

Le point de départ des protons utilisés dans les expériences menées au CERN est un accélérateur linéaire. Un tel accélérateur linéaire 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 afin d'explorer la structure de la matière.

L'accélérateur est constitué de blocs métalliques cylindriques séparés par des cavités vides, et comprenant au voisinage de leur axe un passage tubulaire dans lequel les particules chargées peuvent se déplacer. Les protons, sont accélérés dans les cavités où règne un champ électrique \vec{E} .

Dans les passages tubulaires, le champ électrique est nul. Toutes les cavités ont la même longueur d et chaque cavité peut être modélisée par un condensateur plan.

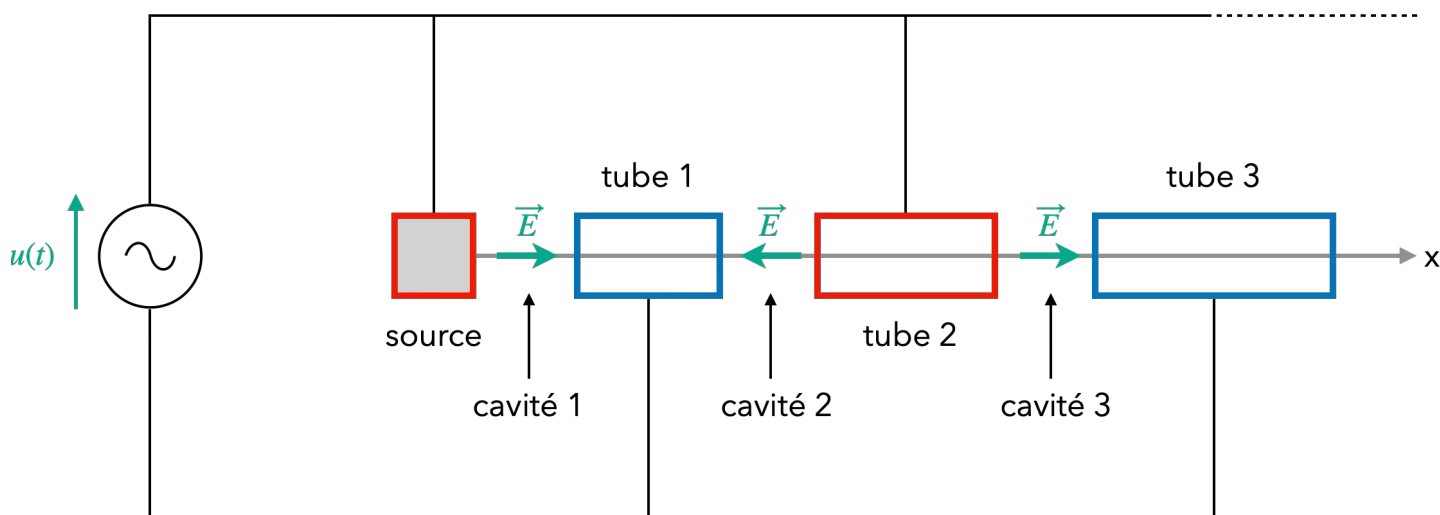
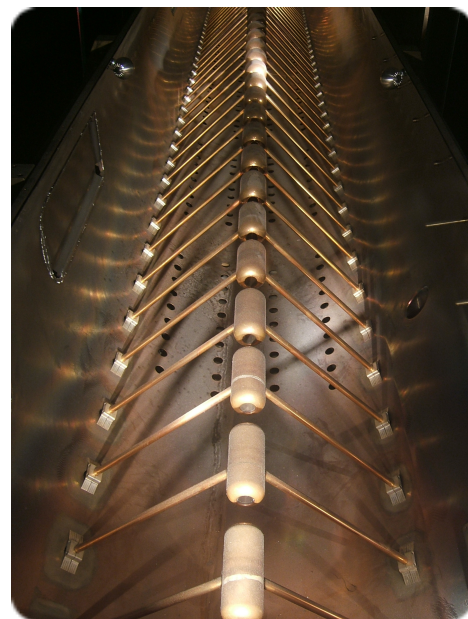


figure 1 : schéma de fonction de l'accélérateur linéaire à un instant t_1

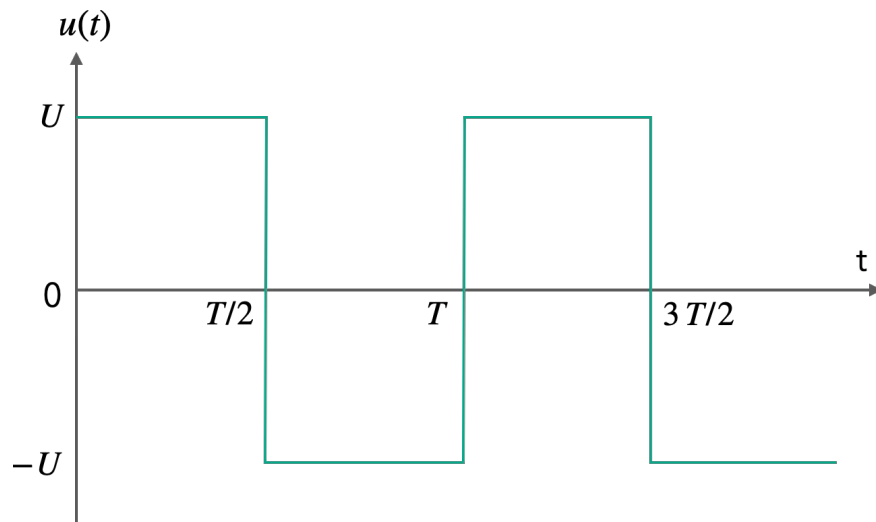
Les protons sont émis par une source avec une vitesse négligeable.

Données :

- masse d'un proton : $m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$;
- charge électrique élémentaire : $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$;
- expression de la norme du vecteur champ électrique : $E = \frac{|U|}{d}$,
où U représente la tension entre deux blocs consécutifs et d la distance les séparant ;
- fréquence de la tension alternative : $f = 25,0 \text{ MHz}$;
- amplitude de la tension alternative : $U = 2,00 \text{ MV}$;
- longueur d'une cavité : $d = 10,0 \text{ cm}$;
- $1,00 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$

On souhaite que les protons, pouvant être considérés comme au repos à la sortie de la source, atteignent une énergie de 50,0 MeV.

La tension $u(t)$ délivrée par le générateur est représentée ci-dessous.



1. La **figure 1** représente l'état des champs à l'instant t_1 où le proton entre dans la cavité 1 avec une vitesse négligeable. La tension $u(t)$ vient alors de basculer de $-U$ à U .
Déterminer la durée que doit mettre le proton pour parcourir la distance qui le sépare de la sortie du tube 1 afin qu'il puisse de nouveau être accéléré dans la cavité 2.
2. Déterminer la longueur du tube 1.
3. Expliquer pourquoi les tubes successifs doivent être de plus en plus longs.
4. Montrer que cela nécessite 25 cavités pour accélérer les protons jusqu'à 50,0 MeV.

Le code python suivant permet de déterminer la longueur de chaque tube, l'énergie gagnée ainsi que la longueur totale. Mais la ligne 26, essentielle, a été effacée.

```

1 from math import sqrt
2
3 e = 1.60E-19
4 m = 1.67E-27
5 d = 0.100
6 U = 2.00E6
7 T = 1/25.0E6
8 E = 0
9
10 def calcul_vs(v_e):
11     return sqrt( 2 * e * U / m + v_e**2)
12
13 def calcul_taille_tube(v_e,v_s):
14     t_cavité = d / (v_e + (v_s - v_e) / 2) # tire partie de l'augmentation linéaire de la vitesse
15     return (T/2 - t_cavité) * v_s # le temps passé dans le tube est T/2- t_cavité
16
17 L = 0
18 v0 = 0
19 for i in range(24): # le 25e tube peut être aussi court que l'on veut
20     E = E + U
21     print(f"Énergie atteinte après la cavité {i+1} : {E:.2E} eV")
22     v1 = calcul_vs(v0)
23     l = calcul_taille_tube(v0,v1)
24     print(f"Longueur du tube {i+1} : {l:.2E} m\n")
25     L = L + d + l # Longueur totale
26      
27
28 L = L + d # On ajoute la dernière cavité
29 print(f"Énergie atteinte après la dernière cavité : {E+U:.2E} eV\n")
30 print(f"Longueur totale parcourue : L = {L:.2E} m")

```

5. Retrouver le code de la ligne 26.