

# De Thomson au Linac4

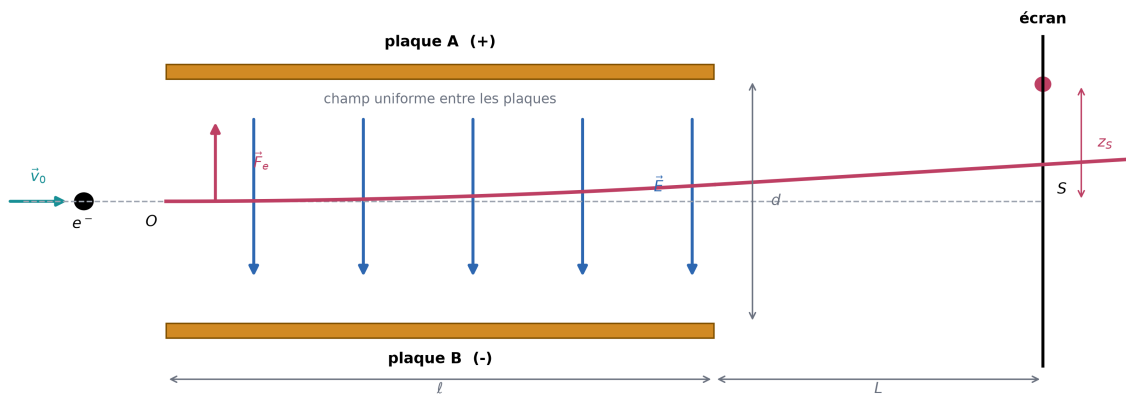
Terminale spécialité Physique-Chimie · Mouvement dans un champ uniforme

## 1. Champ, force et sens de la déviation

Le champ électrique d'un condensateur plan est dirigé de la plaque positive vers la plaque négative. Il est donc vertical, vers le bas :

$$\vec{E} = -E \vec{u}_z.$$

La charge de l'électron vaut  $q = -e$ . La force électrique  $\vec{F}_e = q\vec{E}$  est donc opposée au champ, c'est-à-dire verticale vers le haut. L'électron est dévié vers la plaque positive A.



Document 1 corrigé - Champ, force et trajectoire de l'électron.

## 2. Comparaison des forces

La valeur du champ électrique est :

$$E = \frac{U}{d} = \frac{200}{4,00 \times 10^{-2}} = 5,00 \times 10^3 \text{ V m}^{-1}.$$

La force électrique et le poids ont pour valeurs :

$$F_e = eE = 1,60 \times 10^{-19} \times 5,00 \times 10^3 = 8,00 \times 10^{-16} \text{ N},$$

$$P = m_e g = 9,11 \times 10^{-31} \times 9,81 = 8,94 \times 10^{-30} \text{ N}.$$

Ainsi :

$$\frac{F_e}{P} = 8,95 \times 10^{13}.$$

La force électrique est près de  $10^{14}$  fois plus grande que le poids : le poids de l'électron est totalement négligeable.

### 3. Équations horaires et trajectoire

Le système est l'électron, étudié dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen. Entre les plaques, son poids est négligé : la seule force retenue est la force électrique.

La deuxième loi de Newton donne :

$$m_e \vec{a} = \vec{F}_e = q \vec{E}.$$

Comme  $q = -e$  et  $\vec{E} = -E \vec{u}_z$  :

$$a_x = 0, \quad a_z = \frac{eE}{m_e}.$$

Une première intégration, avec  $v_x(0) = v_0$  et  $v_z(0) = 0$ , conduit à :

$$v_x(t) = v_0, \quad v_z(t) = \frac{eE}{m_e} t.$$

Une seconde intégration, avec  $x(0) = z(0) = 0$ , donne :

$$\boxed{x(t) = v_0 t}, \quad \boxed{z(t) = \frac{eE}{2m_e} t^2}.$$

De  $x = v_0 t$ , on tire  $t = x/v_0$ . L'équation de la trajectoire devient :

$$\boxed{z(x) = \frac{eE}{2m_e v_0^2} x^2}.$$

La trajectoire est une parabole tournée vers la plaque positive.

### 4. Sortie du condensateur et écran

Le mouvement horizontal est uniforme. La date de sortie des plaques est :

$$t_\ell = \frac{\ell}{v_0} = \frac{5,00 \times 10^{-2}}{2,00 \times 10^7} = 2,50 \times 10^{-9} \text{ s}.$$

L'accélération verticale vaut :

$$a_z = \frac{eE}{m_e} = 8,78 \times 10^{14} \text{ m s}^{-2}.$$

À la sortie :

$$z_\ell = \frac{1}{2} a_z t_\ell^2 = 2,74 \times 10^{-3} \text{ m} = 2,74 \text{ mm}.$$

La demi-distance entre les plaques vaut  $d/2 = 20,0 \text{ mm}$ ;  $z_\ell < d/2$ . L'électron sort donc sans heurter la plaque A.

Sa composante verticale de vitesse à la sortie vaut :

$$v_{z\ell} = a_z t_\ell = 2,20 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}.$$

Après la sortie, le champ est nul et le poids reste négligeable. L'électron est pseudo-isolé : son mouvement devient rectiligne uniforme, suivant la tangente à la parabole de sortie. Le temps nécessaire pour atteindre l'écran est :

$$\Delta t = \frac{L}{v_0} = 7,50 \times 10^{-9} \text{ s.}$$

La coordonnée du point d'impact est donc :

$$z_S = z_\ell + v_{z\ell} \Delta t = 2,74 \times 10^{-3} + (2,20 \times 10^6)(7,50 \times 10^{-9}),$$

$$z_S = 1,92 \times 10^{-2} \text{ m} = 19,2 \text{ mm}.$$

## 5. Le contrôle de la déviation par le script

### a. Les trois lignes à écrire

La première reprend les questions 2 et 3 : le champ vaut  $E = U/d$  et l'accélération  $a_z = eE/m_e$ , le poids étant négligeable. Les deux suivantes sont les équations horaires établies à la question 3, avec une vitesse initiale horizontale et une origine en  $O$  :

```
a = e * (U / d) / m
```

```
x = v0 * t
```

```
z = 0.5 * a * t**2
```

La ligne de `a` est écrite **hors** de la boucle, sans indentation : l'accélération ne dépend pas du temps, la recalculer à chaque tour serait inutile. Les deux autres conservent leur indentation de quatre espaces : si `z` sortait du bloc de la boucle, il resterait nul et le test suivant ne détecterait jamais rien. Écrire `0.5 * a * t * 2` au lieu de `t**2` est l'erreur la plus fréquente ; `**` est l'opérateur puissance.

### b. Ce que dit l'affichage

La boucle s'arrête dès que l'électron a parcouru la longueur des plaques : les deux premiers nombres sont l'abscisse et l'altitude **à la sortie du condensateur**, et non sur l'écran.

Le premier vaut  $5,00 \times 10^{-2} \text{ m}$ , c'est-à-dire  $\ell$ . Le pas  $dt = 1 \text{ ps}$  fait avancer l'électron de  $v_0 dt = 2,0 \times 10^{-5} \text{ m}$  à chaque tour, soit exactement 2500 tours pour franchir les 5,00 cm : la boucle s'arrête pile à la sortie. Les décimales qui suivent sont du bruit d'arrondi de la machine et ne doivent pas être recopiées (fiche **03**).

Le deuxième, arrondi à trois chiffres significatifs, vaut  $z = 2,74 \times 10^{-3} \text{ m}$  : c'est exactement le  $z_\ell$  de la question 4.

Le troisième, `False`, signifie que la condition  $z > d/2$  n'a jamais été vérifiée : l'électron n'a pas touché la plaque A. C'est la conclusion de la question 4.

Le calcul point par point et le calcul analytique s'accordent ici parce que le mouvement horizontal est uniforme :  $x = v_0 * t$  est exact, et non approché. Un pas de temps plus grossier déplacerait seulement l'instant d'arrêt de la boucle, pas la trajectoire elle-même.

### c. La tension limite

La condition de contact porte sur l'altitude atteinte à la sortie des plaques, soit  $z_\ell = d/2$ . Or

$$z_\ell = \frac{1}{2} \frac{eU}{m_e d} \left( \frac{\ell}{v_0} \right)^2$$

est **proportionnelle à  $U$**  : toutes les autres grandeurs sont fixées. Il suffit donc d'appliquer un facteur au résultat de la question 4 :

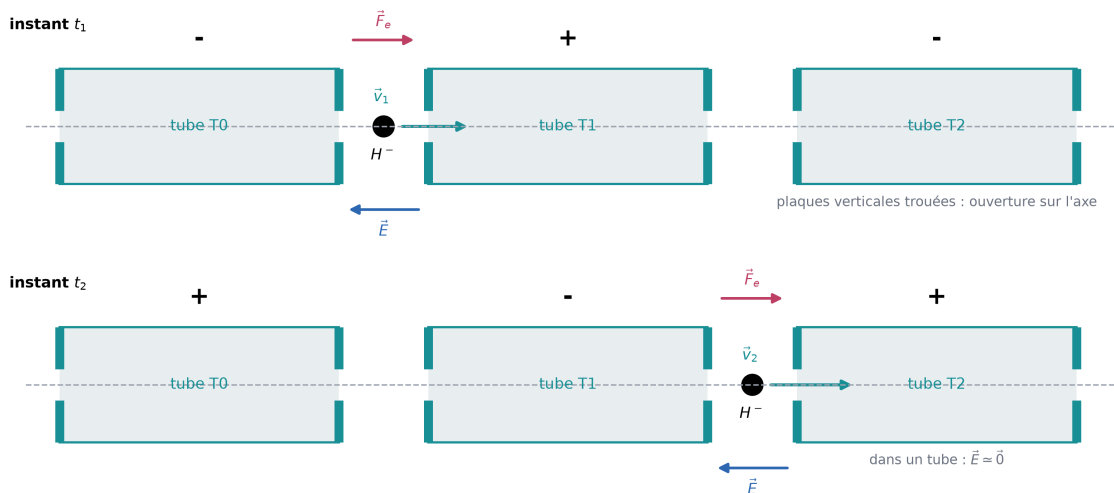
$$U_{\text{lim}} = U \times \frac{d/2}{z_\ell} = 200 \times \frac{2,00 \times 10^{-2}}{2,74 \times 10^{-3}} = \boxed{1,46 \times 10^3 \text{ V.}}$$

Au-delà d'environ 1,46 kV, l'électron heurte la plaque A avant d'être sorti et touche passe à True. C'est près de sept fois la tension de l'expérience : le réglage retenu laisse une marge confortable.

## 6. Principe de l'accélérateur linéaire

Pour accélérer l'ion  $H^-$  vers la droite, la force électrique doit être dirigée vers la droite. Comme sa charge est négative, le champ électrique doit être dirigé vers la gauche. Le champ allant de la borne positive vers la borne négative, le tube situé devant l'ion doit être positif et celui situé derrière lui négatif.

À l'instant  $t_1$ , on attribue donc les polarités  $-$ ,  $+$ ,  $-$  aux tubes T0, T1 et T2. Entre les deux franchissements, la tension alternative s'inverse et chaque tube change de polarité. À l'instant  $t_2$ , les polarités sont donc  $+$ ,  $-$ ,  $+$ . L'ion rencontre ainsi de nouveau un champ vers la gauche et une force dirigée vers la droite.



### Document 2 corrigé - Polarités et forces lors des deux franchissements.

Dans chaque intervalle,  $\vec{E} \neq \vec{0}$  et la force électrique, colinéaire à la vitesse, accélère l'ion : le mouvement est rectiligne accéléré et la valeur  $v$  de la vitesse augmente. À l'intérieur d'un tube conducteur,  $\vec{E} \simeq \vec{0}$  ; l'ion est alors pseudo-isolé : son mouvement est rectiligne uniforme et la valeur  $v$  reste constante jusqu'à l'intervalle suivant. L'ion ayant gagné de la vitesse pendant les franchissements,  $\boxed{v_2 > v_1}$ .

La fréquence étant fixe, la période  $T$  de la tension alternative est constante. Les polarités s'inversent toutes les demi-périodes : le temps passé par l'ion dans un tube doit donc rester voisin de  $T/2$ . Or, pour un tube de longueur  $L_{\text{tube}}$  parcouru à la vitesse  $v$ ,  $\Delta t = L_{\text{tube}}/v$ . Comme  $v$  augmente, il faut donc augmenter  $L_{\text{tube}}$  pour conserver la même durée de traversée : les tubes successifs doivent être de plus en plus longs.