valeur annoncée.

11) *Démarche* : déterminer la charge réellement disponible, puis la durée de fonctionnement à courant constant, et la comparer à $4\,\text{h}$.

Charge effectivement disponible : $Q'_{\max} = r \times Q_{\max} = 0{,}60 \times 1{,}72 \times 10^4 = 1{,}03 \times 10^4\,\text{C}$. D'après les données, chaque pile de l'association en série est traversée par la même charge : l'association fonctionne aussi longtemps qu'une seule pile, et ne peut donc faire circuler que cette charge.

L'intensité étant constante, la charge débitée pendant la durée Δt vaut $Q = I \times \Delta t$, d'où :

$$\Delta t_{\max} = \frac{r \times Q_{\max}}{I} = \frac{1{,}03 \times 10^4}{0{,}50\,\text{A}} = 2{,}1 \times 10^4\,\text{s} \approx \boxed{5{,}7\,\text{h}}$$

Cette durée est supérieure aux $4\,\text{h}$ de l'après-midi : les élèves pourront faire tourner le ventilateur jusqu'à la fin des portes ouvertes (avec une marge de plus d'une heure et demie).