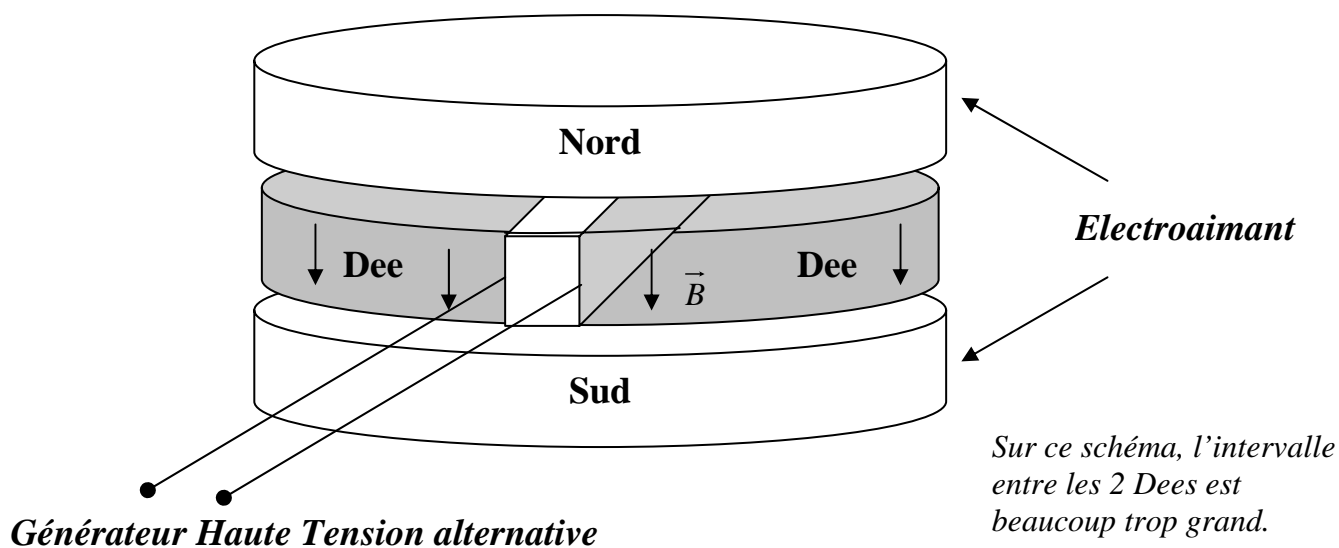


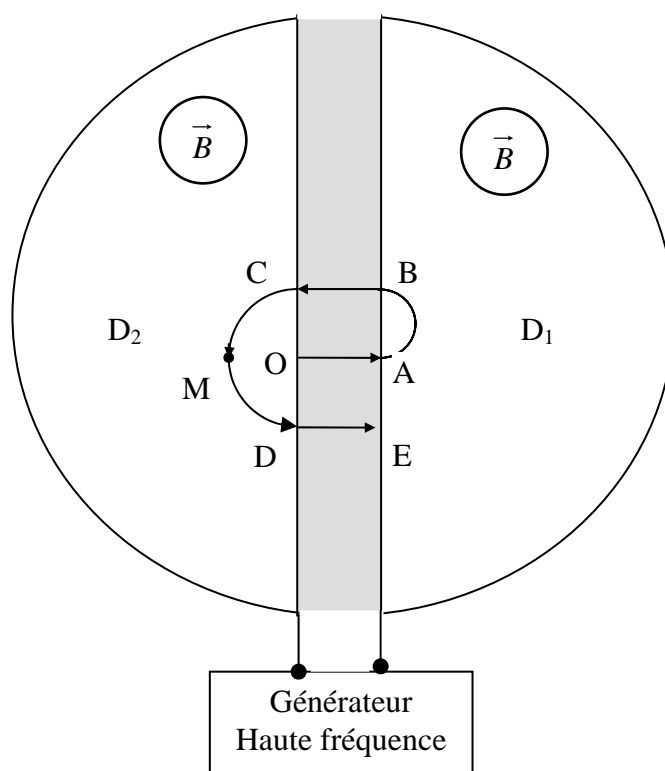
Principe du cyclotron du Centre de Protonthérapie d'Orsay (CPO)



Des **protons**, de masse : $m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ et de charge : $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, animés d'une vitesse horizontale v_0 négligeable, sont injectés au point O de l'espace séparant 2 Dees, D_1 et D_2 , très légèrement écartés, creux, en forme de 2 demi cylindres de rayon R dans lesquels règne un vide poussé.

Ces Dees sont placés dans un champ magnétique \vec{B} uniforme et constant d'intensité : $B = 1,60 \text{ T}$, perpendiculaire au plan de la figure.

Entre les 2 « Dees », une tension haute fréquence de valeur maximale : $U = V_1 - V_2 = 100 \text{ kV}$ crée un champ électrique \vec{E} perpendiculaire aux parois des Dees.



1) Action du champ magnétique \vec{B} dans les Dees

La trajectoire d'un proton à l'intérieur d'un *Dee* est un demi cercle de rayon : $R = \frac{mv}{eB}$

a) La rayon de la trajectoire

- est indépendant de la vitesse du proton dans un *Dee*
- augmente avec la valeur de \vec{B}
- dépend de l'énergie cinétique du proton

} Choisir la seule bonne réponse.

b) Dans un *Dee*, la vitesse des protons

- diminue
- augmente
- reste constante

} Choisir la seule bonne réponse.

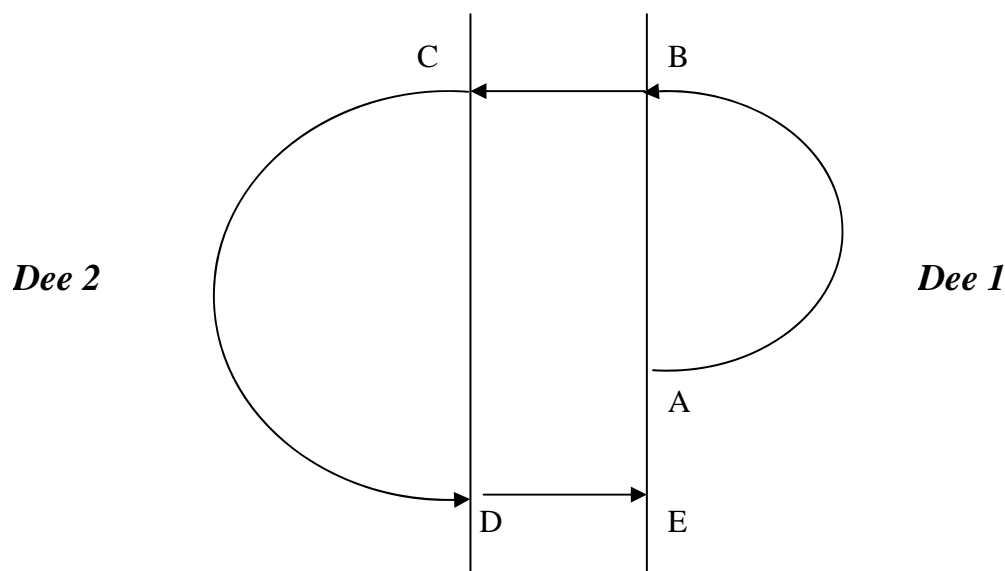
c) L'énergie cinétique du proton

- diminue
- augmente
- reste constante

} Choisir la seule bonne réponse.

d) Représenter la vitesse \vec{v} du proton et la force magnétique \vec{F}_m qui s'exerce sur ce proton à l'intérieur d'un *Dee* :

- sur la trajectoire *AB*
- sur la trajectoire *CD*



e) En déduire la direction et le sens du champ magnétique \vec{B} .

f) Quelle est, en fonction de R et de π , la distance d parcourue dans un *Dee* lors d'un demi-tour?

g) Montrer que la durée Δt de la trajectoire dans un *Dee* est indépendante de la vitesse des protons.

- Donner l'expression de Δt en fonction de π , m , e et B .

2) Action du champ électrique \vec{E} entre les Dees

Lors de son passage entre les « Dees », le proton décrit une trajectoire rectiligne et est accéléré.

a) Sa vitesse \vec{v} :

- reste constante
 - augmente
 - varie de façon sinusoïdale
- } Choisir la seule bonne réponse.

b) Donner la direction et le sens du champ électrique \vec{E} qui règne entre D_1 et D_2 quand le proton décrit :

- le trajet OA
 - le trajet BC
 - le trajet DE
- } Le représenter sur 3 schémas successifs

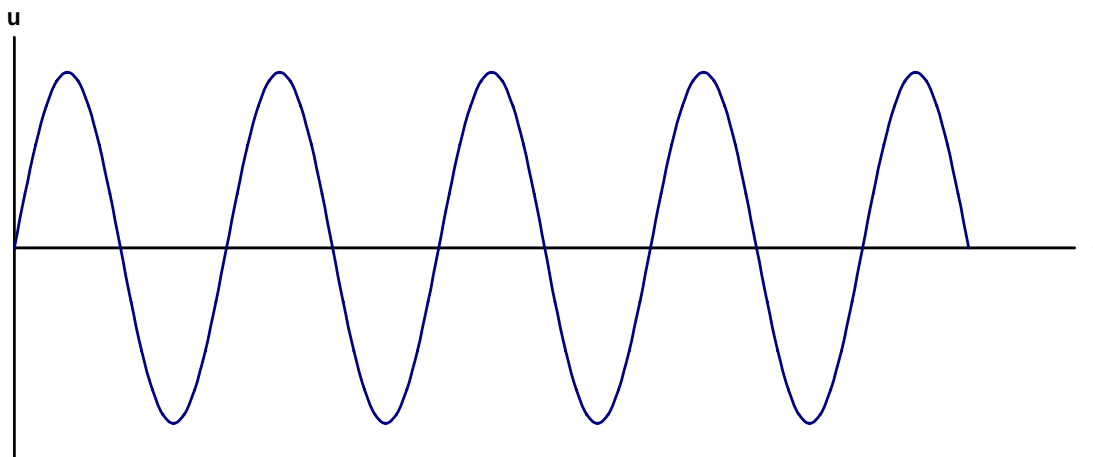
Dans chaque cas, quel doit être le signe de la tension U pour que les protons soient toujours accélérés quand ils passent entre les Dees ?

e) Noter sur le graphe : $u = f(t)$ le moment où le proton passe entre O et A, puis lorsqu'il passe entre B et C, puis lorsqu'il passe entre D et E, pour être toujours accéléré.

f) Noter sur le graphe : $u = f(t)$ le temps Δt déterminé à la question 1) g)

- Quelle doit être alors la période T de la tension sinusoïdale ?
- Quelle est la fréquence f de cette tension (appelée fréquence cyclotron) ?

Variation de la tension u en fonction du temps



g) Quelle est la variation de l'énergie cinétique ΔE_c des protons lorsqu'ils traversent l'espace compris entre les Dees si la tension appliquée entre les 2 Dees est : $U = 100 \text{ kV}$

- sur le trajet OA ?
 - sur le trajet BC ?
 - sur le trajet DE ?
- } Déterminer l'énergie cinétique E_{cE} au passage en E en fonction de e et de U .
- Généraliser cette expression.

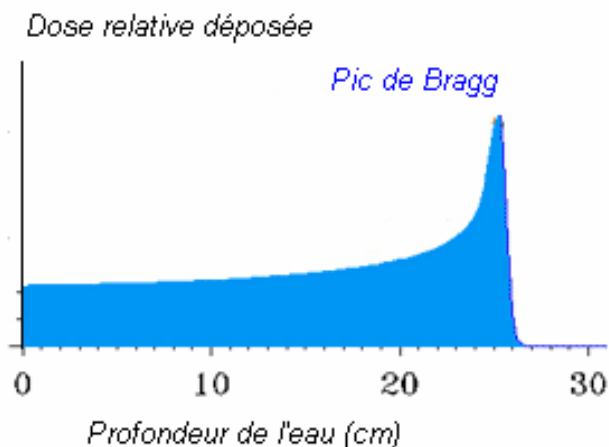
3) Energie de sortie

L'énergie finale des protons doit être : $E_c = 200 \text{ MeV}$

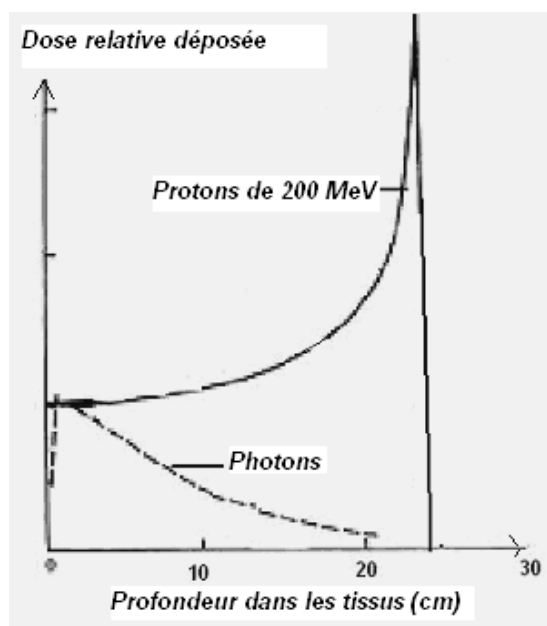
- Combien de *tours* N doit effectuer un proton ?
- Exprimer l'énergie E_c en Joules (J).
- Quelle est sa vitesse finale v_f avant d'être éjecté ?
- Quel est le rayon R du dernier $\frac{1}{2}$ tour effectué ?

4) Utilisation des protons à la sortie du cyclotron

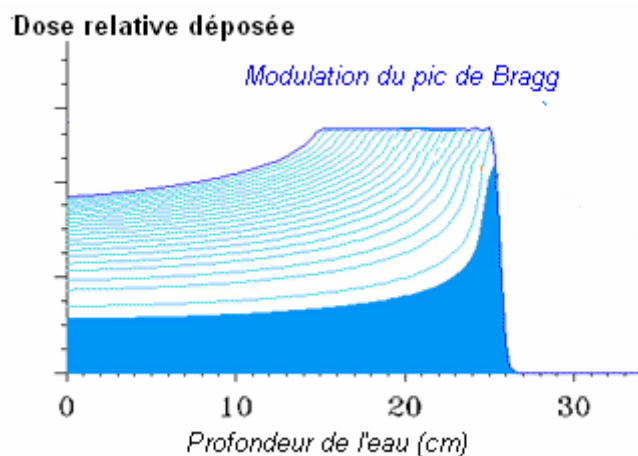
La dose relative déposée par des *protons de 200 MeV* est représentée par la courbe de Bragg.



- Quel est le parcours maximal P des protons de 200 MeV dans l'eau ?
 - A quelle profondeur les protons cèdent-ils principalement leur énergie ?
- L'énergie nécessaire à la formation d'une *paire électron-ion* dans l'eau est : $w = 33 \text{ eV}$.
 - Combien d'ionisations vont produire ces protons lors de leur parcours ?
 - Où seront-elles les plus nombreuses ?
- Quelle avantage voyez-vous à l'utilisation de protons par rapport à celle de photons ?



d) **Rôle de l'absorbeur** : la position du pic de Bragg varie suivant l'énergie du faisceau de protons incidents. Un dispositif absorbeur d'énergie à plaques de *Lexan* d'épaisseurs variables permet de déplacer le pic de Bragg.



- A quelle *profondeur* minimale la tumeur doit-elle se trouver ?
- Quelle est l'*épaisseur maximale* de tumeur susceptible d'être irradiée ?

e) Les résultats les plus impressionnants ont été obtenus dans les tumeurs de l'œil.

La radiothérapie par protons délivre *60 Gray Equivalent Cobalt* en 4 séances.

- Pourquoi cette dose n'est-elle pas mortelle pour le patient ?