

Tomographie par émission de positons : marquage au fluor 18

Par sa demi-vie et ses caractéristiques physico-chimiques, le *fluor 18* permet de marquer des molécules d'intérêt biologique et d'obtenir des radiopharmaceutiques pour la *Tomographie par Emission de Positons*.

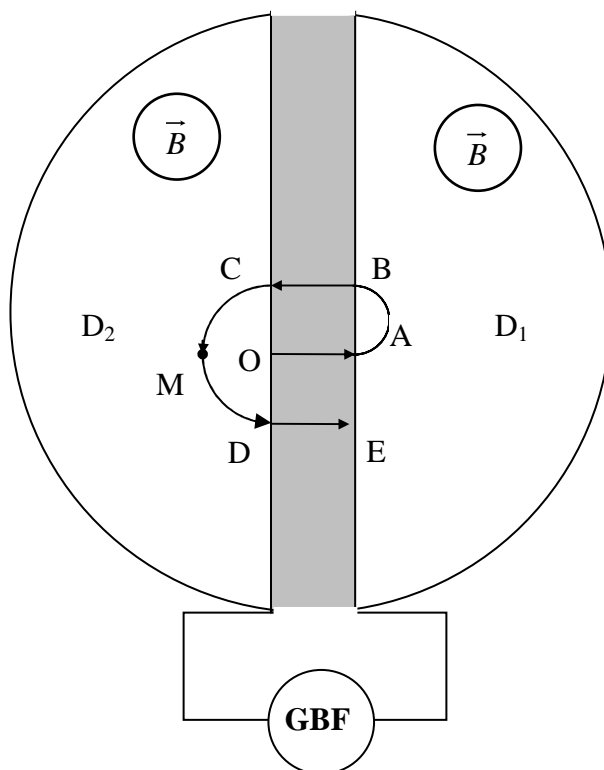
La principale réaction nucléaire qui permet de produire le *fluor 18* utilise des protons de 16 MeV issus d'un cyclotron. La cible est constituée d'eau enrichie en *oxygène 18*, isotope stable mais rare (abondance isotopique 0,1 %), et la réaction produit l'ion fluorure $^{18}\text{F}^-$ en solution dans l'eau. Une irradiation d'une heure avec $20 \mu\text{A}$ de protons de 16 MeV permet, selon le volume de la cible d'eau enrichie, une production d'au moins 40 GBq de ^{18}F .

Extrait de « Médecine Nucléaire » - Imagerie fonctionnelle et métabolique – 2005 – vol.29

1) Principe du cyclotron

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*, arrivent 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 le vide. Ces *Dees* sont placés dans un champ magnétique \vec{B} uniforme et constant d'intensité : $B = 1,50 \text{ T}$, perpendiculaire au plan de la figure.

Entre les 2 « *Dees* », une tension alternative de valeur maximale : $U = V_1 - V_2 = 30\,000 \text{ V}$ crée un champ électrique \vec{E} perpendiculaire aux parois des *Dees*.



1) Action du champ magnétique dans les Dees

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

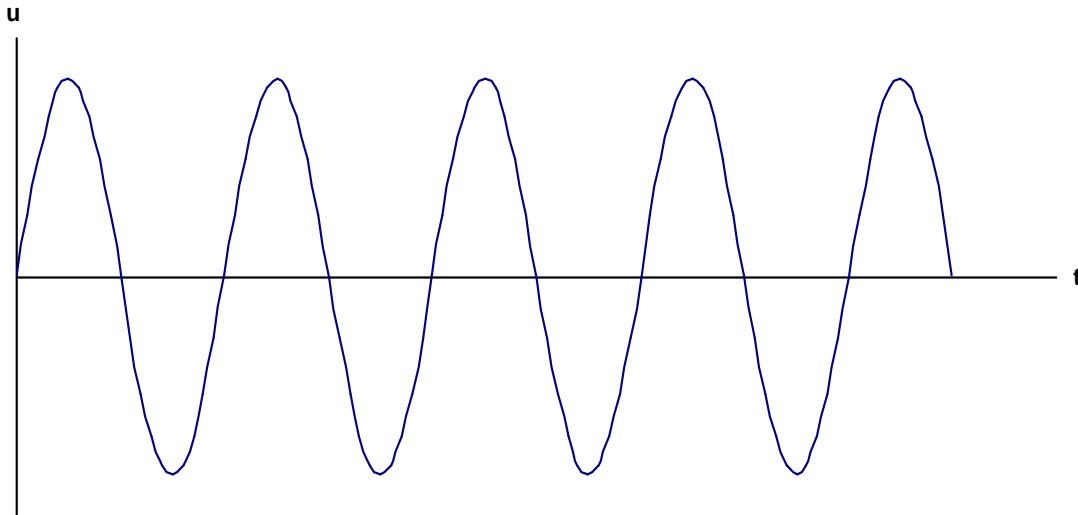
- a) De façon générale, le rayon de la trajectoire :
- diminue avec la vitesse
 - augmente avec la valeur de \vec{B}
 - dépend de la masse du proton
- } Choisir la seule bonne réponse.
- b) De façon générale, un champ magnétique \vec{B} uniforme perpendiculaire à la vitesse \vec{v} de la particule chargée :
- lui communique une énergie cinétique importante
 - la maintient sur une trajectoire circulaire
 - la maintient dans un même plan
 - la freine
- } Choisir 2 réponses.
- c) Représenter la vitesse \vec{v} et la force magnétique \vec{F}_m qui s'exerce sur le proton à l'intérieur d'un *Dee* :
- sur la trajectoire AB
 - sur la trajectoire CD
- Refaire un grand schéma*
- d) En déduire la direction et le sens du champ magnétique \vec{B} dans les Dees.
- e) Quelle est, en fonction de R , la distance l parcourue dans un *Dee* ?
- f) La durée du parcours Δt d'un proton dans un des Dees
- dépend de la vitesse d'entrée de la particule dans un *Dee*
 - dépend de la charge de la particule
 - est proportionnel au champ magnétique
 - dépend de la masse de la particule
- } *Justifier la réponse en donnant l'expression de Δt en fonction de π , m , e et B .*

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

Entre les « *Dees* », le proton décrit une trajectoire rectiligne.

- a) L'accélération d'un proton a pour norme :
- $a = me/E$
 - $a = mE/e$
 - $a = eE/m$
- } Justifier
- b) Quelle est le signe de la tension : $U = V_1 - V_2$ quand le proton décrit :
- le trajet BC
 - le trajet DE
 - Le champ électrique a-t-il toujours le même sens ?
- } *Faire 2 schémas successifs.*
- c) Noter sur le graphe : $u = f(t)$ le moment où doit passer le proton pour être toujours accéléré lorsqu'il passe en B, puis en D.
- e) Noter sur le graphe 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 ? Donner les valeurs littérale et numériques.

Variation de la tension en fonction du temps t



- f) 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 : $U = 30\,000\text{ V}$
- 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**

- a) L'énergie finale d'un proton doit être : $E_c = 16\text{ MeV}$
- Combien de 1/2 tours n doit effectuer un proton ?
 - Exprimer l'énergie E_c en Joules (J).
 - Quelle est sa vitesse finale avant d'être éjecté ?
 - Quel est le rayon R du dernier 1/2 tour effectué ?
- b) Quelle tension, appliquée entre 2 plaques parallèles, donnerait aux protons la même énergie ?
- Pourquoi ne pas l'avoir fait directement ?

2) **Production du fluor 18 : ${}^{18}_9\text{F}$**

- a) Le fluor 18 est fabriqué après collision entre un proton et un noyau d'oxygène ${}^{18}_8\text{O}$ contenu dans une molécule d'eau. Une autre particule élémentaire est émise lors de cette collision.
- Ecrire la réaction nucléaire en précisant les 2 lois utilisées.
 - Quel est le nom de la particule formée en même temps que le fluor 18 ?
- b) Il faut un courant I de $20\ \mu\text{A}$ de protons pendant une heure pour produire : $A = 40\text{ GBq}$ de ${}^{18}_9\text{F}$ de période radioactive : $T = 110\text{ minutes}$.
- Combien de protons n sont émis en 1 seconde ?

- Combien de protons n' sont émis en 1 heure ?
- Combien de noyaux N de $^{18}_9F$ sont fabriqués en 1 heure ?
Rappel : $A = \lambda N$
- Les protons sont-ils « efficaces » ? Justifier la réponse.

3) Désintégration du fluor 18

Le fluor $^{18}_9F$ se désintègre par émission β^+ pour donner de l'oxygène O, le noyau de l'oxygène se retrouvant dans son état fondamental.

- Ecrire l'équation de désintégration.
- Donner le schéma de désintégration
- Pourquoi le fluor 18 peut-il être détecté par l'intermédiaire de 2 photons d'énergie :
 $E = 511 \text{ keV}$ émis dans des directions opposées ?

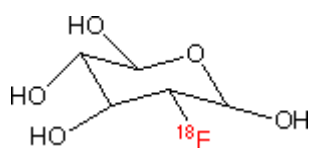
4) Détection des photons de 511 keV

Un dispositif composé d'un cristal scintillateur, une photocathode et un *photomultiplicateur* permet de détecter les photons.

- Donner le schéma de principe d'un photomultiplicateur.
- Sur ce schéma, noter la force électrique qui permet d'accélérer les électrons d'un dynode à une autre.
- Indiquer si la différence de potentiel entre la dynode (i) et la dynode (i + 1) est positive ou négative.

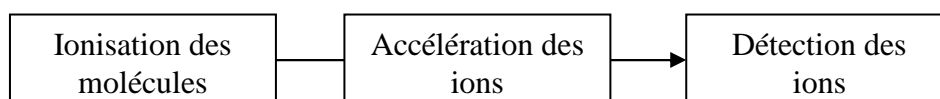
5) Contrôle

Les molécules fabriquées par radiosynthèse subissent un contrôle pour s'assurer de leur pureté chimique et radiochimique. Ce contrôle est réalisé grâce à un *spectromètre de masse*.

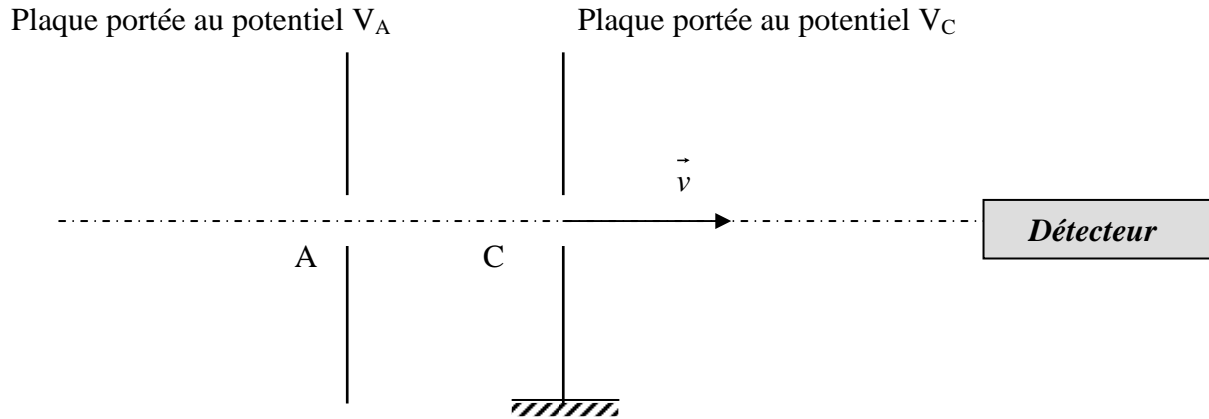


Le $[^{18}F]FDG$ est la molécule la plus utilisée dans les centres TEP pour suivre le métabolisme du glucose dans des pathologies comme l'épilepsie, les tumeurs, les dégénérescences ou les atteintes cardiaques.

Pour vérifier que le $^{18}_9F$ a bien remplacé le groupement CH_2OH dans la molécule de *glucose*, on ionise les molécules de masse m qui se charge (+ e).



1) - Accélération des ions positifs



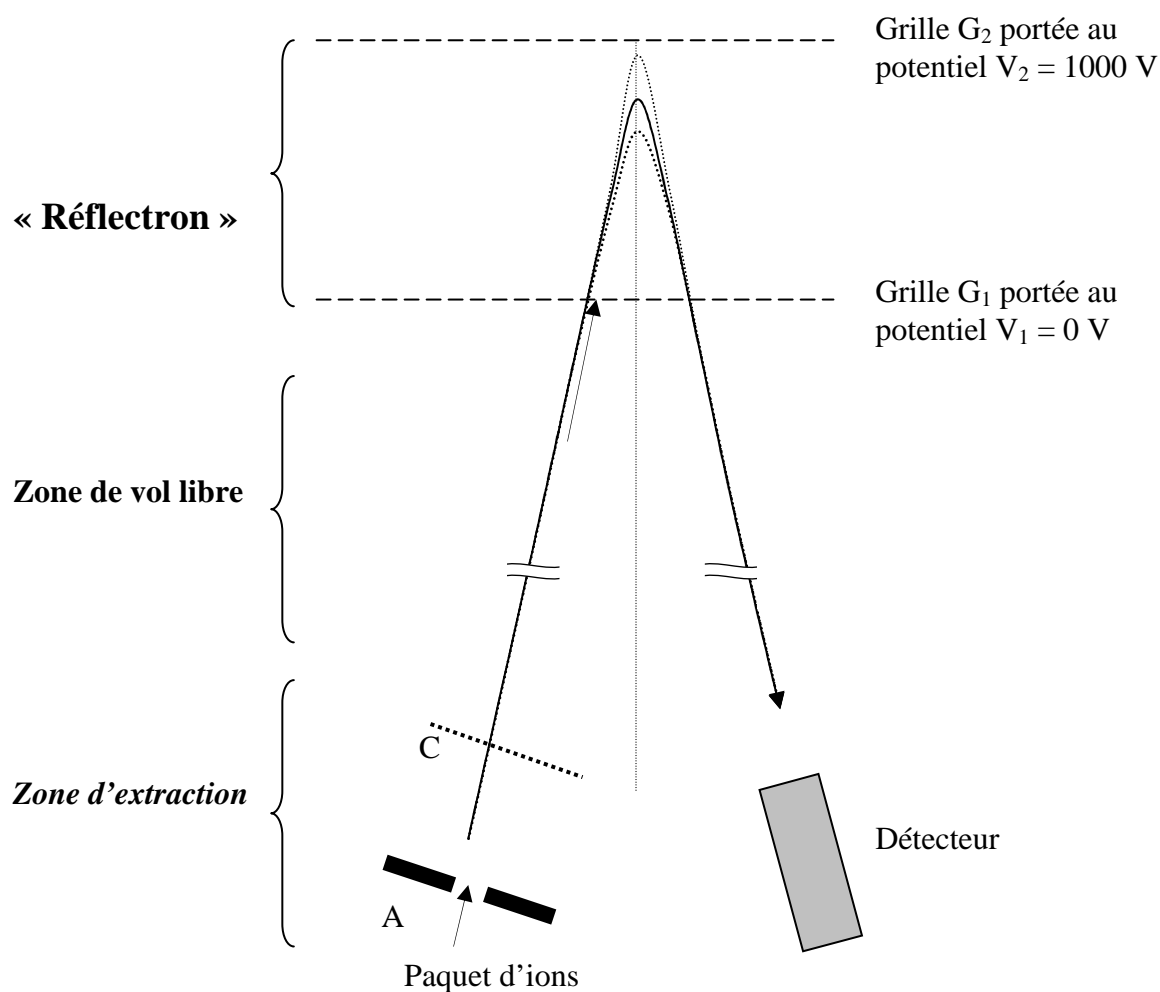
- Les ions, de *masse* m et de *charge* $(+ e)$, arrivent en A avec une vitesse \vec{v}_0 que l'on suppose négligeable. Quel doit être le signe de la différence de potentiel : $U = V_A - V_C$ pour qu'ils soient accélérés entre les 2 plaques ?
- Quelle est la nature du mouvement des ions entre les plaques ?
- Donner l'expression de l'énergie cinétique des ions en C (*pas de démonstration demandée*).
- Quelle est leur vitesse v en fonction de e , U et m ?
- Montrer que des ions de même charge, mais de masse différente m_1 et m_2 , ont des vitesses v_1 et v_2 différentes en C.

2) Temps de vol

- Entre C et le détecteur, le champ électrique est nul.
 - Quelle est la *nature du mouvement* des ions ?
- Le détecteur se trouve à la distance : $d = 3,50 \text{ m}$ au point C. Quel est le temps t mis par un ion animé d'une vitesse v pour parcourir cette distance ?
- Calculer t si : $U = 1\,000 \text{ V}$ $m = 2,774 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$ $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ $d = 3,50 \text{ m}$
- Montrer que des ions de même charge, mais de masse différente m_1 et m_2 , passant au même instant au point C, atteignent le détecteur à des temps t_1 et t_2 tel que : $\frac{t_1}{t_2} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}}$

3) Comment augmenter le "temps de vol" ?

Pour augmenter le temps de vol, on utilise un "réflectron", c'est à dire une « lentille électrostatique » formée de 2 grilles portées à des potentiels électriques différents.



Quelle force électrique \vec{F} s'exerce sur un ion de charge (+e) dans le *réflectron* ?

- Préciser sa direction et son sens.
- Quelle est la trajectoire des ions entre les 2 grilles ?

Données numériques

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad 1\text{eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$