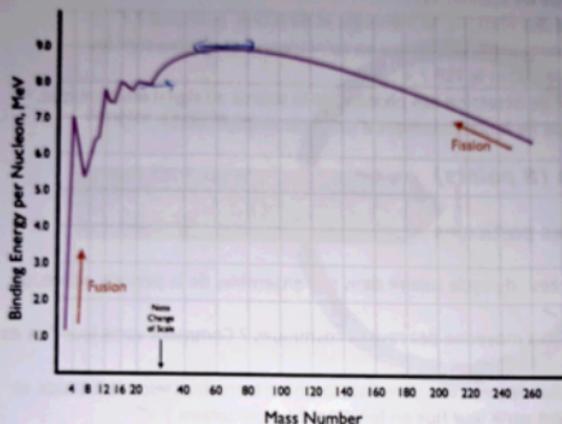


1.  Masse atomique et énergie nucléaire (10 points) ;

a) Détaillez la formule de la masse atomique avec l'énergie de liaison atomique et nucléaire.

La courbe en dessous montre  $B_n$  en fonction du nombre atomique,  $A$  :



b) Expliquez comment il faut interpréter cette courbe pour avoir l'idée de générer l'énergie dans un réacteur nucléaire. ✓

c) Expliquez en 10 lignes le fonctionnement d'un réacteur nucléaire. ✓

d) Quelle est l'ordre de grandeur de la différence du gain en énergie dans la combustion nucléaire et la combustion chimique (brûler du charbon par exemple), argumentez ?

2.  Interactions avec la matière (10 points):

a) Décrivez les désintégrations  $\alpha$ ,  $\beta^+$ ,  $\beta^-$  et  $\gamma$ . Quel spectre pour les produits d'interaction : mono-énergétique ou continu, pourquoi ? ✓

b) Quelles sont les interactions des photons avec la matière ?

c) Donnez et commentez la formule de l'absorption des photons dans la matière.

La perte d'énergie des différentes particules est décrite par la formule de Bethe et Bloch :

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

d) Donnez l'allure de  $dE/dx$  en fonction de  $\beta\gamma$  et commentez les 3 régions principales.

- e) Montrez schématiquement la courbe de Bragg et expliquez pourquoi la thérapie à protons est plus adaptée au traitement de cancer en profondeur que l'irradiation avec des rayons X.

Dans les travaux pratiques, nous avons vu le principe de la tomographie à émission des positrons.

- Expliquez le principe du scanner TEP.
- Quelle est l'origine des photons, leur énergie et direction, pourquoi ?
- Quelles sont les avantages de la mesure en coïncidence, et quelles sont les coïncidences utilisées dans le TEP ?
- Expliquez la chaîne de détection des photons de la source au signal électronique.
- Expliquez le principe de fonctionnement d'un photomultiplicateur.

### Questions de cours (8 points)

L'environnement et les particules

- Quelle sont les durées : du cycle solaire dans son ensemble, de la période active, de la période calme ?
- Donner la composition moyenne des rayons cosmiques ? Comment varie leur flux en fonction du cycle solaire ?
- Où trouve-t-on le plus de neutrons dans l'atmosphère terrestre (selon la latitude et l'altitude) ? Comment varie leur flux en fonction du cycle solaire ?
- Classer par ordre d'abondance croissante les particules solaires, les particules piégées, les rayons cosmiques.  
Classer par ordre d'énergie croissante les particules solaires, les particules piégées, les rayons cosmiques.

Les effets

- Parmi les électrons, les protons et les neutrons, citer les deux qui sont les plus efficaces pour générer des déplacements atomiques en justifiant votre réponse.
- Donner la définition du LET (aussi appelé pouvoir d'arrêt). Expliquer la différence avec le NIEL. Quelles sont les unités usuelles ?
- Expliquer la différence entre les effets cumulés et les effets singuliers.
- Donner la définition de la dose. Quelle est l'unité légale ? Quelles sont les particules les plus à même de faire des effets de dose ?

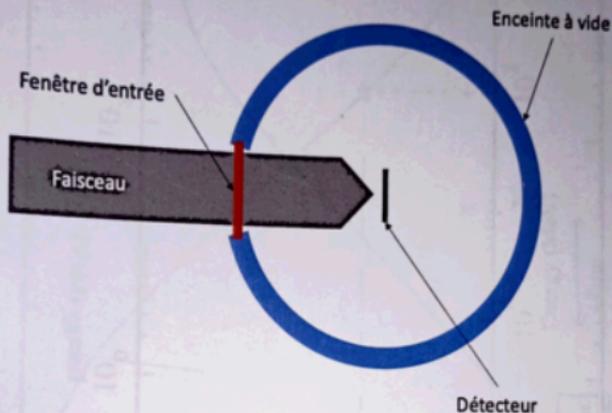
### Exercice (12 points)

Un faisceau de protons mono-énergétiques de 80 MeV est utilisé pour irradier un détecteur en Silicium situé au centre d'une enceinte à vide en Aluminium dont les parois ont une épaisseur de 5 mm. Le faisceau pénètre à l'intérieur de l'enceinte par une ouverture étanche constituée d'une fenêtre d'entrée en Béryllium d'une épaisseur de 1 mm, voir schéma ci-dessous.

Le détecteur en Silicium mesure  $2,5 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm}$  de côtés et  $6 \text{ mm}$  d'épaisseur. Il est orienté perpendiculairement au faisceau de protons.

On donne :

- Les masses volumiques de l'Aluminium ( $2,6989 \text{ g/cm}^3$ ), du Béryllium ( $1,848 \text{ g/cm}^3$ ) et du Silicium ( $2,33 \text{ g/cm}^3$ )
- Les courbes de LET des protons dans l'Aluminium, le Béryllium et le Silicium.
- Les valeurs tabulées de ces mêmes LET entre  $1$  et  $100 \text{ MeV}$ .

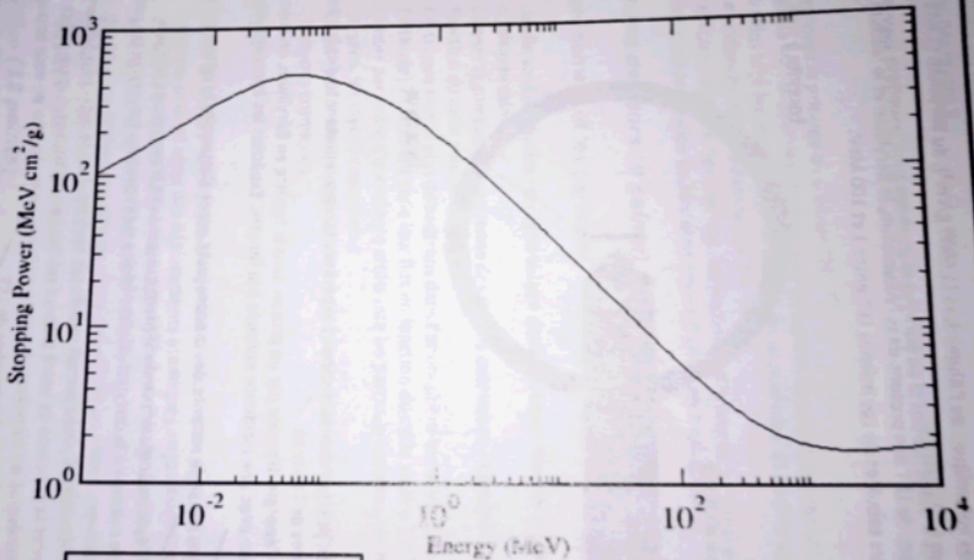


Questions :

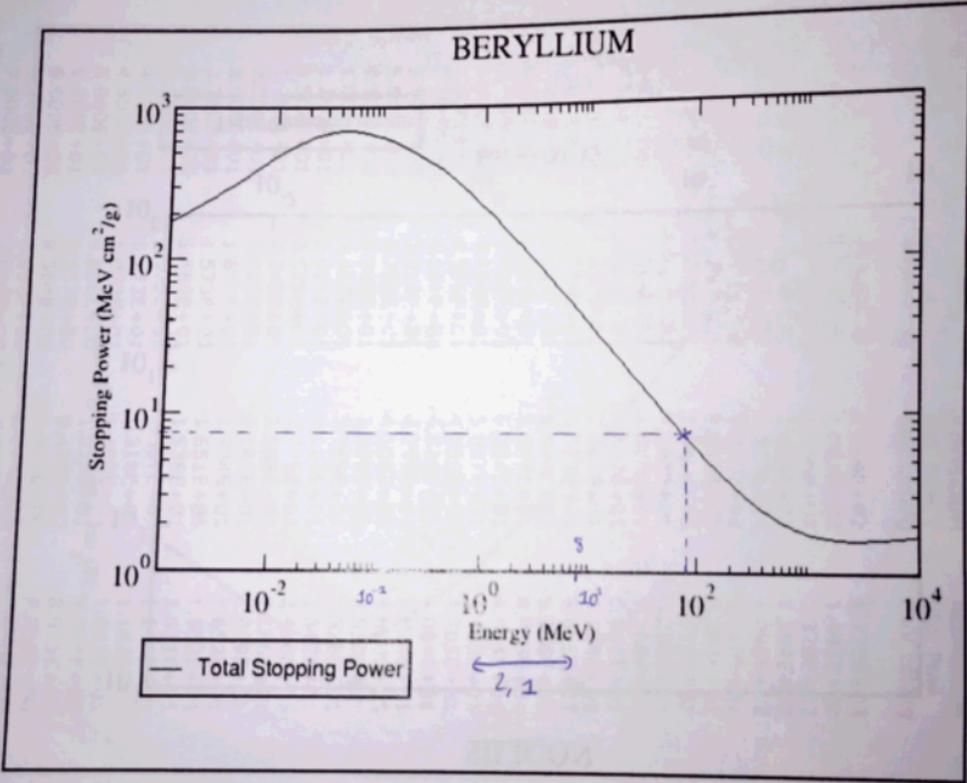
1. Refaire un schéma clair du dispositif expérimental en y reportant toutes les données pertinentes de l'énoncé.
2. Calculer l'énergie déposée par un proton dans la fenêtre en Béryllium, en supposant qu'il arrive avec une incidence normale à la fenêtre. Expliciter les approximations de calcul.
3. En déduire l'énergie restante des protons juste avant d'atteindre le détecteur en Silicium.
4. Calculer l'épaisseur maximale de Silicium que peuvent traverser ces protons (d'énergie calculée à la question 3). En déduire si ces protons traversent ou pas le détecteur.
5. Calculer l'énergie déposée par un seul de ces protons dans le détecteur Silicium. Commenter la précision de votre calcul. Expliquer en particulier si votre résultat vous semble surévalué ou sous-évalué. Vous justifierez votre réponse en vous appuyant notamment sur l'allure des courbes de LET.
6. Calculer l'énergie déposée par l'ensemble des protons du faisceau pendant l'irradiation sous une fluence de  $10^{14} \text{ protons/cm}^2$ . On supposera que le faisceau est suffisamment étendu pour éclairer toute la surface du détecteur.
7. En déduire la dose correspondante dans le détecteur. Exprimer le résultat dans l'unité légale.
8. Déterminer par le calcul si les protons ressortent de l'enceinte ?

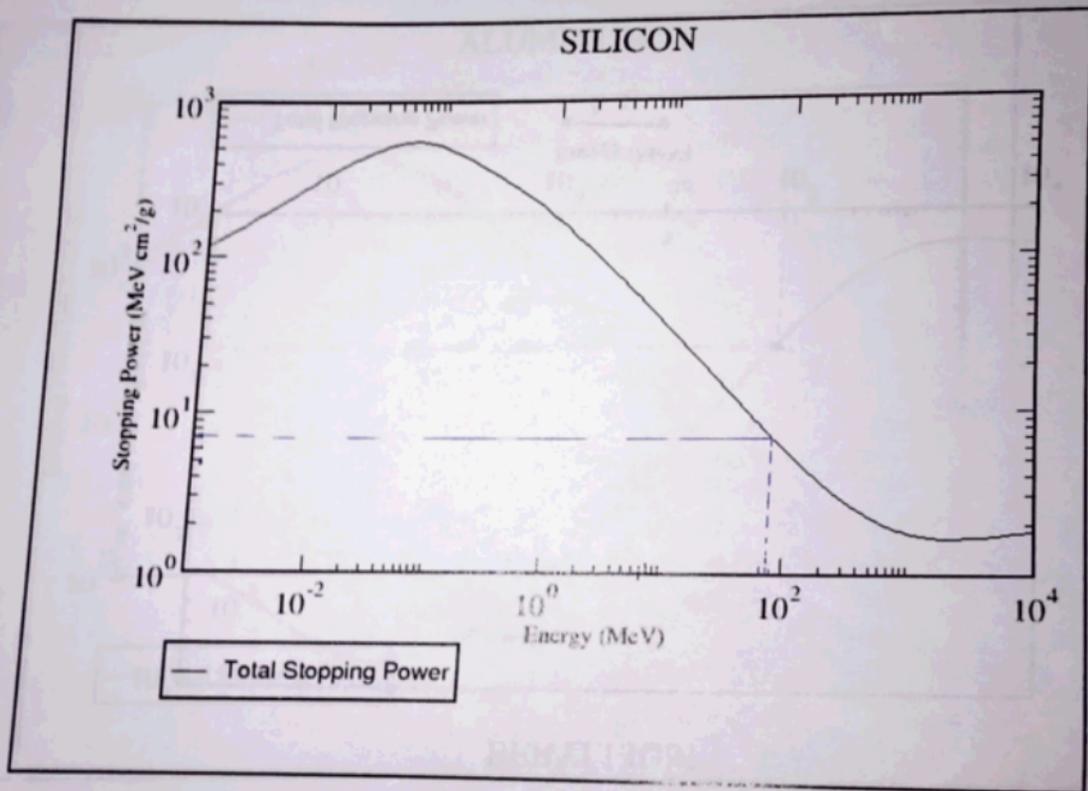
$$1 \text{ gray} = 100 \text{ rad}$$

### ALUMINUM



— Total Stopping Power





Kinetic Energy MeV	SILICON Stp. Pow. MeV cm2/g	BERYLLIUM Stp. Pow. MeV cm2/g	ALUMINUM Stp. Pow. MeV cm2/g
1.000E+00	1.754E+02	2.169E+02	1.720E+02
1.250E+00	1.524E+02	1.862E+02	1.495E+02
1.500E+00	1.355E+02	1.636E+02	1.328E+02
1.750E+00	1.223E+02	1.464E+02	1.199E+02
2.000E+00	1.118E+02	1.327E+02	1.095E+02
2.250E+00	1.031E+02	1.216E+02	1.010E+02
2.500E+00	9.586E+01	1.123E+02	9.383E+01
2.750E+00	8.968E+01	1.045E+02	8.775E+01
3.000E+00	8.433E+01	9.781E+01	8.250E+01
3.500E+00	7.554E+01	8.689E+01	7.388E+01
4.000E+00	6.860E+01	7.832E+01	6.707E+01
4.500E+00	6.296E+01	7.141E+01	6.154E+01
5.000E+00	5.828E+01	6.572E+01	5.695E+01
5.500E+00	5.431E+01	6.094E+01	5.306E+01
6.000E+00	5.091E+01	5.687E+01	4.973E+01
6.500E+00	4.795E+01	5.334E+01	4.684E+01
7.000E+00	4.536E+01	5.027E+01	4.430E+01
7.500E+00	4.306E+01	4.756E+01	4.205E+01
8.000E+00	4.101E+01	4.515E+01	4.004E+01
8.500E+00	3.916E+01	4.299E+01	3.824E+01
9.000E+00	3.750E+01	4.105E+01	3.660E+01
9.500E+00	3.598E+01	3.929E+01	3.512E+01
1.000E+01	3.459E+01	3.769E+01	3.376E+01
1.250E+01	2.913E+01	3.144E+01	2.842E+01
1.500E+01	2.529E+01	2.709E+01	2.466E+01
1.750E+01	2.243E+01	2.388E+01	2.186E+01
2.000E+01	2.020E+01	2.141E+01	1.969E+01
2.500E+01	1.695E+01	1.784E+01	1.652E+01
2.750E+01	1.573E+01	1.651E+01	1.532E+01
3.000E+01	1.469E+01	1.538E+01	1.431E+01
3.500E+01	1.302E+01	1.357E+01	1.268E+01
4.000E+01	1.173E+01	1.218E+01	1.142E+01
4.500E+01	1.070E+01	1.108E+01	1.041E+01
5.000E+01	9.856E+00	1.018E+01	9.594E+00
5.500E+01	9.157E+00	9.439E+00	8.911E+00
6.000E+01	8.564E+00	8.811E+00	8.334E+00
6.500E+01	8.056E+00	8.274E+00	7.838E+00
7.000E+01	7.614E+00	7.809E+00	7.408E+00
7.500E+01	7.227E+00	7.402E+00	7.031E+00
8.000E+01	6.885E+00	7.043E+00	6.698E+00
8.500E+01	6.581E+00	6.723E+00	6.401E+00
9.000E+01	6.308E+00	6.438E+00	6.135E+00
9.500E+01	6.061E+00	6.180E+00	5.895E+00
1.000E+02	5.838E+00	5.947E+00	5.678E+00

7  
2

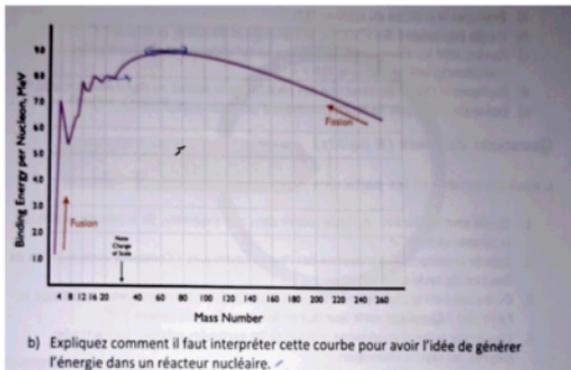
## 2. Masse atomique et énergie nucléaire (10 points) :

a) **Détaillez la formule de la masse atomique avec l'énergie de liaison atomique et nucléaire.**

$$M(A, Z) = Z m_p + (A - Z) m_n - \frac{B_n(A, Z)}{c^2}$$

$$M_A(A, Z) = M(A, Z) + Z m_e - \frac{B_a(Z)}{c^2}$$

$$M(A, Z) = Z(m_p + m_e) + (A - Z) m_n - \frac{B_n(A, Z) + B_a(A, Z)}{c^2}$$



b) Expliquez comment il faut interpréter cette courbe pour avoir l'idée de générer l'énergie dans un réacteur nucléaire.

b.  $\frac{B_n}{A}$  ↗ pr noyaux de taille intermédiaire → plus stable

$\frac{B_n}{A}$  ↘ pr noyaux légers ou lourds → ⊖ stable

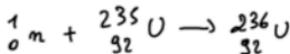
Fusion pr les élmts qui montent vers le pic

Fission pr élmts qui descendent vers le pic.

c) Expliquez en 10 lignes le fonctionnement d'un réacteur nucléaire.

Principe : produire vapeur pr faire tourner une turbine et produire élec.  
On utilise E nucléaire pr produire chaleur : fission + réact<sup>o</sup> en chaîne.

La fission :



les neutrons créés vont réagir avec d'autres U et produire une réact<sup>o</sup> en chaîne  
d'énergie chauffe alors le circuit primaire d'eau

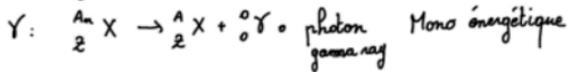
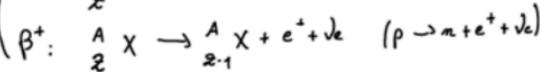
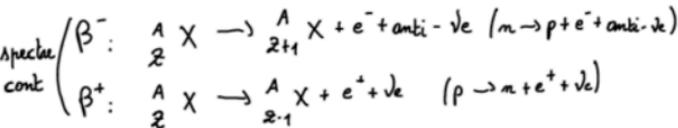
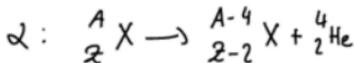
d) Quelle est l'ordre de grandeur de la différence du gain en énergie dans la combustion nucléaire et la combustion chimique (brûler du charbon par exemple), argumentez ?

1g de U = 3 tonnes de charbon

1 masse nucléaire = plusieurs milliers x masse chimique

## 2. Interactions avec la matière (10 points):

a) Décrivez les désintégrations  $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  et  $\gamma$ . Quel spectre pour les produits d'interaction : mono-énergétique ou continu, pourquoi ?

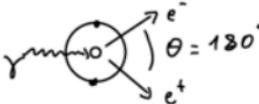


b) Quelles sont les interactions des photons avec la matière ?

Effet Compton :

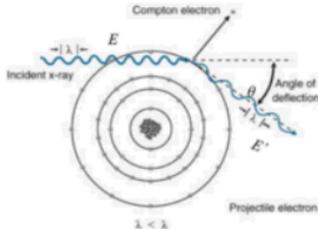
Effet photoé : Absorpt<sup>e</sup> photon ejet<sup>e</sup> e<sup>-</sup>  $\sigma_{pe} = \lambda^5$

Production paire : Absorption  $p^+$  et créat<sup>e</sup> paire  $e^-e^+$

Production :   $\theta = 180^\circ$   $\sigma_{\text{paire}} = \lambda^2$

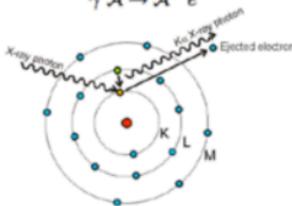
Compton

$$\gamma e^- \rightarrow \gamma e^-$$



Effet photoé<sup>e</sup>

$$\gamma A \rightarrow A^+ e^-$$



c) Donnez et commentez la formule de l'absorption des photons dans la matière.

La perte d'énergie des différentes particules est décrite par la formule de Bethe et Bloch :

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x)$$

$\mu$  coeff absorpt<sup>e</sup>

$\mu$  dépend de la proba d'interact<sup>e</sup> d'absorpt<sup>e</sup> / réflexion du photon ds le matériau