

**EXERCICE I : PROTONS ÉNERGÉTIQUES – 8 POINTS**

Des protons énergétiques sont des protons animés d'une grande vitesse. Le but de cet exercice est d'exploiter des documents relatifs à deux exemples de l'action de protons énergétiques sur la matière : le rayonnement cosmique et protonthérapie. On donne les valeurs suivantes :

- Charge électrique du proton :  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C
- Masse du proton :  $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$  kg
- Mégaélectronvolt :  $1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-13}$  J
- Célérité de la lumière dans le vide :  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- Constante de Planck :  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

**1. LE PROTON**

**Document I : Les interactions dans le noyau**

Dans un noyau atomique, trois interactions fondamentales sont mises en jeu entre les nucléons (protons et neutrons) : l'interaction gravitationnelle, l'interaction électrique et l'interaction nucléaire forte.

L'interaction gravitationnelle est attractive ; dans un noyau, elle est nettement plus faible que l'interaction électrique répulsive entre protons. C'est l'interaction nucléaire forte qui assure la cohésion du noyau atomique.

**Document II : Les quarks constitutifs du proton**

Le proton est composé de trois particules : deux quarks up et un quark down. Les quarks sont des particules élémentaires qui portent une fraction de la charge électrique du proton. La charge d'un quark down est  $-\frac{e}{3}$ .

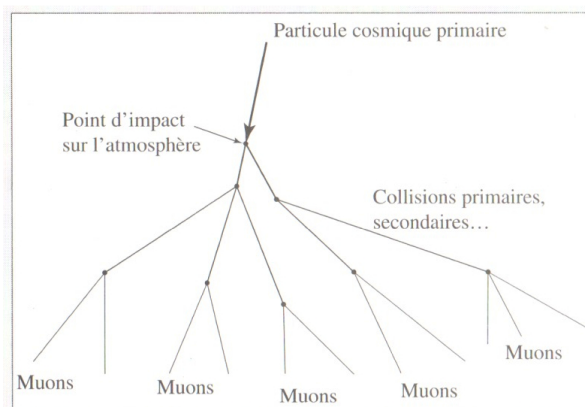
- 1.1. L'interaction forte est-elle attractive ou répulsive ? Est-elle plus ou moins intense que l'interaction électrique ? Justifier ces réponses à l'aide du **document I**.
- 1.2. Déterminer la charge électrique d'un quark up en l'exprimant sous la forme d'une fraction de la charge  $e$  du proton.

**2. LES PROTONS COSMIQUES**

**Document III : Rayonnement cosmique**

La Terre est arrosée constamment par une pluie de particules, nommée rayonnement cosmique. Ce phénomène est le résultat de l'arrivée de particules énergétiques (provenant du Soleil, de la galaxie et plus globalement de tout l'Univers) dans la haute atmosphère terrestre. Ces particules, principalement des protons (87%), entrent en collision avec les noyaux des molécules de l'atmosphère. Les produits de ces collisions primaires heurtent à leur tour d'autres noyaux, produisant ainsi une gerbe de particules secondaires. Certaines parviennent jusqu'au sol, d'autres sont absorbées par l'atmosphère, et d'autres encore induisent de nouvelles réactions qui donneront naissance à des particules tertiaires, etc.

Une seule particule cosmique très énergétique peut générer une gerbe contenant plusieurs milliards de particules (voir **figure 1** ci-contre). Plusieurs types de particules atteignent le sol. Parmi ces particules, on trouve les muons.



**Figure 1 – Représentation simplifiée des gerbes issues de rayonnements cosmiques**

#### Document IV : Rayons cosmiques relativistes

On peut appliquer avec une bonne approximation les lois de la mécanique classique à toute particule animée d'une vitesse inférieure à 10% de la célérité de la lumière dans le vide et utiliser alors l'expression de l'énergie cinétique  $E_c = \frac{m \cdot v^2}{2}$ .

Lorsqu'on est dans cette situation, la particule est dite « classique ». Dans le cas contraire, la particule est dite « relativiste ». Par exemple, les protons les plus énergétiques des rayons cosmiques sont relativistes. Ils sont d'origine extrasolaire et leur énergie cinétique est typiquement comprise entre 100 MeV et 10 GeV.

- 2.1. Calculer, en joules puis en mégaelectronvolts, l'énergie cinétique d'un proton animé d'une vitesse égale à 10% de la célérité  $c$  de la lumière dans le vide.
- 2.2. Justifier par un argument quantitatif la phrase soulignée du **document IV**.
- 2.3. D'après la théorie de la dualité onde-corpuscule, on associe une onde électromagnétique au proton telle que  $\lambda = \frac{h}{p}$  où  $p$  est la quantité de mouvement du proton et  $h$  la constante de Planck.
  - 2.3.1. Calculer la valeur de la quantité de mouvement  $p$  d'un proton dont la vitesse vaut 10% de la célérité  $c$  de la lumière dans le vide.
  - 2.3.2. En déduire la valeur de la longueur  $\lambda$  associée à ce proton.

### 3. LA PROTONTHÉRAPIE

#### Document V : Les différentes radiothérapies

La radiothérapie (thérapie par rayonnement) est un moyen de traitement du cancer dans lequel les cellules cancéreuses sont détruites par un rayonnement. Si ce rayonnement est électromagnétique (rayons X ou rayons gamma), on parle de photonthérapie. S'il s'agit d'un faisceau de protons, on parle de protonthérapie. Lorsqu'un rayonnement (photon X ou gamma, proton...) pénètre dans un tissu, il interagit avec celui-ci en lui cédant, tout au long de son trajet, une part de son énergie : on parle d'énergie déposée. Dans l'exemple du traitement d'une tumeur dans un organisme, le graphique ci-dessous représente la manière dont évolue l'énergie déposée en fonction de la profondeur de pénétration, d'une part pour un faisceau de photons X ou gamma, et d'autre part pour un faisceau de protons de 150 MeV.

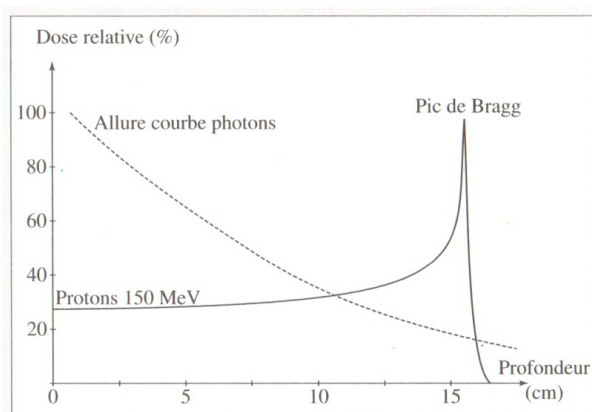


Figure 2 – Énergie déposée dans un tissu en fonction de la profondeur de pénétration du faisceau

La dose relative est l'énergie déposée par unité de masse de matière, exprimée en pourcentage par rapport au maximum d'énergie qui peut être déposée.

Le faisceau de photons est fortement absorbé dès son entrée dans l'organisme et continue de céder progressivement son énergie tout au long de son parcours. Au contraire, les protons déposent relativement peu d'énergie au début de leur parcours dans l'organisme. L'énergie libérée augmente progressivement au fur et à mesure que leur vitesse diminue. C'est au moment de leur arrêt que l'énergie libérée est maximale. Il apparaît alors un pic de dose (le pic de Bragg) au-delà duquel la dose chute brutalement à zéro.

Tout l'art de la protonthérapie consiste à administrer une dose suffisante pour détruire sans exception toutes les cellules cancéreuses. En revanche, cette dose doit endommager le moins possible les cellules saines.

- 3.1. Pour l'exemple de la **figure 2**, déterminer à quelle profondeur doit se trouver la tumeur traitée pour que la protonthérapie soit la plus efficace. Justifier cette réponse.
- 3.2. À l'aide de 2 arguments, préciser le traitement qui respecte le mieux l'« art de la radiothérapie ».

## EXERCICE II : ACIDE FORT, ACIDE FAIBLE ? – 12 POINTS

Le tableau ci-dessous indique le pH de quatre solutions  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  et  $S_4$ , préparées à partir de deux solutions de deux monoacides  $HA_1$  et  $HA_2$  de concentrations respectives  $c_1$  et  $c_2$ .  $S_3$  et  $S_4$  sont respectivement des solutions diluées au  $\frac{1}{10}$  de  $S_1$  et  $S_2$ .

Solution	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
pH	2,3	1,5	2,9	2,5

### 1. ÉTUDE D'UN ACIDE FORT

- 1.1. Montrer, à partir d'une étude quantitative, que l'un des deux acides est fort.
- 1.2. Déterminer la concentration de cet acide.
- 1.3. Parmi la verrerie suivante, indiquer, sans justifier, quelles pièces utiliser pour la préparation de la solution  $S_3$  à partir de  $S_1$  :
  - pipettes graduées de 5 mL et 10 mL ;
  - pipettes jaugées de 2,0 mL et 5,0 mL ;
  - fioles jaugées de 50,0 mL ou de 100,0 mL ou encore de 200,0 mL.

### 2. ÉTUDE D'UN ACIDE FAIBLE

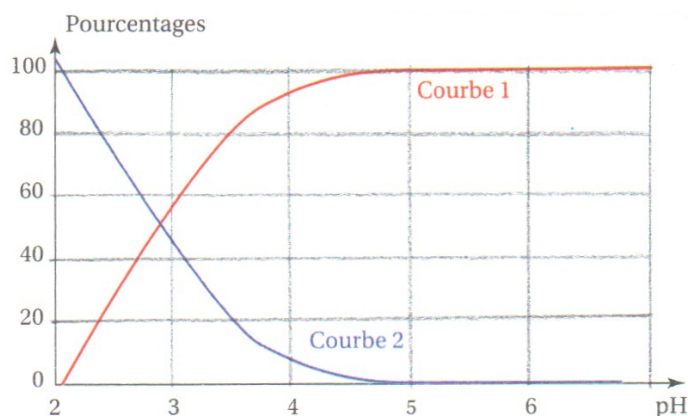
L'acide faible étudié précédemment est l'acide monochloroéthanoïque (ou monochloroacétique)  $CH_2ClCOOH$  de concentration  $c = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ .

- 2.1. Écrire l'équation de la réaction de cet acide avec l'eau.
  - 2.2. Donner l'expression de la constante d'acidité du couple acide/base correspondant. Quelle est sa signification ?
- Par définition, le coefficient de dissociation (ou coefficient d'ionisation)  $\alpha$  est égal au rapport entre la quantité de matière de molécules d'acide ionisées à l'équilibre et la quantité de matière de molécules d'acide mises en solution.
- 2.3. Établir la relation qui lie  $\alpha$ ,  $c$  et la concentration en ions  $H_3O^+$  dans la solution à l'équilibre. Calculer  $\alpha$  avant et après dilution au dixième en se référant aux données indiquées en début d'exercice. Conclure.

### 3. DÉTERMINATION DU POURCENTAGE D'ESPÈCES DANS UNE SOLUTION

Un logiciel de simulation permet d'étudier la composition d'un mélange d'un acide avec sa base conjuguée lorsque le pH de la solution varie. Le **document 1** ci-contre représente les pourcentages des espèces acide et basique du couple  $CH_2ClCOOH/CH_2ClCOO^-$  pour une solution telle que :

$c = [CH_2ClCOOH] + [CH_2ClCOO^-]$   
avec  $c$  la concentration initiale de la solution,  
 $[CH_2ClCOOH]$  et  $[CH_2ClCOO^-]$  les concentrations dans la solution à l'équilibre.



3.1. Identifier les deux courbes.

3.2. À partir du **document 1**, déterminer le  $pK_A$  du couple acide/base en justifiant la réponse.

3.3. Pour  $pH = 3,5$ , déterminer graphiquement le pourcentage des espèces  $CH_2ClCOOH$  et  $CH_2ClCOO^-$ .

#### 4. COMPARAISON DU pH DE DEUX SOLUTIONS DILUÉES

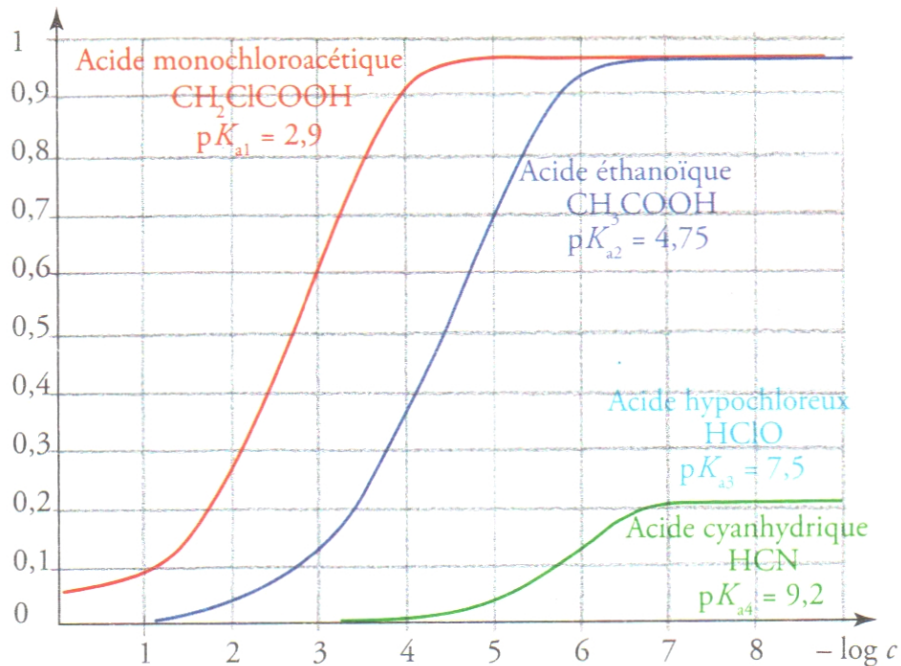
On prélève 0,50 mL de la solution d'acide monochloroacétique de concentration  $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  que l'on introduit dans une fiole jaugée de 2,0 L et on complète jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée.

4.1. Calculer la concentration de la solution diluée.

4.2. Le  $pH$  de la solution diluée vaut 5,2. Quel serait le  $pH$  d'une solution de monoacide fort de même concentration ? Conclure.

#### 5. COMPARAISON DE COEFFICIENTS D'IONISATION

On a représenté sur le **document 2** ci-dessous la variation du coefficient de dissociation de quatre acides faibles en fonction de  $-\log c$ ,  $c$  étant la concentration de l'acide.



5.1. Classer du moins fort au plus fort ces quatre acides en justifiant la réponse.

5.2. Les résultats obtenus lors de la dilution de l'acide monochloroacétique sont-ils en accord avec cette représentation graphique ?

5.3. En vous aidant du **document 2**, que dire de l'affirmation suivante : « Tout monoacide faible fortement dilué se comporte comme un monoacide fort » ?