

**C1 Ondes et particules :
supports d'information**

**En AP
N° 19, 22 et 26 P.22-27**

19 * Échelle de Richter

Compétences générales Effectuer et justifier un calcul

La magnitude d'un séisme mesurée sur l'échelle de Richter est une fonction logarithmique de l'amplitude maximale (déplacement maximal) du mouvement du sol en un point (mesurée dans des conditions bien définies) ou de l'énergie libérée par le séisme. Elle caractérise le séisme sans dépendre du lieu où s'effectue la mesure.

Elle se traduit par les relations suivantes pour les magnitudes de deux séismes :

$$M_2 - M_1 = \log\left(\frac{A_2}{A_1}\right)$$

avec A_1 et A_2 les amplitudes des deux séismes ; ou :

$$M_2 - M_1 = \frac{2}{3} \log\left(\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1}\right)$$

avec \mathcal{E}_1 et \mathcal{E}_2 les énergies libérées.

Aide. La fonction $\log(x)$, appelée fonction **logarithme décimal** est définie pour x positif. Elle est notée \log sur les calculatrices. Elle vérifie les propriétés :

$$\log(a/b) = \log(a) - \log(b) ; y = \log(x) \Leftrightarrow x = 10^y.$$

a. Quelle est la différence des magnitudes de deux séismes dont le rapport des amplitudes est égal à 100 ?

b. Quelle est la différence des magnitudes entre deux séismes pour lesquels le rapport des énergies libérées est égal à 100 ?

c. Les magnitudes dépassent rarement 9 pour les séismes les plus puissants.

Quel est le rapport des amplitudes mesurées dans les mêmes conditions et à la même distance du foyer pour deux séismes de magnitudes 5 et 9 ?

d. Quel est le rapport des énergies libérées pour deux séismes de magnitudes 5 et 9 ?

e. Pourquoi utilise-t-on une échelle logarithmique plutôt qu'une échelle linéaire ?

Magnitude	Effets engendrés
9	Destruction totale à l'épicentre, et possible sur plusieurs milliers de km
8	Dégâts majeurs à l'épicentre, et sur plusieurs centaines de km
7	Importants dégâts à l'épicentre, secousse ressentie à plusieurs centaines de km
6	Dégâts à l'épicentre dont l'ampleur dépend de la qualité des constructions
5	Tremblement fortement ressenti, dommages mineurs près de l'épicentre
4	Secousse sensible, mais pas de dégâts
3	Seuil à partir duquel la secousse devient sensible pour la plupart des gens
2	Secousse ressentie uniquement par des gens au repos
1	Secousse imperceptible

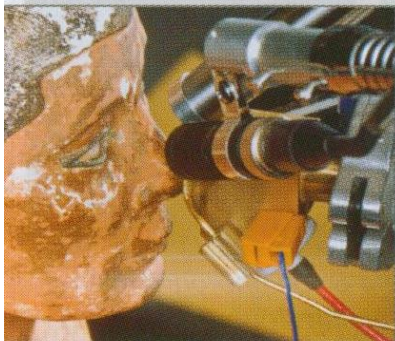
a. $M_2 - M_1 = \log\left(\frac{A_2}{A_1}\right) = \log 100 = 2$

b. $M_2 - M_1 = \frac{2}{3} \log\left(\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1}\right) = \frac{2}{3} \log 100 = 1,3$

c. $\frac{A_2}{A_1} = 10^{(M_2 - M_1)} = 10^{(9-5)} = 10^4 = 10000$

d. $\log\left(\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1}\right) = \frac{3}{2} (M_2 - M_1) \quad \frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = 10^{\left(\frac{3}{2} \times 4\right)} = 1,0 \times 10^6$

e. L'échelle logarithmique permet de réduire l'échelle des valeurs caractérisant les séismes possibles.

Compétences générales *Extraire et exploiter des informations*

Les méthodes d'analyse par faisceaux de particules allient une très grande sensibilité à une totale innocuité pour les objets patrimoniaux. Ces avantages

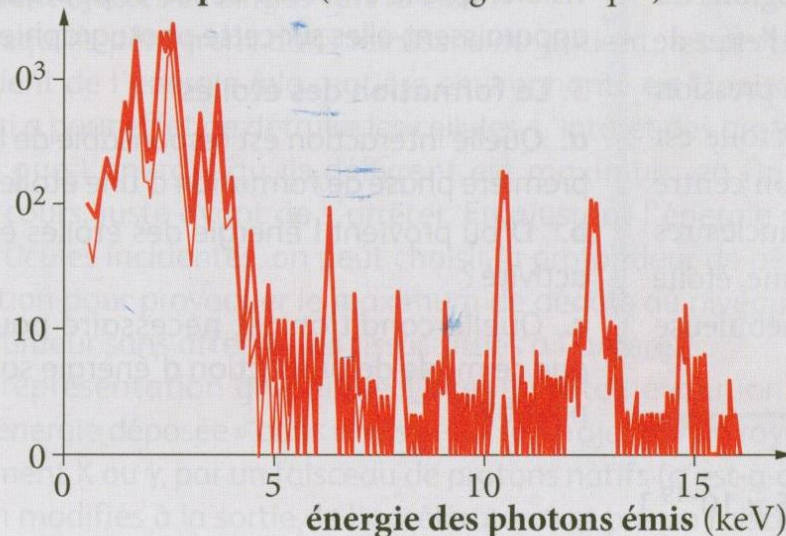
ont amené, vers la fin des années 1980, à doter le laboratoire de recherche des musées de France du système AGLAE (Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire) qui permet de restaurer des œuvres d'art tel que le scribe égyptien ci-contre.

Des particules légères (protons, noyaux de deutérium ou particules alpha), sont portées à des énergies de quelques MeV par l'accélérateur. Ces particules sont semblables à celles émises par des sources radioactives, mais l'accélérateur permet d'en choisir à volonté le nombre, et l'énergie. Guidé avec précision, le faisceau de particules accélérées percute un détail de la cible à étudier. Le long de leur court parcours, elles vont perturber le cortège électronique d'un grand nombre d'atomes ou provoquer des réactions nucléaires.

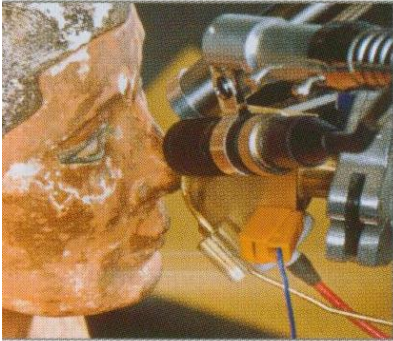
Plusieurs techniques d'analyse sont alors mises en jeu. Entre autres, les atomes perturbés émettent des photons dont les énergies sont caractéristiques de l'élément. On détecte ceux qui sont assez pénétrants pour sortir de la cible : les rayons X.

On a appliqué cette technique à la recherche de la nature des pigments jaunes utilisés pour les manuscrits égyptiens du VII^e siècle. Les pigments utilisés à cette époque étaient l'orpiment (sulfure d'arsenic) ou le massicot (contenant l'élément plomb). L'étude d'un manuscrit égyptien a permis d'obtenir le diagramme ci-dessous.

nombre de photon (échelle logarithmique)



- Quelles sont les qualités de la méthode décrite ?
- Pourquoi faut-il accélérer les particules ?



Les méthodes d'analyse par faisceaux de particules allient une très grande sensibilité à une totale innocuité pour les objets patrimoniaux. Ces avantages ont amené, vers la fin des années 1980, à doter le laboratoire de recherche des musées

de France du système AGLAE (Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire) qui permet de restaurer des œuvres d'art tel que le scribe égyptien ci-contre.

Des particules légères (protons, noyaux de deutérium ou particules alpha), sont portées à des énergies de quelques MeV par l'accélérateur. Ces particules sont semblables à celles émises par des sources radioactives, mais l'accélérateur permet d'en choisir à volonté le nombre, et l'énergie. Guidé avec précision, le faisceau de particules accélérées percute un détail de la cible à étudier. Le long de leur court parcours, elles vont perturber le cortège électronique d'un grand nombre d'atomes ou provoquer des réactions nucléaires.

Plusieurs techniques d'analyse sont alors mises en jeu. Entre autres, les atomes perturbés émettent des photons dont les énergies sont caractéristiques de l'élément. On détecte ceux qui sont assez pénétrants pour sortir de la cible : les rayons X.

a) Qualités :

- Très grande sensibilité : grande précision.
- Totale innocuité ou non destructrice : aucun dommage pour les échantillons étudiés.

égyptien a permis d'obtenir le diagramme ci-dessous.

b) Il faut accélérer les particules afin , d'augmenter leurs énergies (quelques MeV: Méga électron Volt)

(énergie cinétique : $E_c = \frac{1}{2} m.v^2$)

Ces particules vont provoquer **l'émission de photons** par les atomes perturbés par les chocs avec les particules et des réactions **nucléaires** (donc du **noyau** de l'atome perturbé).

a. Quelles sont les qualités de la méthode décrite ?

b. Pourquoi faut-il accélérer les particules ?

c. Avec un rayonnement radioactif, on ne peut pas choisir le nombre ou l'énergie des particules.



totale innocuité pour les objets
5 patrimoniaux. Ces avantages
ont amené vers la fin des

d. Échelle du diagramme :

3,6 cm pour 10 keV soit

1 cm pour 2,77 keV

Le diagramme contient :

- Des pics avant 5 keV

- un pic à 6,4 keV (2,3 cm)

- un pic à 8 keV (2,9 cm)

- un pic à 9 keV (3,3 cm)

- un pic à 10,5 keV (3,8 cm)

- un pic à 12,5 keV (4,5 cm)

- un pic à 14,5 keV (5,3 cm)

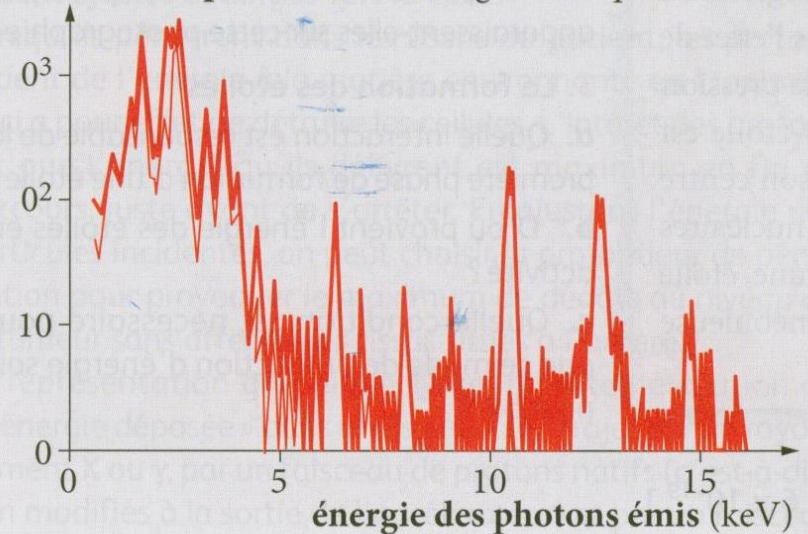
Il s'agit donc d'un pigment à base de plomb (massicot)

Pas de pic à 11,7 keV :

donc pas d'arsenic.

On a appliqué cette technique à la recherche de la nature des pigments jaunes utilisés pour les manuscrits égyptiens du VII^e siècle. Les pigments utilisés à cette époque
30 étaient l'orpiment (sulfure d'arsenic) ou le massicot (contenant l'élément plomb). L'étude d'un manuscrit égyptien a permis d'obtenir le diagramme ci-dessous.

nombre de photon (échelle logarithmique)



c. Pourquoi le faisceau de particules ne peut-il pas être remplacé par un rayonnement radioactif?

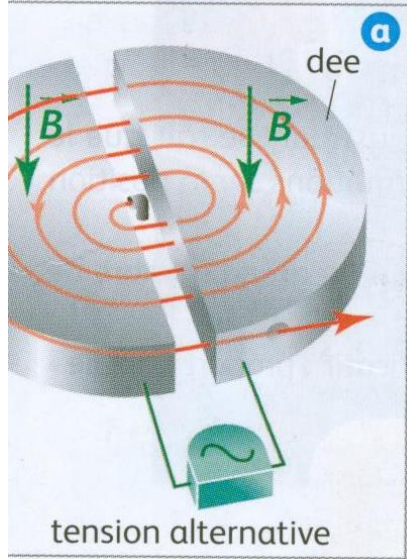
d. À l'aide du tableau ci-dessous donnant les énergies caractéristiques des photons X émis par l'arsenic et le plomb, identifier le pigment présent utilisé dans l'échantillon du manuscrit.

Élément caractéristique	Énergies caractéristiques (keV)
arsenic	10,5; 11,7
plomb	9,0; 10,5; 12,5; 14,5

26 *** Protonthérapie

Compétences générales Extraire et exploiter des informations

Les accélérateurs de particules ont de nombreuses applications médicales. La **protonthérapie** en est un exemple.



Il s'agit d'une technique de pointe qui est destinée à traiter des tumeurs par rayonnement ionisant dans les cas où la proximité d'organes sensibles rendrait dangereux les traitements classiques de radiothérapie.

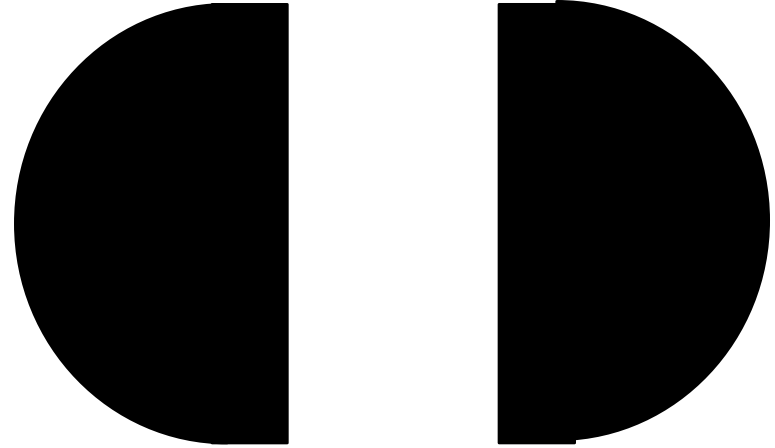
Des protons sont accélérés dans un accélérateur de particules appelé cyclotron. Son principe de fonctionnement est décrit sur la figure **a**. Les deux « dees » sont des demi-cylindres métalliques

creux séparés l'un de l'autre par un petit espace. Une haute tension alternative est appliquée entre les dees. Les protons sont accélérés à chaque passage dans l'espace séparant les dees. À l'intérieur des dees, leur trajectoire est courbée par un champ magnétique et ils décrivent des arcs de cercles de rayons croissants. Lorsqu'ils ont atteint l'énergie maximale, ils sont éjectés et dirigés vers la cible.

1. Fonctionnement d'un cyclotron

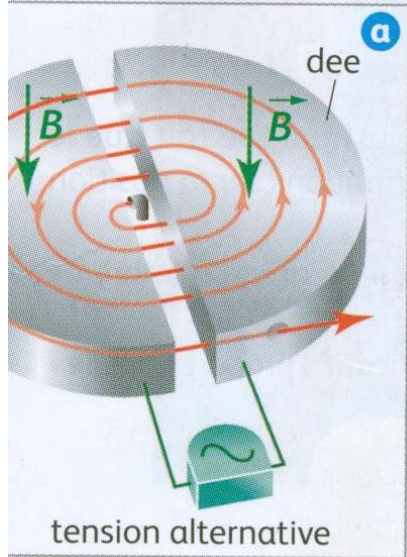
- Quel type de force permet aux protons d'acquérir de l'énergie dans le cyclotron ?
- La tension entre les dees pourrait-elle être une tension continue ?
- À quoi sert le champ magnétique ?
- Quel est l'intérêt de courber la trajectoire ?

tension alternative



Le champ magnétique (B) permet de courber la trajectoire des protons afin qu'ils restent dans le dee.

Informations
uses applications médicales. La **protonthérapie** en est un exemple.

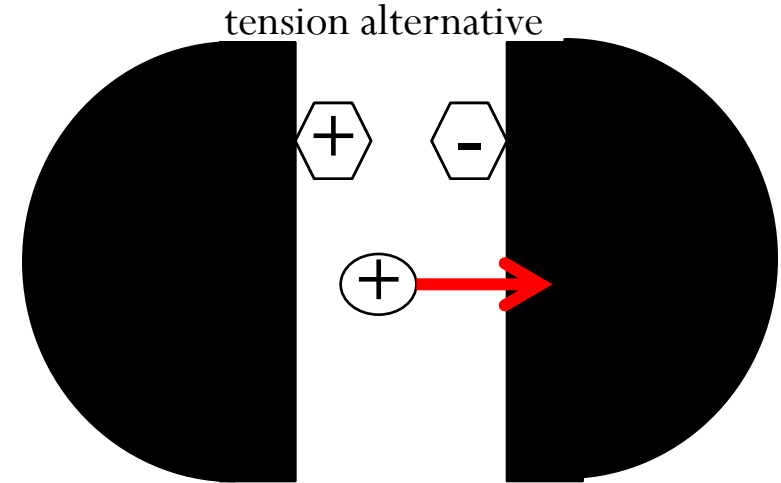


Il s'agit d'une technique de pointe qui est destinée à traiter des tumeurs par rayonnement ionisant dans les cas où la proximité d'organes sensibles rendrait dangereux les traitements classiques de radiothérapie. Des protons sont accélérés dans un accélérateur de particules appelé cyclotron. Son principe de fonctionnement est décrit sur la figure **a**. Les deux « dees » sont des demi-cylindres métalliques

creux séparés l'un de l'autre par un petit espace. Une haute tension alternative est appliquée entre les dees. Les protons sont accélérés à chaque passage dans l'espace séparant les dees. À l'intérieur des dees, leur trajectoire est courbée par un champ magnétique et ils décrivent des arcs de cercles de rayons croissants. Lorsqu'ils ont atteint l'énergie maximale, ils sont éjectés et dirigés vers la cible.

1. Fonctionnement d'un cyclotron

- Quel type de force permet aux protons d'acquérir de l'énergie dans le cyclotron?
- La tension entre les dees pourrait-elle être une tension continue?
- À quoi sert le champ magnétique?
- Quel est l'intérêt de courber la trajectoire?



Si la tension entre les dees était continue (constante), les protons ne seraient accélérés que dans un seul sens.

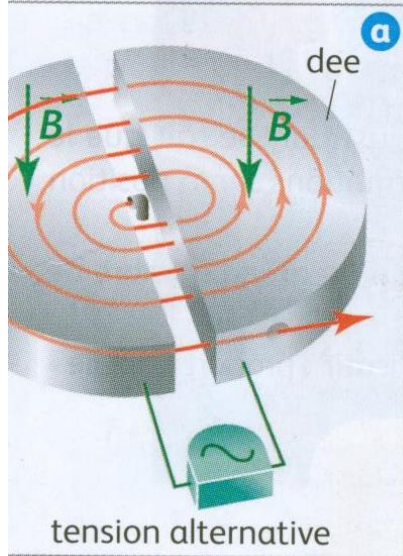
Avec une tension alternative entre les dees, les protons sont accélérés dans les deux sens.

1) a) Il s'agit d'une force électrique qui permet d'accélérer les protons (charge +) soumis à une haute tension alternative (+ et -).

En effet deux charges de même signe se repoussent et deux charges de signe contraire s'attirent.

Le champ magnétique (\mathbf{B}) permet de courber la trajectoire des protons afin qu'ils restent dans le dee.

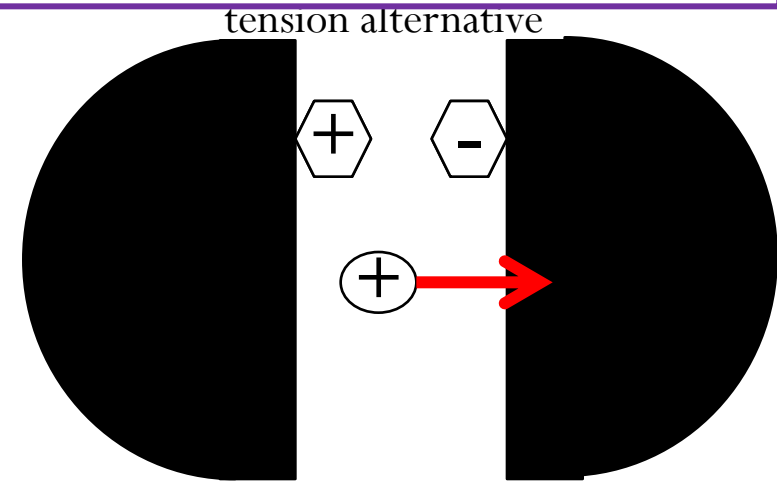
Informations
uses applica-
tions médicales. La **protonthérapie** en est un exemple.



Il s'agit d'une technique de pointe qui est destinée à traiter des tumeurs par rayonnement ionisant dans les cas où la proximité d'organes sensibles rendrait dangereux les traitements classiques de radiothérapie. Des protons sont accélérés dans un accélérateur de particules appelé cyclotron. Son principe de fonctionnement est décrit sur la figure **a**. Les deux « dees » sont des demi-cylindres métalliques

creux séparés l'un de l'autre par un petit espace. Une haute tension alternative est appliquée entre les dees. Les protons sont accélérés à chaque passage dans l'espace séparant les dees. À l'intérieur des dees, leur trajectoire est courbée par un champ magnétique et ils décrivent des arcs de cercles de rayons croissants. Lorsqu'ils ont atteint l'énergie maximale, ils sont éjectés et dirigés vers la cible.

La courbure de la trajectoire permet d'avoir un appareil relativement petit et de faire plusieurs passages afin d'augmenter les énergies des protons. En effet avec un accélérateur linéaire, il faudrait un appareil de plusieurs kilomètres pour avoir les mêmes accélérations !



Si la tension entre les dees était continue (constante), les protons ne seraient accélérés que dans un seul sens.

Avec une tension alternative entre les dees, les protons sont accélérés dans les deux sens.

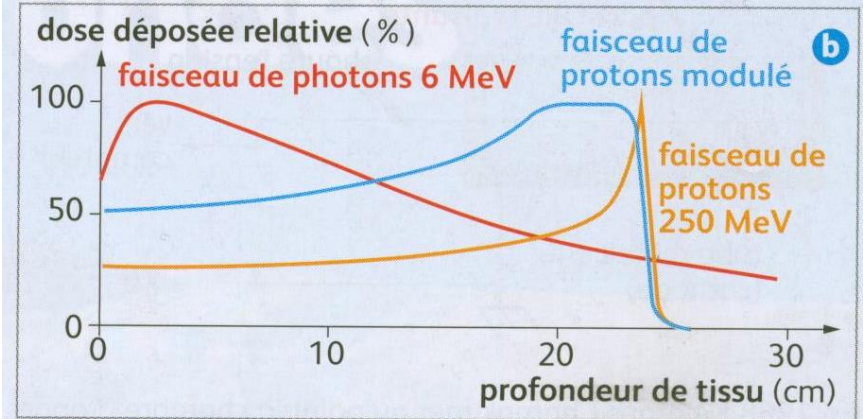
1) a) Il s'agit d'une force électrique qui permet d'accélérer les protons (charge +) soumis à une haute tension alternative (+ et -).

En effet deux charges de même signe se repoussent et deux charges de signe contraire s'attirent.

Lorsqu'ils pénètrent dans les tissus du patient, les protons cèdent de l'énergie à la matière environnante en l'ionisant. Ceci a pour effet de détruire les cellules. L'intérêt des protons est que l'énergie qu'ils délivrent est maximum en fin de parcours, juste avant de s'arrêter. En ajustant l'énergie des particules incidentes, on peut choisir la profondeur de pénétration pour provoquer le maximum de dégâts au niveau de la tumeur sans affecter les tissus situés à l'arrière.

La représentation graphique **b** représente l'évolution de « l'énergie déposée » dans un tissu sur son trajet par un rayonnement X ou γ , par un faisceau de protons natifs (c'est-à-dire non modifiés à la sortie de l'accélérateur) et par un faisceau de protons modulés (c'est-à-dire d'énergie variable).

En ordonnée, l'énergie déposée (par unité de masse de matière) est exprimée en pourcentage par rapport à son maximum.



L'énergie déposée correspond à l'énergie perdue par le proton lors des chocs avec la matière des cellules.

Cette énergie perdue permet l'ionisation des atomes frappés par les protons.

Avec le faisceau de protons natifs (**250 MeV**) l'énergie déposée est en grande partie déposée en profondeur là où elle est utile.

Avec le rayonnement électromagnétique (**photons 6 MeV**),

L'énergie déposée diminue dès la pénétration dans le tissu jusqu'à 30 cm de profondeur : il perd de l'efficacité pour la zone à traiter et la plus grande partie de son énergie agit sur les cellules saines.

2. L'énergie déposée

a. Expliquer la signification de l'expression « énergie déposée ».

b. Que devient « l'énergie déposée » par le faisceau de protons ?

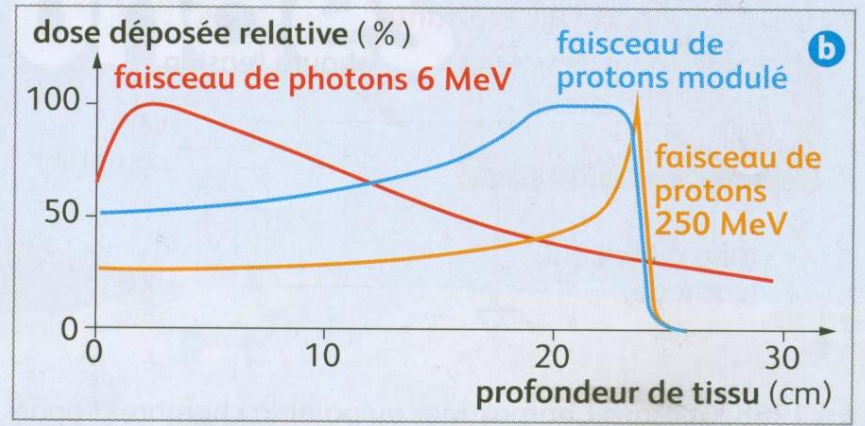
c. En comparant, avec les tracés de la figure **b**, l'évolution de l'énergie déposée par le rayonnement électromagnétique et un faisceau de protons natif, justifier les avantages de ce dernier.

d. D'après la même figure, comment est modifiée la pénétration d'un faisceau modulé par rapport à un faisceau natif ? Quel est l'intérêt du faisceau modulé pour agir sur une tumeur ?

Lorsqu'ils pénètrent dans les tissus du patient, les protons cèdent de l'énergie à la matière environnante en l'ionisant. Ceci a pour effet de détruire les cellules. L'intérêt des protons est que l'énergie qu'ils délivrent est maximum en fin de parcours, juste avant de s'arrêter. En ajustant l'énergie des particules incidentes, on peut choisir la profondeur de pénétration pour provoquer le maximum de dégâts au niveau de la tumeur sans affecter les tissus situés à l'arrière.

La représentation graphique **b** représente l'évolution de « l'énergie déposée » dans un tissu sur son trajet par un rayonnement X ou γ , par un faisceau de protons natifs (c'est-à-dire non modifiés à la sortie de l'accélérateur) et par un faisceau de protons modulés (c'est-à-dire d'énergie variable).

En ordonnée, l'énergie déposée (par unité de masse de matière) est exprimée en pourcentage par rapport à son maximum.



L'énergie du faisceau modulé est déposée sur une plus grande épaisseur mais il y a plus d'énergie perdue sur le trajet. Le faisceau modulé pourra agir sur toute l'épaisseur de la tumeur

d. D'après la même figure, comment est modifiée la pénétration d'un faisceau modulé par rapport à un faisceau natif ? Quel est l'intérêt du faisceau modulé pour agir sur une tumeur ?

e. Dans le cas du faisceau natif présenté sur la figure **b**, à quelle profondeur se trouve la tumeur traitée ?

f. Dans le cas du faisceau modulé présenté sur la figure **b**, quelle est l'épaisseur maximum de la tumeur traitée ?

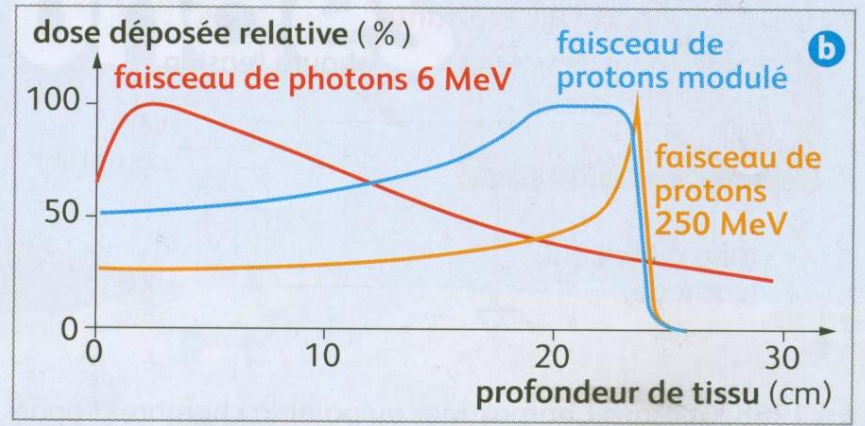
Avec le faisceau de protons natifs, la tumeur traitée se trouve à environ 25 cm de profondeur.

La tumeur traitée a 4 cm d'épaisseur (entre 20 et 24 cm de profondeur).

Lorsqu'ils pénètrent dans les tissus du patient, les protons cèdent de l'énergie à la matière environnante en l'ionisant. Ceci a pour effet de détruire les cellules. L'intérêt des protons est que l'énergie qu'ils délivrent est maximum en fin de parcours, juste avant de s'arrêter. En ajustant l'énergie des particules incidentes, on peut choisir la profondeur de pénétration pour provoquer le maximum de dégâts au niveau de la tumeur sans affecter les tissus situés à l'arrière.

La représentation graphique **b** représente l'évolution de « l'énergie déposée » dans un tissu sur son trajet par un rayonnement X ou γ , par un faisceau de protons natifs (c'est-à-dire non modifiés à la sortie de l'accélérateur) et par un faisceau de protons modulés (c'est-à-dire d'énergie variable).

En ordonnée, l'énergie déposée (par unité de masse de matière) est exprimée en pourcentage par rapport à son maximum.



Au cours de son trajet, l'énergie du proton diminue du fait des chocs répétés avec les atomes des cellules.

3. Pouvoir ionisant et vitesse du proton

a. Au cours de son trajet dans les tissus, l'énergie du proton augmente-t-elle ou diminue-t-elle ?

b. Même question concernant la vitesse.

c. D'après les propriétés étudiées à la question 2., le pouvoir ionisant du proton augmente-t-il ou diminue-t-il lorsque sa vitesse augmente ?

Au cours de son trajet, la vitesse du proton diminue du fait des chocs répétés avec les atomes des cellules jusqu'à l'arrêt.

Le pouvoir ionisant du proton augmente avec la vitesse, les chocs seront plus violents si la vitesse augmente donc il y aura davantage d'ionisation.