

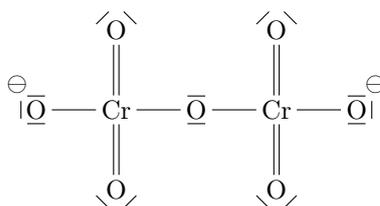
Devoir surveillé 05

- Correction -

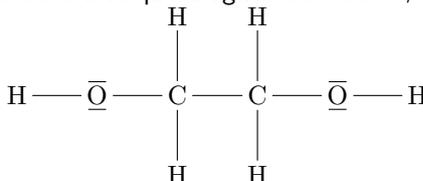
Problème 1 : dosage d'un antigél

1) Propriétés structurales

- Cf. cours, citer Pauli, Klechkowski et Hund.
- Comme $Z = 24$, la structure électronique est $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^4$. Le chrome appartient donc aux métaux de transition, bloc d, car la dernière sous-couche en cours de remplissage est une sous-couche d. En réalité, on peut s'attendre à une structure où cette sous-couche est à moitié remplie et donc plus stable car plus faible en énergie : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1 3d^5$.
- L'atome de chrome possède donc 6 électrons de valence, et peut donc faire au plus 6 liaisons. On peut proposer comme structure de Lewis :

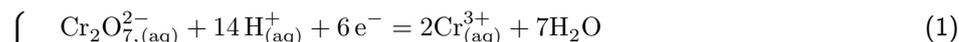


- D'après la dénomination, on s'attend donc à ce qu'il s'agisse d'un alcool, sur une chaîne carbone d'un éthane :

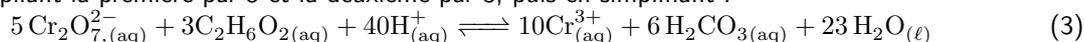


2) Dosage

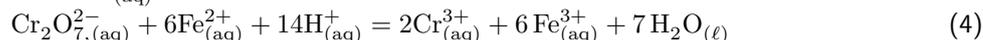
- Dans l'étape 1, on fait intervenir l'ion dichromate en temps qu'oxydant, et le glycol en tant que réducteur. En se basant sur les couples d'oxydo-réduction et les demi-équations électroniques :



soit en multipliant la première par 5 et la deuxième par 3, puis en simplifiant :



- On a introduit une quantité connue d'ions dichromate, qui réagissent avec le glycol. Ayant été mis en excès, on titre la quantité restante d'ions dichromate avec les ions Fe (II). C'est la seule possibilité, car le glycol ne peut pas réagir avec les ions Fe^{2+} , s'agissant de deux réducteurs, et H_2CO_3 est un oxydant de potentiel standard plus petit que celui du fer (II). La réaction de titrage est alors la suivante, sachant que la demi-équation électronique avec le fer est $\text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+}(\text{aq})$:



- Les deux réactions précédentes font intervenir un oxydant de potentiel standard élevé (1,33 V) et un réducteur de potentiel standard plus faible (soit $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ de potentiel standard $-0,24\text{ V}$, soit Fe^{2+} de potentiel standard $0,77\text{ V}$). L'écart est dans les deux cas très grand devant $0,25\text{ V}$, donc la réaction est totale dans les deux cas. On ne dose pas directement le glycol avec le dichromate de potassium car la réaction semble très lente.

- À partir des demi-équations électroniques, on écrit l'égalité des potentiels de Nernst, en notant $E^\circ_1 = E^\circ(\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}/\text{Cr}^{3+})$ et $E^\circ_2 = E^\circ(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+})$:

$$E^\circ_1 + \frac{0,06}{6} \log \left(\frac{[\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}]_{\text{eq}} [\text{H}^+]_{\text{eq}}^{14}}{[\text{Cr}^{3+}]_{\text{eq}}^2} \right) = E^\circ_2 + 0,06 \log \left(\frac{[\text{Fe}^{3+}]_{\text{eq}}}{[\text{Fe}^{2+}]_{\text{eq}}} \right) \quad (5)$$

soit en intégrant dans le logarithme :

$$E^\circ_1 - E^\circ_2 = \frac{0,06}{6} \log \left(\frac{[\text{Fe}^{3+}]_{\text{eq}}^6}{[\text{Fe}^{2+}]_{\text{eq}}^6} \times \frac{[\text{Cr}^{3+}]_{\text{eq}}^2}{[\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}]_{\text{eq}} [\text{H}^+]_{\text{eq}}^{14}} \right) = \frac{0,06}{6} \log K^\circ(T) \quad (6)$$

d'où $K^\circ(T) = 10^{\frac{6}{0,06}(E^\circ_1 - E^\circ_2)} = 10^{56}$.

9. D'après la réaction de l'étape 1, totale, l'avancement final vaut $x_f = \frac{1}{3}n(\text{gly})$. La quantité d'ions dichromate restant vaut donc

$$n(\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-})_{\text{restant}} = n(\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-})_{\text{introduits}} - 5x_f = n(\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-})_{\text{introduits}} - \frac{5}{3}n(\text{gly}) \quad (7)$$

Or d'après l'étape 2, cette quantité restante réagit avec les ions Fe^{2+} , donc à l'équivalence :

$$n(\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-})_{\text{restant}} = \frac{n(\text{Fe}^{2+})_{\text{eq}}}{6} = n(\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-})_{\text{introduits}} - \frac{5}{3}n(\text{gly}) \quad (8)$$

d'où finalement :

$$n(\text{gly}) = \frac{5}{3} \left(n(\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-})_{\text{introduits}} - \frac{n(\text{Fe}^{2+})_{\text{eq}}}{6} \right) \quad (9)$$

10. En introduisant les concentrations et volumes de l'énoncé :

$$c_3 V_3 = \frac{5}{3} \left(c_1 V_1 - \frac{1}{6} c_2 V_{\text{eq}} \right) \iff c_3 = \frac{5}{3V_3} \left(c_1 V_1 - \frac{1}{6} c_2 V_{\text{eq}} \right) \quad (10)$$

soit numériquement :

$$c_3 = \frac{5}{3 \times 10,0} \times \left(1,00 \cdot 10^{-1} \times 10,0 - \frac{1}{6} 2,50 \cdot 10^{-1} \times 9,30 \right) = \frac{5}{3} \times \left(0,100 - 0,250 \times \frac{1,55}{10} \right) \simeq 0,10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \quad (11)$$

Ainsi pour l'antigel commercial, en tenant compte du facteur de dilution de 200, $C = 2,0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Problème 2 : Chimie du lithium

- Le lithium est plus réducteur, car il possède un potentiel d'oxydo-réduction plus petit (et il se trouve le plus haut dans la colonne des alcalins, donc il est encore moins électronégatif).
- Au niveau de l'anode, où a lieu l'oxydation du lithium : $\text{Li}_{(s)} = \text{Li}^+ + e^-$. Au niveau de la cathode, où a lieu la réduction du dioxyde de manganèse : $\text{MnO}_{2,(s)} + \text{H}^+ + e^- = \text{MnO}(\text{OH})_{(s)}$. L'équation de fonctionnement global de la pile est donc :



- La fém s'écrit :

$$e = E_+ - E_- = E(\text{MnO}_2/\text{MnO}(\text{OH})) - E(\text{Li}^+/\text{Li}) \quad (13)$$

$$= E^\circ(\text{MnO}_2/\text{MnO}(\text{OH})) + 0,06 \log(a(\text{H}^+)) - (E^\circ(\text{Li}^+/\text{Li}) + 0,06 \log(a(\text{Li}^+))) \quad (14)$$

$$= E^\circ(\text{MnO}_2/\text{MnO}(\text{OH})) - E^\circ(\text{Li}^+/\text{Li}) + 0,06 \log\left(\frac{a(\text{H}^+)}{a(\text{Li}^+)}\right) \quad (15)$$

- L'électrolyte est un solvant organique car sinon le lithium réagirait violemment en réduisant l'eau en dihydrogène, tout en s'oxydant.
- Étant donné qu'on donne la masse de lithium, on peut supposer que c'est le lithium solide qui est limitant. Or, la quantité de matière d'électrons échangées est égale à la quantité de matière de lithium solide consommé :

$$n(e^-) = n(\text{Li}(s)) = \frac{m(\text{Li})}{M(\text{Li})} \quad (16)$$

puis la capacité de la pile s'exprime avec la constante de Faraday (charge d'une mole d'électrons) :

$$Q = n(e^-)\mathcal{F} = \frac{2,0}{6,9} \times 96\,500 = \frac{965}{124,2} \simeq 7,8 \text{ A}\cdot\text{h} \quad (17)$$

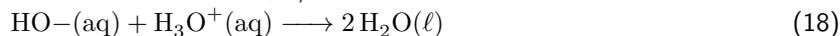
- L'autonomie est liée au courant délivré par la pile : $Q = i\Delta t \implies \Delta t = \frac{Q}{i}$, soit numériquement

$$\Delta t \simeq 7,8 \cdot 10^4 \text{ h} \simeq 9 \text{ an}$$

Problème 3 : Dosage de l'aspirine

1. Pour choisir une équation comme équation de titrage, il faut impérativement que la réaction soit **rapide, totale** et **unique**.

2. Si la seule réaction qui se produit est celle avec les ions HO^- , cette réaction s'écrit :



À l'équivalence, les réactifs ont été introduits en proportions stœchiométriques :

$$n(\text{HO}^-)_i = n(\text{H}_3\text{O}^+)_{\text{eq}} = c_a V_{\text{eq}} \quad (19)$$

AN : $n = 10,9 \cdot 10^{-3} \times 2,0 \cdot 10^{-2} = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ mol}$ et $c = \frac{n}{V_3} = 2,2 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

3. Calculons d'abord la quantité de matière d'ion HO^- présente dans la solution (S) comme on a prélevé V_3 à partir du volume V_2 :

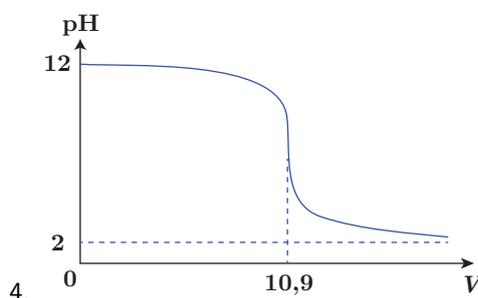
$$n(\text{HO}^-)(S) = n(\text{HO}^-)(\text{prise d'essai}) \cdot \frac{V_2}{V_3} = c_a V_{\text{eq}} V_2 / V_3 \quad (20)$$

De plus, on avait initialement une quantité de matière en ions HO^- égale à $n^0(\text{HO}^-) = c_1 V_1$. La quantité de soude ayant réagi lors du chauffage à reflux est $n_0 - n(\text{HO}^-)(S) = c_1 V_1 - c_a V_{\text{eq}} \frac{V_2}{V_3}$. La quantité de matière d'acide salicylique qui a réagi est deux fois plus faible (coefficient stœchiométrique 2 devant HO^- dans l'équation de réaction), et on multiplie par M pour avoir la masse d'aspirine. Finalement :

$$m = \frac{M(c_1 V_1 - c_a V_{\text{eq}} \frac{V_2}{V_3})}{2} \quad (21)$$

Application numérique :

$$m = \frac{180}{2} \cdot (1,0 \cdot 10^{-2} - 2,2 \cdot 10^{-4} \cdot 20) = 90 \cdot 5,6 \cdot 10^{-3} = 0,51 \text{ g} \quad (22)$$



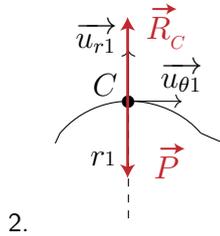
L'allure est celle classique d'un dosage par titrage. Sous réserve qu'il n'y ait pas d'autres réactions que celle écrite, il y a donc un seul saut de pH. Lorsque $V = 0$, on a seulement en présence la soude en concentration calculée question 3, donc $\text{pH} = 14 - \text{pOH} = 14 - \log(2,2 \cdot 10^{-2}) \simeq 12$. Pour $V \gg V_{\text{eq}}$, on a majoritairement de l'acide chlorhydrique (donc des ions H_3O^+ comme il s'agit d'un acide fort), de concentration du même ordre de grandeur que c_a , soit $\text{pH} \simeq -\log(c_a) \simeq 2$.

5. A priori, l'acide chlorhydrique peut réagir avec deux autres bases présentes : $\text{HO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{COO}^-$ et CH_3COO^- . Ces deux bases appartiennent cependant à des couples acide base de $\text{p}K_A$ plutôt faibles (3,1 et 4,75) : ce sont des bases beaucoup plus faibles que OH^- (qui appartient au couple $\text{H}_2\text{O}/\text{HO}^-$, de $\text{p}K_A = 14$). L'acide chlorhydrique va donc réagir avec HO^- dans un premier temps, puis ensuite avec les autres bases (après la première équivalence). La valeur du pH à l'équivalence en témoigne, car à $\text{pH}=7$, la totalité des ions HO^- ont été dosés, ($[\text{HO}^-]=10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) mais on a toujours $\text{pH} > \text{p}K_A + 1$ pour les deux autres couples, donc on est dans le domaine où les deux bases sont encore présentes et majoritaires : elles n'ont pas encore été dosées à l'équivalence.

Problème 4 : Les montagnes russes

1. On peut utiliser le théorème de l'énergie mécanique. En effet, le chariot n'est soumis qu'à son poids, force conservative, et la réaction du support, qui ne travaille pas (aucun frottement solide, donc réaction normale au support) :

$$E_m(A) = E_m(C) \iff 0 + mgh_a = \frac{1}{2}mv_C^2 + mgh_c \iff v_C = \sqrt{2g(h_A - h_C)} \quad (23)$$



3. Au point C , on peut écrire la loi de la quantité de mouvement, sachant que $\vec{v}_C = r_1\dot{\theta}_1\vec{u}_{\theta 1}$ et $\vec{a}_C = -r_1\dot{\theta}_1^2\vec{u}_{r 1} + r_1\ddot{\theta}_1\vec{u}_{\theta 1}$:

$$m\vec{a}_C = \vec{P} + \vec{R}_C \quad (24)$$

soit en projection suivant $\vec{u}_{r 1}$, sachant que les deux forces sont verticales :

$$-mr_1\dot{\theta}_1^2 = -mg + R_C \iff R_C = mg - mr_1\dot{\theta}_1^2 = mg - m\frac{v_C^2}{r_1} \quad (25)$$

conduisant au résultat demandé $\vec{R}_C = \left(mg - \frac{mv_C^2}{r_1}\right)\vec{u}_{r 1}$

4. Pour que le chariot franchisse le point C , il faut d'une part qu'il y arrive, donc $h_A > h_c$ pour que v_C soit défini. D'autre part, il faut que la réaction normale ne s'annule pas, ce qui traduit l'absence de contact et le décolllement, donc :

$$mg - \frac{mv_C^2}{r_1} > 0 \iff gr_1 > \times 2g(h_A - h_C) \iff h_C < h_A < h_C + \frac{r_1}{2} \quad (26)$$

5. Considérons un point quelconque M repéré en coordonnées polaires (r_2, θ_2) et appliquons le théorème de l'énergie mécanique entre le point A et le point M :

$$0 + mgh_A = \frac{1}{2}mv^2 + mgr_2(1 - \cos \theta_2) \quad (27)$$

comme l'altitude du point M vaut $r_2 - r_2 \cos \theta$. Donc en isolant la vitesse :

$$v = \sqrt{2gh_A + 2gr_2(\cos \theta_2 - 1)} \quad (28)$$

6. On applique à nouveau la loi de la quantité de mouvement pour en déduire la réaction normale, en fonction de θ_2 :

$$m\vec{a} = \vec{P} + \vec{R} \quad (29)$$

soit avec $\vec{a} = mr_2\ddot{\theta}_2\vec{u}_{\theta 2} - mr_2\dot{\theta}_2^2\vec{u}_{r 2}$, on projette selon $\vec{u}_{r 2}$:

$$-mr_2\dot{\theta}_2^2 = +mg \cos \theta_2 + R \iff R = -mg \cos \theta_2 - mr_2\dot{\theta}_2^2 = -mg \cos \theta_2 - \frac{m}{r_2}v^2 \quad (30)$$

soit en remplaçant par l'expression de la vitesse :

$$R = -mg \cos \theta_2 - \frac{m}{r_2}(2gh_A + 2gr_2 \cos \theta_2 - 2gr_2) = -\frac{mg}{r_2}(2h_A - 2r_2 + 3r_2 \cos \theta_2) \quad (31)$$

d'où l'expression vectorielle de l'énoncé.

7. Le chariot peut faire un tour complet à condition que la réaction normale du rail ne s'annule jamais, pour toute valeur de θ_2 . Or la valeur minimale de R est rencontrée pour $\theta_2 = \pi$ où $\cos \theta_2 = -1$. Donc $R = -\frac{mg}{r_2}(2h_A - 5r_2)$ et ne s'annule pas si $h_A > \frac{5r_2}{2}$.

8. Pour résumer, il faut donc vérifier à la fois $h_A > \frac{5r_2}{2}$ et $h_C < h_A < h_C + \frac{r_1}{2}$. Pour que les deux conditions soient vérifiées en même temps, il faut donc que $\frac{5}{2}r_2 < h_C + \frac{r_1}{2}$ donc $r_2 < \frac{5}{2}h_C + \frac{1}{5}r_1$.

Problème 5 : La délocalisation des électrons par conjugaison



Modélisation :

La situation rencontrée semble se référer au confinement d'électrons sur une étendue spatiale de la taille de la molécule de butadiène. En effet, les flèches sur les formes mésomères correspondent au mouvement des électrons pouvant se déplacer du carbone de gauche jusqu'à celui de droite et inversement. On a donc un confinement sur une distance de l'ordre de trois fois la longueur d'une liaison (d'environ $1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm}$), soit typiquement $a \simeq 0,3 \text{ nm}$.

On demande une longueur d'onde d'absorption, il faut donc évoquer les différents niveaux d'énergie possibles. Avec $a = n \frac{\lambda_{\text{dB}}}{2}$, $n \in \mathbb{N}^*$ en faisant l'analogie avec la corde de Melde, il vient que $\lambda_{\text{dB}} = \frac{2a}{n} = \frac{h}{m_e v}$ avec $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, v la vitesse de l'électron et $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ la constante de Planck. On peut donc en déduire la vitesse $v = \frac{nh}{2m_e a}$ puis l'énergie de l'électron en confondant énergie mécanique et énergie cinétique (on fait l'hypothèse qu'il n'y a pas d'interactions) :

$$E = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{n^2 h^2}{8 m_e a^2} \quad (32)$$

On constate bien que l'énergie de l'électron confiné est quantifiée par un entier n , et prend donc des valeurs discrètes appelées niveaux d'énergie.

Pour qu'il y ait absorption d'une onde lumineuse, il faut que l'énergie d'un photon soit égale à la différence d'énergie entre deux niveaux d'un électron de la molécule de butadiène, soit $E_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \Delta E = E(p) - E(q)$ avec

$(p, q) \in (\mathbb{N}^*)^2$ et $p > q$, soit encore $\frac{hc}{\lambda} = \frac{h^2}{8m_e a^2} (p^2 - q^2)$ d'où $\lambda = \frac{8m_e c a^2}{h(p^2 - q^2)}$. On peut prendre la transition la plus simple entre le niveau $q = 1$ et $p = 2$, soit :

$$\lambda = \frac{8 m_e c a^2}{3 h} = \frac{8 \times 3 \cdot 10^8 \times 9,1 \cdot 10^{-31} \times 3 \cdot 10^{-10}^2}{6,63 \cdot 10^{-34}} \simeq \frac{24 \times 81 \times 10^{-43}}{36,63 \cdot 10^{-34}} \simeq \frac{2000}{21} 10^{-9} = 10^{-7} \text{ m} \simeq 0,1 \mu\text{m} \quad (33)$$

Validation :

- On vérifie que la longueur d'onde obtenue est bien dans la gamme des ultra-violets car $\lambda < 400 \text{ nm} = 0,4 \mu\text{m}$.
- On peut tenter de comparer avec l'information donnée sur la molécule de β -carotène : la délocalisation s'effectue sur 11 atomes, donc la distance de confinement augmente d'un facteur environ 4, soit une longueur d'onde d'absorption de l'ordre de 400 nm (avec les approximations de calcul), correspondant bien à du bleu !

Remarques :

- On peut également refaire les calculs en n'utilisant pas l'analogie avec la corde de Melde mais l'inégalité de Heisenberg aboutissant à $v \simeq \frac{\hbar}{m_e a} = \frac{h}{2\pi m_e a}$, la valeur numérique de la longueur d'onde reste plutôt proche de celle trouvée précédemment.
- En réalité, comme on le verra un peu plus tard, il faudrait également tenir compte du fait que l'on a en réalité 4 électrons qui peuvent être délocalisés, et ces 4 électrons occupent les deux premiers niveaux d'énergie : la première transition énergétique à prendre en compte est celle entre $p = 3$ et $q = 2$, mais l'ordre de grandeur de la longueur d'onde est la même.
- La longueur d'onde d'absorption mesurée vaut $\lambda = 217 \text{ nm}$, les valeurs numériques de notre modèle sont cohérents.

Problème 6 : proton accéléré par le complexe d'accélérateurs du LHC au CERN

1) Particule dans un champ électrique constant et uniforme

- La force subie par un proton est $\vec{F} = q\vec{E}$.
- En appliquant la LQM au proton dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen (masse constante), on obtient :

$$m_p \vec{a} = q\vec{E} \iff \vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m_p} \quad (34)$$

à condition de négliger le poids de la particule devant la force de Lorentz. En effet, $\|qE\| \simeq 1,610^{-19} \cdot 1 \simeq 1,6 \cdot 10^{-17}$ N avec un champ (assez faible) de $1 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, tandis que $\|P\| = \|mg\| \simeq 1,7 \cdot 10^{-26}$ N : on peut donc négliger le poids devant la force électrique.

- Dans le cas d'un champ électrique uniforme, le travail élémentaire de la force s'écrit :

$$\delta W = \vec{F} \cdot d\vec{r} = q\vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (35)$$

En supposant que $\vec{E} = E_0 \vec{e}_x$ (non précisé dans l'énoncé), on obtient :

$$\delta W = qE_0 dx \quad (36)$$

De plus, on sait que $\delta W = -dEp = -d(qV) = -qdV$, on en tire donc $dV = -E_0 dx$, soit :

$$V(x) = -E_0 x + \text{cste} \quad (37)$$

Si de plus on choisit $V(x=0) = 0$, alors on a $\text{cste} = 0$. Dans ce cas :

$$V_L = V(x=L) = -E_0 L \quad (38)$$

- On applique le théorème de l'énergie mécanique au proton entre l'entrée et la sortie de la zone de champ électrique. Comme le proton n'est soumis qu'à des forces conservatives, on peut écrire que l'énergie mécanique est constante, soit :

$$E_m(\text{entrée}) = E_m(\text{sortie}) \iff 0 + 0 = Ec(x=L) + qV_L \iff E_c = -qV_L \quad (39)$$

2) Un accélérateur linéaire de particules : le Linac 2

- En reprenant le raisonnement précédent entre deux tubes, on obtient :

$$Ec_1 + qV_1 = Ec_2 + qV_2 \quad (40)$$

soit $\Delta E_c = q(V_1 - V_2) = qU_c$.

- Après la tension accélératrice, les protons possèdent l'énergie $E_c = qU_0$, et ils gagnent l'énergie qU_c après chaque passage dans un tube. Après n tubes, leur énergie est donc donnée par :

$$E_{c,n} = q(U_0 + (n-1)U_c) \quad (41)$$

- A la sortie du 10ème tube, l'énergie cinétique des protons est

$$E_{c,10} = q(U_0 + 9U_c) = \frac{1}{2}mv^2 \quad (42)$$

La vitesse atteinte est donc

$$v = \sqrt{\frac{2q(U_0 + 9U_c)}{m}}$$

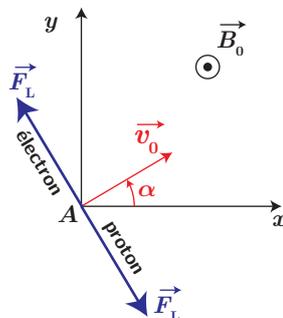
Application numérique : $v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (2000 \times 9 + 200)}{1,7 \cdot 10^{-27}}} = 6 \cdot 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ La particule n'est donc pas relativiste, car $v \leq \frac{c}{3}$.

3) Du linac 2 au synchrotron à protons (PS)

- Le proton subit alors la force de Lorentz magnétique :

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

- La force de Lorentz magnétique étant orthogonale aux vecteurs vitesse et champ magnétique, elle se trouve bien dans le plan (xOy) . Le sens est donné par le signe de q , orienté vers le bas dans le cas où $q > 0$ (proton) (on pourra s'aider utilement de la règle de la main droite pour trouver l'orientation de la force).



10. Seule la force magnétique importe car on peut à nouveau négliger le poids. Ainsi, on peut appliquer le théorème de la puissance cinétique, au proton :

$$\frac{dE_c}{dt} = \mathcal{P}(\vec{F}) = q(\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{v} = 0$$

On en déduit que $E_c = \text{Cte}$, et comme $E_c = \frac{1}{2}mv^2$, on a $v = \text{Cte}$: le mouvement du proton est uniforme.

11. Se reporter au cours pour la démonstration, on trouve :

$$R = \frac{m_p v_0}{q B_0} \quad (43)$$

12. Si la particule possède un vecteur vitesse avec une composante non nulle selon \vec{e}_z , le mouvement est la composition d'un mouvement circulaire dans le plan (Oxy) et d'une translation uniforme selon (Oz). On observera alors une trajectoire **hélicoïdale** pour le proton.
13. Après sa sortie de la zone de champ magnétique, le proton n'est plus soumis à aucune force (toujours en négligeant le poids). D'après la LQM, on a alors $\vec{a} = 0$, le proton possède donc un mouvement **rectiligne et uniforme**.

Pour être rigoureux, le poids ne peut pas être négligé, comme c'est la seule force. Par contre on peut constater que l'effet du poids ne sera visible qu'à des temps "longs" devant $\frac{2v_0}{g}$. En effet, si on intègre la LQM projetée, on aboutit à $y = v_0 t$ et $z = -\frac{1}{2}gt^2$, et $z \ll y$ tant que $t \ll \frac{2v_0}{g}$, ce qui doit correspondre à un temps très long vu la vitesse initiale importante.