



SESSION 2015

CLASSES DE TERMINALE

**SCIENCE S P H Y S I Q U E S**

THEME : Les Collisions.

*Les quatre parties que comporte l'épreuve sont indépendantes.***TEXTE INTRODUCTIF.**

Les processus des collisions ont joué et continuent de jouer encore un rôle très important dans l'étude des propriétés de la matière et dans le progrès des sciences en général.

D'après Wikipédia : une collision est un choc direct entre deux objets. Nous sommes souvent témoins de ce phénomène avec la collision de deux automobiles, le coup de marteau sur un clou, le coup de poing d'un lutteur sur un autre, le choc de deux boules de billard, etc. Par ailleurs :

-La pression exercée par un fluide sur la partie intérieure du récipient le contenant a pour origine les collisions continues de ses molécules avec les parois intérieures de ce récipient.

-L'expérience de Rutherford qui a mis en évidence l'existence du noyau atomique et celles de Compton et de l'effet photoélectrique où Einstein postule l'existence de grains de lumière (photons) étaient basées sur les processus de collision.

-Dans les accélérateurs de particules on provoque des collisions entre particules pour obtenir d'autres particules.

-Les très hautes énergies que possèdent les particules dans les accélérateurs modernes (100GeV à quelques TeV) permettent aussi par collision de sonder la matière à l'échelle du noyau.

On peut à partir de ces exemples classer les collisions en :

●Collisions à l'échelle macroscopique : ce sont celles que l'on observe dans la vie courante : la boxe, le billard (choc de deux boules), le choc d'un objet avec le sol, etc.

Au moyen de deux palets en mouvement sur une table soufflante on peut étudier, expérimentalement les collisions à l'échelle macroscopique et en tirer des lois physiques.

●Collisions à l'échelle microscopique et à l'échelle atomique : ce sont celles, très nombreuses qui mettent en jeu les composants élémentaires de la matière : atomes, ions, molécules etc.

Lors d'une réaction chimique, il se produit des collisions entre entités chimiques (molécules, ions) qui se transforment en d'autres entités chimiques. La conductivité électrique des métaux ne peut être comprise de manière quantitative que si on prend en compte la collision des électrons de conduction avec les défauts du réseau cristallin, etc.

●Collisions à l'échelle subatomique. L'échelle est relative à des dimensions inférieures à celles des atomes : comme celles du noyau et des particules (proton, neutrons, positrons, muons, pions, etc.). A ce niveau on peut citer :

- les réactions nucléaires ; elles sont nombreuses et très variées : réaction de fusion, réaction de fission, réaction de capture, réaction de transmutation, etc. Ces réactions ne se produisent que si des noyaux de départ entrent en collision.

-Les collisions en haute atmosphère entre les particules émises par le soleil et les noyaux des molécules d'air. Elles donnent naissance aux particules du rayonnement cosmique, qui causent des perturbations sur les radios fréquences et dans la distribution du champ magnétique terrestre.

Enfin la physique des particules est entièrement fondée sur l'analyse des processus de collision.

Le processus de collision des particules atomiques ou subatomiques est appelé aussi diffusion.

La simple observation des phénomènes physiques évoqués permet de distinguer deux types de collisions quelle que soit l'échelle (subatomique, microscopique, macroscopique) :

- Les collisions inélastiques : collisions à l'issue desquelles le nombre ou la nature des particules est modifié. On pourra observer une déformation, une cassure, un échauffement, un changement de nature etc.

- Les collisions élastiques : collisions où seul le mouvement des objets change ; le nombre et la nature des particules restent inchangés.

On pourrait donc dire qu'une collision ou diffusion est un processus très bref d'interaction entre deux corps au cours duquel les vecteurs vitesse de ces deux corps peuvent subir des changements de direction et de norme importants.

**PARTIE A : QUESTIONS SUR LE TEXTE INTRODUCTIF****(05 points)**

Lire attentivement le texte ci-dessus puis répondre aux questions suivantes.

**A-1-** Comment est définie la collision dans Wikipédia ?

**A-2-** Quelle est l'origine de la pression exercée par un gaz sur les parois du récipient le contenant ?

**A-3-** Donner deux expériences importantes en physique, citées dans le texte, qui reposent sur les processus de collision.

**A-4-** Quel est l'ordre de grandeur de l'énergie que possèdent les particules dans les accélérateurs modernes ?

**A-5-** Citer deux exemples de collision à l'échelle macroscopique et deux exemples de collision à l'échelle atomique mentionnés dans ce texte.

**Préambule pour la résolution des exercices.**

Nous appellerons particule tout objet suffisamment petit pour que l'on puisse le considérer comme ponctuel : protons, neutrons, électrons, « photons », noyaux atomiques (particules  $\alpha$ , noyaux d'hydrogène ...). Pour beaucoup d'exercices et sauf indication contraire nous nous placerons dans le cas particulier où les particules et les corps solides sont isolés ou pseudo-isolés. Ils sont sans interaction avant et après le choc. Nous supposerons que l'interaction n'a lieu que dans un volume d'espace suffisamment restreint et la durée du choc est suffisamment brève pour que la notion de simultanéité puisse garder un sens. Les corps solides macroscopiques seront considérés comme des points matériels dont la masse est égale à la masse du solide appliquée à son centre d'inertie.

**PARTIE B : Collisions à l'échelle macroscopique (44 points).****B-1 : Etude des collisions comme moyen de vérification des lois physiques.**

On peut étudier des collisions en vue de vérifier des lois physiques au moyen de deux mobiles lancés sur une table à coussin d'air. Leurs poids sont compensés par l'action de l'air : le système devient un système pseudo-isolé.

On considère deux palets A et B constituant les mobiles. L'un des palets a pour masse  $m_A = 100$  g et pour centre d'inertie  $G_A$  ; l'autre a pour masse  $m_B = 200$  g et un centre d'inertie  $G_B$ . Les deux palets sont lancés sur une table à coussin d'air horizontale, puis les positions de leurs centres d'inertie sont marquées à des intervalles de temps égaux à  $T = 80$  ms, définissant ainsi les instants  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ . On obtient l'enregistrement des mouvements de leurs centres d'inertie sur le document (document annexe à rendre). Les deux solides entrent en contact au moment où leurs centres d'inertie occupent les positions  $G_A(t_4)$  et  $G_B(t_4)$ .

**B-1-1** A l'aide des enregistrements présentés dans le document annexe de l'épreuve, indiquer la nature du mouvement des centres d'inertie  $G_A$  et  $G_B$  avant et après le choc.

**B-1-2** On désigne par G le centre d'inertie ou barycentre de masse du système des deux palets A et B.

**B-1-2-1** Appliquer la formule barycentrique au système et montrer que la distance  $G_A G = \frac{m_B}{m_A + m_B} G_A G_B$ .

**B-1-2-2 – Positions de G.**

- Relever dans un tableau de mesures les longueurs  $G_A G_B$  des segments  $[G_A, G_B]$  avant et après le choc.
- Dans le même tableau placer les mesures  $G_A G$  des segments  $[G_A, G]$  avant et après le choc.
- Placer les positions G ( $t_0$ ), G ( $t_1$ ), G ( $t_2$ ), G ( $t_3$ ), ..., G ( $t_n$ ), du centre d'inertie G du système aux différents instants, sur le document annexe.

**B-1-2-3 – Mouvement de G.**

- Préciser, en justifiant, la nature du mouvement du barycentre G.
- Déterminer la vitesse du centre d'inertie G avant et après le choc.
- Que peut-on conclure sur la valeur de la quantité de mouvement du système ?

**B-1-2-4** A un instant  $t_i$  les vecteurs vitesses et les vecteurs quantités de mouvement des deux palets sont notés respectivement  $\vec{V}_A(t_i)$ ,  $\vec{V}_B(t_i)$  et  $\vec{P}_A(t_i)$ ,  $\vec{P}_B(t_i)$ . Les valeurs correspondantes de la vitesse et de la quantité de mouvement sont notées  $V_A(t_i)$ ,  $V_B(t_i)$  et  $P_A(t_i)$ ,  $P_B(t_i)$ .

**B-1-2-4-1** - Déterminer les valeurs de  $V_A(t_3)$ ,  $V_A(t_5)$ ,  $P_A(t_3)$  et  $P_A(t_5)$  du palet A.

- Déterminer les valeurs de  $V_B(t_3)$ ,  $V_B(t_5)$ ,  $P_B(t_3)$  et  $P_B(t_5)$  du palet B.

**B-1-2-4-2-a**- Représenter au point  $G_A(t_4)$  les vecteurs  $\vec{P}_A(t_3)$ ,  $\vec{P}_A(t_5)$  et le vecteur variation de la quantité de mouvement  $\Delta\vec{P}_A = \vec{P}_A(t_5) - \vec{P}_A(t_3)$ .

**B-1-2-4-2-b**- Représenter au point  $G_B(t_4)$  les vecteurs  $\vec{P}_B(t_3)$ ,  $\vec{P}_B(t_5)$  et le vecteur variation de la quantité de mouvement  $\Delta\vec{P}_B = \vec{P}_B(t_5) - \vec{P}_B(t_3)$ . (On donne l'échelle : 1 cm pour  $0,02 \text{ kg.m.s}^{-1}$ ).

Que peut-on dire des variations de quantités de mouvements  $\Delta\vec{P}_A$  et  $\Delta\vec{P}_B$  ?

**B-1-2-4-3** L'impulsion  $\vec{I}$  communiquée à un objet lors d'un choc est le produit de la force moyenne reçue par la durée  $\Delta t$  du choc, ce qui lui donne une variation  $\Delta\vec{P}$  de sa quantité de mouvement.

On note  $\vec{F}_{A/B}$  la force exercée par le palet A sur le palet B et  $\vec{F}_{B/A}$  la force exercée par le palet B sur le palet A et  $\Delta t$  la durée du choc entre les deux palets.

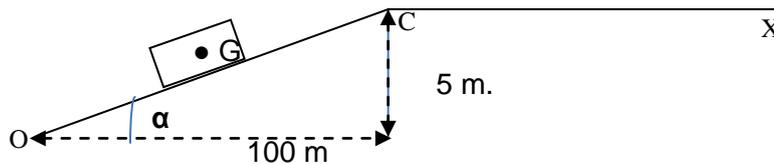
- Exprimer pour chacun des palets l'impulsion reçue au cours du choc.

- Exprimer pour chacun des palets le vecteur force subie en fonction de sa variation de quantité de mouvement et de la durée du choc  $\Delta t$ .
- Quelle loi obtient-on lorsque la durée du choc est toute petite ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) ?
- Comparer les deux forces, écrire la relation qui les lie et conclure.

## **B-2 - Etude du mouvement d'un véhicule, du freinage au choc avec un obstacle.**

### **B-2-1 - Détermination de la force motrice.**

Un véhicule de masse  $M = 1300 \text{ kg}$  roule sur une route (OC) faisant un angle  $\alpha$  avec l'horizontale. On désigne par G le centre d'inertie du véhicule et on prendra  $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$ . Pour simplifier l'étude, on supposera que l'ensemble des frottements aérodynamiques et la résistance au roulement sont modélisables par une force résistante  $\vec{F}_r$  de sens opposé au déplacement, d'intensité constante  $F_r = 900 \text{ N}$ .



Le moteur exerce une force motrice  $\vec{F}_m$  sur le véhicule que l'on supposera d'intensité constante  $F_m$ . En appliquant la relation fondamentale de la dynamique au mouvement du véhicule sur la portion OC, calculer l'intensité  $F_m$  de la force motrice pour que ce mouvement soit uniforme sur cette portion OC.

### **B-2-2 - Etude de la distance d'arrêt sur une route horizontale.**

Au point C, sommet de la pente, le véhicule aborde une route horizontale (C, X). (voir figure ci-dessus) avec la même vitesse qu'il avait sur la portion OC :  $v_0 = 90 \text{ km.h}^{-1}$ . En ce point C, le conducteur du véhicule aperçoit un camion en panne, stationné au milieu de la chaussée. Il décide alors de freiner d'urgence pour éviter le choc avec le camion.

Lors du freinage d'urgence, le temps que met un véhicule pour s'arrêter se décompose en deux parties :

- Le temps de réaction du conducteur noté  $t_R$ , (il correspond au temps nécessaire au conducteur pour prendre conscience de la situation et commencer à appuyer sur les freins). Ce temps  $t_R$  est égal à 1 s. Le véhicule parcourt pendant ce temps la distance  $D_R$ .
- Le temps de freinage est noté  $t_f$  ; temps pendant lequel le véhicule parcourt la distance  $D_f$ . On suppose que pendant ce temps de freinage le véhicule a un mouvement rectiligne uniformément varié d'accélération  $\vec{a}_f$  de module supposé constant.

**B-2-2-1** - Etablir l'expression de la distance d'arrêt  $D_A$  en fonction de  $v_0$ , de  $t_R$  et de la mesure algébrique  $a_f$  de l'accélération.

**B-2-2-2** Pour simplifier l'étude, on suppose que pendant la phase de freinage, l'ensemble des frottements est modélisé par une force résistante  $\vec{F}_R$ , horizontale de sens opposé au déplacement, d'intensité constante. De plus, le conducteur ayant cessé d'accélérer, on admettra que la force motrice est nulle pendant cette phase. Le coefficient d'adhérence  $f$  des pneus sur la route est donné par la formule :

$$f = \frac{F_R}{P}, \text{ P étant le poids du véhicule.}$$

En vous aidant des résultats des questions précédentes, donner l'expression de la distance d'arrêt  $D_A$ , en fonction de  $v_0$ ,  $t_R$ ,  $f$  et  $g$ .

Application numérique : Calculer  $D_A$  ; on donne  $v_0 = 90 \text{ km.h}^{-1}$ ,  $g = 9,8 \text{ ms}^{-2}$ ,  $t_R = 1 \text{ s}$  et  $f = 0,8$ .

### **B-2-3 Choc frontal d'un véhicule.**

**Le système étudié ici ne constitue un système pseudo-isolé que dans son mouvement avant le freinage.**

On considère le cas du même véhicule que précédemment (masse totale  $M = 1300 \text{ kg}$ ) se déplaçant sur une route horizontale (C, X). Voyant un obstacle, (le camion), se trouvant à une distance inférieure à 64 m, le conducteur freine mais n'arrive pas à éviter le choc.

Lorsqu'il percute l'obstacle la vitesse du véhicule au point B vaut  $v_B = 50 \text{ km.h}^{-1}$  (voir figure 1, page 9). La diminution de longueur de l'avant du véhicule par déformation des éléments mécaniques est de  $d = 0,60 \text{ m}$ , (le véhicule est à l'arrêt total).

On suppose que la force de déformation  $\vec{F}_d$  exercée par l'obstacle sur le véhicule est constante. On considère que cette force sera la seule à prendre en compte.

On désigne par  $a_d$  la valeur absolue de la décélération supposée constante pendant le choc.

**B-2-3-1-** En cas de choc frontal, l'énergie cinétique d'un véhicule est dissipée par le travail de la force de déformation de sa partie avant. Exprimer et calculer l'intensité  $F_d$  de la force de déformation.

**B-2-3-2-** En utilisant la relation fondamentale de la dynamique, déterminer la valeur de la décélération  $a_d$ .

**B-2-4** Le prétensionneur de ceintures de sécurité communément appelé airbag est un dispositif de sécurité qui s'active en cas de choc pour réduire le jeu entre la ceinture et le conducteur. Il permet aussi de coupler celui-ci au véhicule. Il se déclenche si la vitesse du véhicule est supérieure à  $24 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  lors du choc frontal et si la décélération  $a_d$  est supérieure à  $2,5 \text{ g}$  ; (où  $g = 9,8 \text{ ms}^{-2}$  est la valeur de l'accélération de la pesanteur).

- Dire si le prétensionneur se déclenche lors du choc.

### **B-3 : Collision élastique et Collision inélastique.**

#### **Il s'agit ici de la collision d'objets rigides sans variation notable de leurs masses.**

On considère deux sphères solides de masses notées  $m_1$  et  $m_2$ , de vitesses respectives  $\vec{v}_1$  et  $\vec{v}_2$  se déplaçant sur une même droite horizontale sans frottement. Elles constituent deux systèmes pseudo-isolés. Il se produit un choc de plein fouet entre les deux sphères, ce qui signifie que les vitesses  $\vec{v}'_1$  et  $\vec{v}'_2$  après le choc sont colinéaires à  $\vec{v}_1$ .

La règle de Newton stipule que dans ce cas :  $\vec{v}'_1 - \vec{v}'_2 = -k(\vec{v}_1 - \vec{v}_2)$  où  $k$ , appelé coefficient de restitution, est un nombre compris entre 0 et 1. En tenant compte de la conservation de la quantité mouvement du système des deux sphères :

**B-3-1-** Etablir les expressions des vecteurs  $\vec{v}'_1$  et  $\vec{v}'_2$  en fonction de  $\vec{v}_1, \vec{v}_2, k, m_1$  et  $m_2$

**B-3-2-** Donner les expressions précédentes dans le cas d'un choc parfaitement élastique ( $k = 1$ ) et dans le cas d'un choc parfaitement inélastique ( $k = 0$ ).

**B-3-3-** Montrer que dans le cas d'un choc parfaitement élastique l'énergie cinétique totale du système se conserve.

**B-3-4-** On se place dans le cas où la sphère de masse  $m_2$  est au repos avant le choc et  $m_2$  très grande par rapport à  $m_1$ , ( $m_2 \gg m_1$ ).

**B-3-4-1-** En faisant les approximations nécessaires, trouver la vitesse de chacune des sphères après le choc.

**B-3-4-2-** On considère maintenant une petite balle qui tombe, sans vitesse initiale, d'une hauteur  $h$  sur une planche horizontale immobile et de très grande masse par rapport à la masse de la balle.

**B-3-4-2-1** - En utilisant le résultat précédent, déterminer la hauteur  $h'$  dont rebondit la balle après un premier choc.

**B-3-4-2-2** - Montrer que le temps qu'il faut à la balle pour s'arrêter de rebondir a pour expression :

$t = \frac{1+k}{1-k} \sqrt{\frac{2h}{g}}$ , où  $g$  = accélération de la pesanteur,  $h$  = hauteur initiale de chute de la balle et  $k$  : coefficient de restitution.

**B-3-4-2-3** - Montrer que si la balle précédente arrive sur la paroi avec la vitesse  $\vec{v}$  faisant un angle  $\alpha$  avec la verticale, elle rebondit suivant un angle  $\beta$  tel que  $\tan \alpha = k \tan \beta$ , avec une vitesse  $\vec{v}'$  de valeur

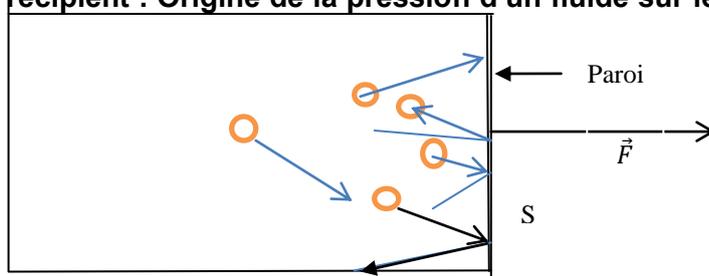
$$v' = v \cdot \sqrt{(k^2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha)}.$$

On admettra que le choc se fait avec une variation de quantité de mouvement normale à la paroi et que le coefficient de restitution est défini par :  $v'_N = kv_N$  où  $v_N$  et  $v'_N$  sont les composantes de  $\vec{v}$  et de  $\vec{v}'$  suivant la normale à la paroi.

### **PARTIE C : COLLISIONS A L'ECHELLE MICROSCOPIQUE et ATOMIQUE (27 points).**

**C-1 Collision des molécules sur les parois d'un récipient : Origine de la pression d'un fluide sur les parois.**

La pression exercée par un fluide sur les parois du récipient le contenant résulte à l'échelle macroscopique des nombreux chocs des



**SCIENCES PHYSIQUES**

15 T CGS 05 01

molécules du fluide sur la paroi. Cette pression paraît constante en un point donné parce que l'observation est faite à cette échelle.

Exemple de collisions des molécules sur une partie de l'enceinte contenant le fluide.

La force  $\vec{F}$  résultante des chocs sur un élément de surface S de la paroi est de module  $\|\vec{F}\| = P.S$  ;

P est la pression du fluide au point considéré.

Application : un ballon de football a un diamètre D = 222 mm.

Soit  $P_1$  la pression du gaz à l'intérieur du ballon lorsqu'il est gonflé. Suivant les normes d'une fédération de football, la pression  $P_1$  doit vérifier la condition suivante :  $0,7 \text{ bar} \leq P_1 - P_{\text{at}} \leq 1 \text{ bar}$ .

$P_{\text{at}}$  : pression atmosphérique qu'on prendra égale  $1 \text{ bar} = 1,013.10^5 \text{ Pascals} = 1 \text{ atm}$

**C-1-1** - Donner un encadrement de la force pressante exercée par le gaz sur la paroi du ballon dans les normes de cette fédération. Rappel de l'expression de la surface d'une sphère de rayon R :  $S = 4\pi R^2$ .

**C-1-2** - On suppose le gaz contenu dans le ballon comme parfait et on prendra la vitesse moyenne des molécules d'air dans le ballon  $\bar{v} = 500 \text{ m.s}^{-1}$ .

On établit dans la théorie cinétique que l'intensité f de la force pressante par unité de surface et par unité de temps est :  $f = N_c.m.\bar{v}$ , avec : m = masse d'une molécule d'air et  $N_c$  = nombre de chocs par unité de temps et par unité de surface.

-Déterminer  $N_c$  pour  $P_1 = 1,54 \text{ bar}$ . On prendra comme masse molaire moyenne de l'air  $29 \text{ g.mol}^{-1}$  et le nombre d'Avogadro  $N = 6,02.10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .

**C-1-3** La température de ce gaz est T (à l'échelle Kelvin) ; elle obéit à la relation suivante :  $\frac{1}{2}m\bar{v}^2 = \frac{3}{2}kT$  avec  $k = 1,38.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ . Quelle serait à l'échelle Celsius la température de l'air à l'intérieur du ballon ?

**C-1-4** Comment varie la pression d'un gaz à la suite d'une augmentation de sa température ? Justifier votre réponse.

**C-2 : Interaction photons - matière**

L'interaction d'un rayonnement électromagnétique avec une substance s'interprète comme une collision d'un photon de ce rayonnement avec un électron présent dans la matière. Ceci peut avoir les conséquences suivantes :

- Si le photon a une énergie un peu supérieure à l'énergie de liaison de l'électron, il cède toute son énergie au système atomique et l'électron est extrait de l'atome. C'est l'effet photoélectrique externe découvert en 1887 par le physicien allemand Hertz.

- Si l'énergie du photon est très nettement supérieure à l'énergie de liaison de l'électron, le photon peut transférer une partie de son énergie à l'électron et continuer son trajet avec une vitesse modifiée en direction. C'est l'effet Compton découvert par le physicien américain Compton en 1923.

**C-2-1 L'effet photoélectrique : Collision «photons-électrons liés».**

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons par un métal convenablement éclairé. Le dispositif expérimental de mise en évidence de cet effet est appelé la «cellule photoélectrique».

**C-2-1-1** - En partant de cette introduction sur l'interaction photons-matière dire ce qui différencie l'effet Compton de l'effet photoélectrique externe.

Quel est le caractère du rayonnement que mettent en évidence ces deux effets ?

Caractériser, en justifiant, le type de collision dont il s'agit dans le cas de l'effet photoélectrique ?

**C-2-1-2** - Le travail d'extraction des électrons des métaux,  $W_s$ , constituant la photocathode des cellules photoélectriques, est de l'ordre de quelques électron-volts ( eV ). (voir tableau ci-dessous).

Photocathode	Césium	Potassium	Aluminium	Cuivre	Tungstène	Nickel	Platine
Travail d'extraction $W_s$ (eV)	1,8	2,2	3,0	4,1	4,5	5,0	5,4

**SCIENCES PHYSIQUES**

15 T CGS 05 01

Définir la longueur d'onde seuil  $\lambda_s$  d'une photocathode et calculer sa valeur en Å pour chacun des métaux cités ci-dessus. On donne :  $h = 6,626.10^{-34}$  J.s et la célérité de la lumière  $C = 3.10^8$  m.s<sup>-1</sup>.

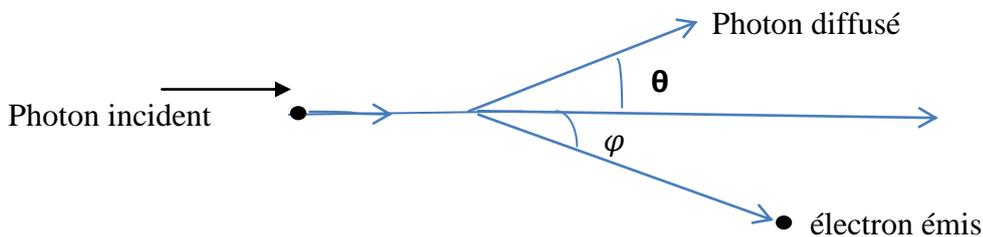
**C-2-1-3** - On éclaire une cellule photoélectrique en utilisant successivement les métaux précédents comme photocathode avec une radiation à la limite du spectre visible de longueur d'onde  $\lambda = 3500$  Å. Donner la liste des métaux, parmi les métaux ci-dessus, avec lesquels l'observation de l'effet photoélectrique est possible. Justifier votre réponse.

**C-2-1-4** - De la question précédente déterminer l'énergie cinétique, en eV, des électrons émis.

**C-2-2 - L'effet Compton : Collision « photons – électrons libres, (faiblement liés) ».**

En 1923, le physicien américain Compton observa la diffusion des rayons X. Un photon de rayons X de longueur d'onde  $\lambda_0$  est diffusé par un électron quasi-libre. L'angle de diffusion du photon est  $\theta$  et celui de l'électron est  $\varphi$  par rapport à la direction du faisceau de photons incident.

Ce processus est schématisé comme suit :



Il établit à partir de la théorie de collision entre ces deux particules la relation suivante :

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_C (1 - \cos\theta) ; \text{ avec } \lambda_C = 0,0242 \text{ \AA}, \Delta\lambda \text{ est appelé décalage Compton.}$$

On donne la masse de l'électron  $m = 9,1.10^{-31}$  kg, la constante de Planck  $h = 6,626.10^{-34}$  J.s et la vitesse de la lumière dans le vide  $C = 3.10^8$  m.s<sup>-1</sup>,  $\lambda_0 = 0,095$  Å et  $\theta = 37^\circ 30'$ .

**C-2-2-1** - Calculer la longueur d'onde et la fréquence des photons diffusés.

**C-2-2-2** - Calculer l'énergie  $E$  et l'impulsion  $p$  des photons incidents et diffusés. On rappelle que pour les photons, l'impulsion est donnée par :  $p = \frac{E}{c}$

**C-2-2-3** - Calculer l'énergie et la vitesse de l'électron de recul.

**C-3 : Expérience de Rutherford ; -la diffusion coulombienne.**

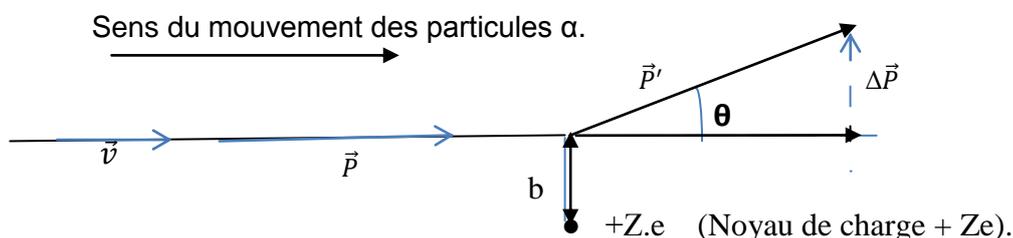
La déviation d'une particule chargée sous l'effet du champ électrostatique d'une autre particule chargée entre dans le type de collision élastique. Elle est appelée diffusion coulombienne.

Exemple : déviation des particules  $\alpha$  par des noyaux d'atomes d'or.

En 1911, en étudiant expérimentalement cette déviation, Rutherford a mis en évidence l'existence du noyau atomique et en a déterminé la dimension. La particule  $\alpha$  à l'approche du noyau de l'atome d'or ne constitue pas un système pseudo-isolé.

On réalise l'expérience de diffusion des particules  $\alpha$  ( ${}^4_2\text{He}^{2+}$ ) sur des noyaux d'atomes d'or caractérisés par le numéro atomique  $Z$ .

**C-3-1** - En considérant une trajectoire des particules  $\alpha$ , représentée ci-dessous, avec une faible déviation à l'approche du noyau ( $\theta$  : faible).



Caractériser, en justifiant, la nature du mouvement (accélééré ou décélééré) de la particule  $\alpha$  lorsqu'elle se rapproche du noyau et lorsqu'elle s'en éloigne après diffusion.

**C-3-2-1** – Etablir l'expression du module de la force  $\vec{F}$  d'interaction entre la particule  $\alpha$  et le noyau de charge  $+Ze$  ; lorsque la distance qui les sépare est  $b$  (on notera  $Z_\alpha$  le numéro atomique de la particule  $\alpha$ ).

**C-3-2-2** - Etablir l'expression de  $\|\Delta\vec{p}\| = \Delta P$  en fonction de  $\|\vec{F}\|$  et de  $\Delta t$ , durée de l'interaction entre la particule  $\alpha$  et le noyau. Ici on néglige la composante de  $\vec{F}$  suivant l'axe perpendiculaire à la direction du mouvement.

**C-3-3** - Les particules  $\alpha$ , de masse commune  $m$ , venant d'une distance éloignée du noyau avec une vitesse constante  $v$  sont ainsi déviées par celui-ci. On suppose aussi que  $\Delta t$  est la durée que met la particule  $\alpha$  pour parcourir la distance  $b$  à la vitesse constante  $v$ .

- Etablir l'expression de la durée  $\Delta t$  en fonction de la vitesse  $v$  et de la distance  $b$ .

- Etablir l'expression de  $\Delta P$  en fonction des grandeurs  $Z$ ,  $Z_\alpha$ ,  $e$ ,  $b$ ,  $v$ , et  $\epsilon_0$  d'une part et  $\theta$ ,  $m$  et  $v$  d'autre part.

- Dédurre de ces résultats l'expression de la distance  $b$ .

**C-3-4** - Les déviations maximales observées par Rutherford étaient de l'ordre de  $\theta = 1$  radian avec une vitesse  $v \approx 2,5 \cdot 10^7 \text{ m.s}^{-1}$ . Si on admet que les déviations les plus grandes correspondent aux plus petites valeurs de  $b$ , calculer alors l'ordre de grandeur du rayon nucléaire  $R$  en assimilant  $R$  à la valeur minimale de  $b$ .

Application numérique. On donne :  $m = 6,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  ;  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ S I}$  ;  $Z = 79$  ;  $Z_\alpha = 2$  et  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

**C-3-5** - Une formule empirique donne le rayon d'un noyau atomique :  $R = R_0 \cdot A^{1/3}$  avec  $R_0 \approx 1,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}$  et le nombre de masse du noyau  $A = 197$ .

Calculer le rayon  $R$  à partir de cette formule et comparer cette valeur au résultat obtenu expérimentalement par Rutherford, et conclure.

## **PARTIE D : PARTICULES DE GRANDE ENERGIE ; COLLISIONS A L'ECHELLE SUBATOMIQUE** (24 points)

L'étude du mouvement des particules possédant une grande énergie et animées de vitesses proches de la célérité de la lumière nécessite l'application des lois de la mécanique relativiste.

Rappels sur quelques éléments de mécanique relativiste : l'énergie totale d'une particule libre de masse  $m$  animée d'une vitesse  $v$  dans un référentiel  $R$  est :  $E = \gamma m c^2$  et  $C$  = célérité de la lumière ; son énergie au repos ( $v = 0$ ) est :  $E_0 = m c^2$  et son énergie cinétique  $T = (\gamma - 1) m c^2$  ; avec  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ .

La quantité de mouvement de la particule est :  $p = \gamma m v$  et on a la relation suivante :  $E^2 - p^2 c^2 = E_0^2$ , invariant dynamique, indépendante du repère galiléen choisi.

### **D-I : RADIOACTIVITE.**

#### **D-I-1 - Formation de la particule $\alpha$ ( ${}^4_2\text{He}^{2+}$ ), noyau d'hélium.**

Les particules élémentaires sont observées à l'aide des chambres à bulles. Une chambre à bulles est un milieu contenant un liquide amené à une température supérieure à sa température d'ébullition, et une bulle gazeuse apparaît au point de contact du liquide avec une particule en mouvement.

#### **D-I-1-1 : Quantité de mouvement des particules dans un champ magnétique.**

Une particule de charge  $q$  est en mouvement dans un champ magnétique uniforme. Le vecteur champ  $\vec{B}$  est perpendiculaire à la vitesse  $\vec{v}$  de la particule.

- Montrer que le mouvement de la particule dans ce champ magnétique est circulaire et uniforme.

- Etablir l'expression de sa quantité de mouvement,  $p$ , en fonction du rayon  $R$  de sa trajectoire, de sa charge  $q$  et de l'intensité  $B$  du champ magnétique.

- Montrer que le produit « p.C » a la dimension d'une énergie, et que la quantité de mouvement p peut être donnée en MeV/C ; C étant la célérité de la lumière dans le vide.

**D-I-1-2** - Déduire de la relation précédente pour une particule de charge  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ,  $C = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

les relations :  $p.C = 4,8 \cdot 10^{-11} \text{ BR (J)} = 3 \cdot 10^8 \text{ BR (eV)} = 300 \text{ BR (MeV)}$ .

Application numérique : montrer que  $p = 1080 \text{ MeV/C}$  pour  $R = 3 \text{ m}$  et  $B = 1,2 \text{ T}$ .

**D-I-1-3** - Dans une chambre à bulles le rayon de la trajectoire circulaire d'une particule  $\alpha$  ( ${}^4_2\text{He}^{2+}$ ) est de

50 cm tandis que celle du proton ( ${}^1_1\text{H}^+$ ) est de 100 cm ; sachant que la quantité de mouvement du proton est égale à 2000 MeV/C, déterminer en MeV/C la quantité de mouvement de la particule  $\alpha$ .

**D-I-1-4** - Formation de la particule  $\alpha$  à partir de deux protons et de deux neutrons.

Cette formation de la particule  $\alpha$  se fait avec une perte de masse de  $28 \text{ MeV/C}^2$ . La masse du proton est  $938,2 \text{ MeV/C}^2$  et celle du neutron  $939,5 \text{ MeV/C}^2$ .

- Ecrire l'équation de la réaction de formation de la particule  $\alpha$  à partir de deux neutrons et de deux protons.

- Préciser la nature (fusion ou fission) d'une telle réaction nucléaire. (Justifier votre réponse).

- Dire en le justifiant s'il s'agit d'une collision élastique ou d'une collision inélastique.

- Calculer l'énergie au repos  $E_0$  de la particule  $\alpha$ .

**D-I-1-5** - Calculer la vitesse de cette particule  $\alpha$  dans la chambre à bulles.

### **D I-2 : Réactions nucléaires provoquées : la fission.**

**D I-2-1** - La fission consiste en la division d'un noyau lourd instable en deux fragments plus légers comparables en le bombardant généralement par des neutrons ( ${}^1_0n$ ). Cette division peut conduire, suivant un processus induit, à la création d'autres neutrons.

Les noyaux Ba ( ${}^{141}_{56}\text{Ba}$ ) et Kr ( ${}^{92}_{36}\text{Kr}$ ) sont parmi les fragments possibles de la fission du noyau d'uranium ( ${}^{235}_{92}\text{U}$ ) par un neutron ( ${}^1_0n$ ) rapide. Sachant qu'il apparaît plusieurs neutrons :

**D I-2-1-1** Ecrire l'équation d'une telle réaction nucléaire et préciser le nombre de neutrons qui apparaissent. En déduire comment une telle réaction pourrait induire d'autres, ainsi de suite. C'est ce qui se produit dans une bombe atomique.

**D I-2-1-2** Pour obtenir une réaction nucléaire en chaîne contrôlée comme dans le cas d'une centrale électrique nucléaire, on ralentit les neutrons rapides par des noyaux d'un autre corps appelé modérateur, placé dans le réacteur.

**D-I-2-1-2-1** Comment qualitativement pourrait-t-on choisir un modérateur ?

**D I-2-1-2-2** Une étude détaillée de collision frontale neutron–noyau modérateur permet d'établir le rapport  $\varepsilon$  entre l'énergie cinétique  $E'_c$  du neutron diffusé par le noyau du modérateur et son énergie cinétique  $E_c$  avant collision :  $\varepsilon = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2$  ; A est le nombre de masse du noyau modérateur.

Le modérateur le plus adapté est celui pour lequel  $\varepsilon$  est minimale.

- Quel serait alors le meilleur modérateur dans cette hypothèse ?

- On n'utilise pas souvent ce modérateur mais plutôt l'eau lourde contenant le deutérium ( $A = 2$ ) ; quel serait alors l'inconvénient d'utiliser le modérateur précédent ?

**D I-2-1-3** Comparaison de l'énergie libérée par une centrale nucléaire et par une centrale au charbon.

**D-I-2-1-3-1**-Les masses atomiques de ( ${}^{141}_{56}\text{Ba}$ ), ( ${}^{92}_{36}\text{Kr}$ ),  ${}^{235}_{92}\text{U}$  et  ${}^1_0n$  sont respectivement 140,9141 u, 91,9250 u, 235,043925 u et 1,0087 u, avec  $1\text{u} = 931,5\text{MeV/C}^2 = 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

- Calculer l'énergie libérée au cours de cette réaction conduisant à ces deux fragments. On néglige l'énergie cinétique des neutrons incidents.

**D-I 2-1-3-2** Quelle masse de charbon faut-il brûler pour obtenir la même quantité d'énergie que celle libérée par des noyaux contenus dans 1kg d'uranium ?

Donnée : la combustion de 1 kg de charbon dégage  $3,35 \cdot 10^7$  J.

**D-II : Rayonnement cosmique.**

La terre est arrosée par une pluie de particules, nommée rayonnement cosmique découvert par Victor Hess en 1912 (prix Nobel 1936). Ce phénomène est le résultat de l'arrivée des particules énergétiques (provenant du soleil, de la Galaxie et plus globalement de tout l'univers). Ce nuage de particules, formé principalement des protons à 87%, entre 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 au sol, d'autres sont absorbées par l'atmosphère et d'autres encore induisent de nouvelles réactions qui donnent naissance à des particules tertiaires, etc.

Une seule particule cosmique très énergétique peut générer une gerbe contenant plusieurs milliards de particules (voir figure 2, ci-dessous). Plusieurs types de particules atteignent le sol, parmi ces particules on trouve des muons.

**D-II-1** On considère que les lois de la mécanique classique sont applicables pour des particules ayant une vitesse égale au plus à 10 % C ; C étant la célérité de la lumière dans le vide,  $C = 3 \cdot 10^8$  m.s<sup>-1</sup>.

Calculer, en joules et en mégaélectronvolts, l'énergie cinétique d'un proton animé d'une vitesse égale à 10% C. On donne la masse du proton  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  kg.

**D-II-2** Les protons cosmiques ont leur énergie cinétique comprise entre 100 MeV et 10 GeV

Justifier par un argument quantitatif l'affirmation suivante : les particules du rayonnement cosmiques sont relativistes.

**D-II-3** Les muons issus des collisions entre les particules émises par le soleil et les particules de la haute atmosphère ont une vitesse  $v = 0,9997$  C. Expliquer pourquoi les muons sont des particules relativistes.

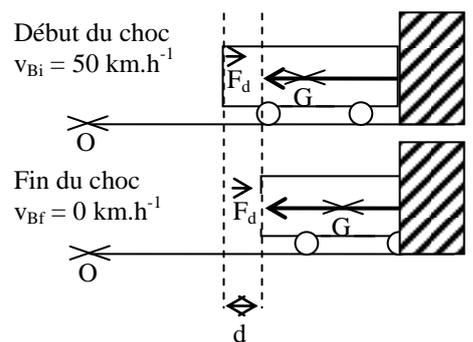
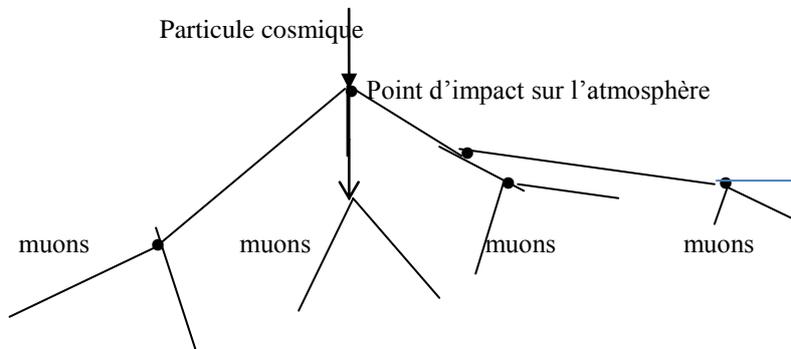
**D-II-4** La durée de vie propre d'un muon est  $\Delta t_0 = 2,2$   $\mu$ s. Pour un observateur terrestre 67 $\mu$ s sont nécessaires aux muons pour traverser l'atmosphère et atteindre le sol.

En mécanique relativiste la durée d'un événement dépend du référentiel choisi, ainsi on établit que la durée  $\Delta t$  dans un référentiel terrestre est tel que  $\Delta t = \gamma \Delta t_0$  avec  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ .

Calculer pour l'observateur terrestre la durée de vie du muon.

En déduire que les muons issus des rayons cosmiques peuvent être observés au niveau du sol terrestre.

Représentation simplifiée des gerbes issues du rayonnement cosmique (figure 2 ; exercice D-II).



Etude d'un choc frontal (figure 1 ; exercice B-2-3).