

Physique : DS1

Partie A : Suspension de voiture

Les suspensions d'un véhicule ont pour objectif principal d'assurer la meilleure tenue de route possible, de façon à garantir la sécurité des occupants.

Il existe de nombreux types de suspensions dont le rôle est notamment de contrôler le déplacement vertical d'un véhicule.

Par la suite, nous allons nous intéresser aux suspensions à ressorts disposant d'amortisseurs rhéomagnétique (**figure 12**).

Différents éléments participent à l'amortissement mais tous les effets seront ramenés au niveau des suspensions dont seul le déplacement vertical est étudié.

L'étude est menée en référentiel galiléen et l'on note $\vec{g} = -g\vec{e}_z$ l'accélération du champ de pesanteur.

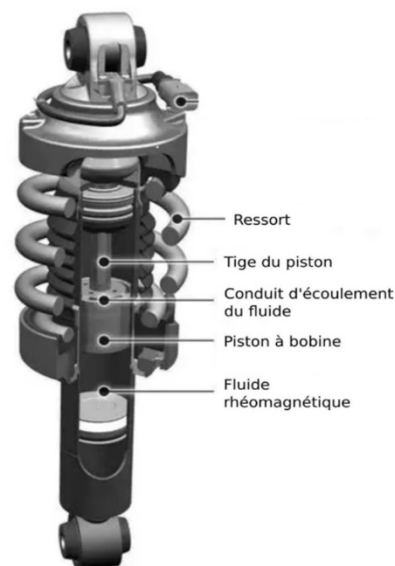


Figure 12 - Schéma d'une suspension à ressort avec amortisseur rhéomagnétique

Q33. Donner un exemple de référentiel galiléen. Préciser le ou les liens qui existent entre deux référentiels galiléens.

Le véhicule, de masse M , repose de façon équivalente sur quatre amortisseurs supposés identiques. On note m la masse supportée par un seul amortisseur.

Q34. Quelle masse m supporte un amortisseur ?

Partie I - Suspension passive

I.1 - Suspension sans amortissement

On modélise la suspension sans amortisseurs d'une voiture par un ressort de constante de raideur k et de longueur à vide ℓ_0 , sur lequel repose la masse m (**figure 13**).

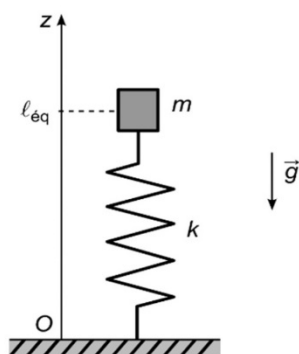


Figure 13 - Modélisation d'une suspension à ressort

- Q35.** Déterminer la longueur à l'équilibre du ressort, $\ell_{\text{éq}}$, en fonction de g , k , ℓ_0 et de m .
- Q36.** Donner, en fonction de k et de m , l'expression de la pulsation propre ω_0 du système. Justifier son expression par une analyse dimensionnelle.

Une association simple de deux ressorts peut se faire en série ou en parallèle (**figure 14**). Soient deux ressorts de longueur à vide identique ℓ_0 et de constantes de raideur k_1 et k_2 . Selon l'association réalisée, la constante de raideur équivalente vaut k_s en série ou k_p en parallèle.

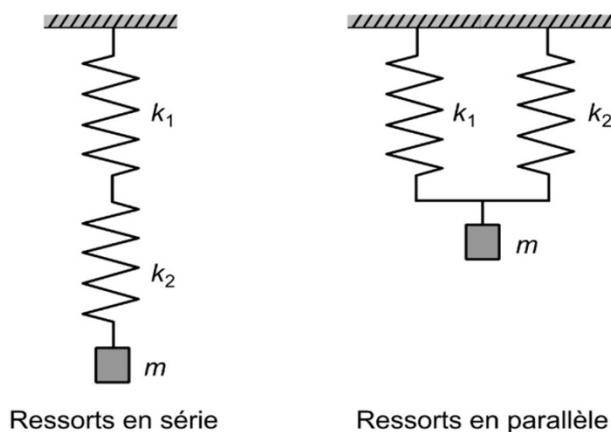


Figure 14 - Associations série et parallèle de deux ressorts

- Q37.** Démontrer que, pour une association de deux ressorts en parallèle, $k_p = k_1 + k_2$.
- Q38.** Les quatre amortisseurs étant supposés identiques, donner l'expression de la constante de raideur équivalente k_v de l'ensemble du véhicule, en fonction de la constante k de l'un d'entre eux.
- Q39.** En déduire l'expression de la pulsation propre de la voiture Ω_0 en fonction de ω_0 .

I.2 - Suspension avec amortissement

Pour le confort des occupants du véhicule, il est préférable d'en réduire rapidement les oscillations. Pour ce faire, la suspension comporte un dispositif amortisseur (**figure 15**) qui exerce une force de frottement fluide \vec{F}_f .

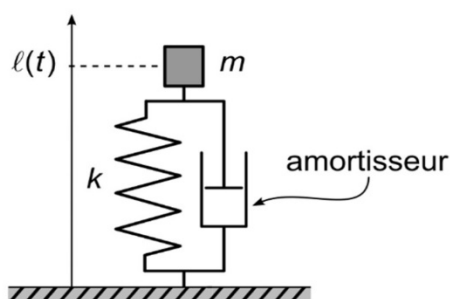


Figure 15 - Suspension avec amortisseur

La force de frottement fluide s'écrit :

$$\vec{F}_f = -h \frac{dz}{dt} \vec{e}_z$$

avec $z(t) = \ell(t) - \ell_0 + \frac{mg}{k}$ la variable repérant la position de la masse m à partir de sa position d'équilibre.

Q40. Montrer que l'équation différentielle du mouvement vertical d'un amortisseur de la voiture soutenant la masse m se met sous la forme :

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dz}{dt} + \omega_0^2 z = 0$$

et déterminer les expressions de ω_0 et Q en fonction de k , h et de m .

Q41. En déduire, en fonction de h et de m , la valeur limite k_c de k permettant le retour le plus rapide du système à sa position d'équilibre (régime critique).

Q42. À la construction du véhicule, le régime d'oscillations correspond au régime apériodique. Si l'on charge trop le véhicule, existe-t-il un risque de passer en régime pseudopériodique ?

L'amortisseur a été soumis à une excitation sinusoïdale de fréquence variable et l'amplitude des oscillations obtenues a été enregistrée pour différentes valeurs de m , ce qui a permis d'obtenir les courbes de résonance de la **figure 16**.

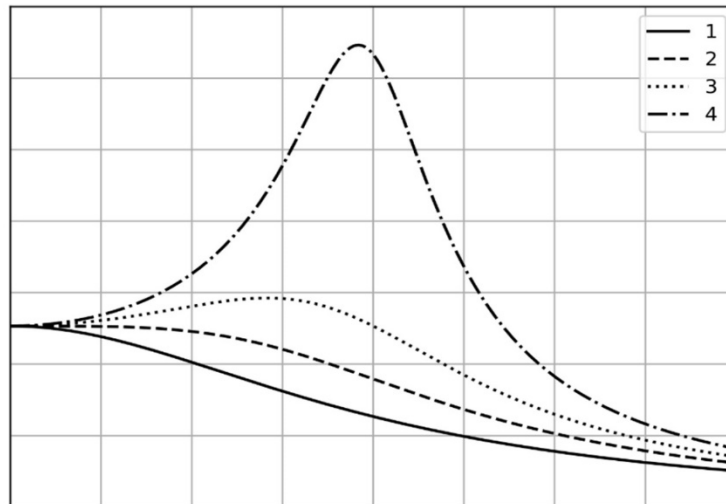


Figure 16 - Courbes de résonance

Q43. Proposer des grandeurs pour l'axe des abscisses et des ordonnées de la **figure 16**.

Q44. Expliquer quelle courbe correspond à la masse la plus élevée.

PARTIE B – Seul sur Mars

Seules certaines parties du sujet ont été conservées. Gardez la numérotation de l'énoncé.

L'histoire du film *The Martian* (Seul sur Mars) de Ridley Scott, montre comment un homme, Mark Watney, survit seul sur Mars grâce à ses connaissances scientifiques. L'environnement hostile de la planète représente une contrainte de taille pour les ingénieurs et les scientifiques qui travaillent pour que des hommes puissent un jour poser le pied sur la planète rouge. La NASA annonce un vol habité pour Mars dans les années 2030, l'hypothèse du film n'est donc pas irréaliste. Même si cette histoire repose sur des travaux scientifiques et des techniques aérospatiales actuelles, on peut se demander si l'histoire est bien réaliste.

Certaines questions, repérées par une barre en marge, ne sont pas guidées et demandent de l'initiative de la part du candidat. Les pistes de recherche doivent être consignées, si elles sont pertinentes, elles seront valorisées. Le barème tient compte du temps nécessaire pour explorer ces pistes et élaborer un raisonnement.

Les quatre premières parties du sujet peuvent être liées notamment concernant les applications numériques. Les deux dernières parties sont indépendantes.

Toutes les données nécessaires à la résolution du sujet sont données en fin de sujet.

I La planète Mars

Mars est la quatrième planète par ordre de distance croissante au Soleil et la deuxième par masse et par taille croissantes sur les huit planètes que compte le système solaire. Dans le référentiel héliocentrique (aussi appelé référentiel de Kepler), supposé galiléen, la trajectoire de Mars est une ellipse contenue dans le plan de l'écliptique.

Extrait de CNRS *Le journal*

Question : Envoyer des humains sur Mars coûterait au moins 100 ou 200 milliards de dollars et ne serait possible que vers 2050, à condition qu'une vraie volonté politique se dégage. Ne vaut-il pas mieux continuer à envoyer des robots ?

Réponse du planétologue François Forget : C'est un vieux débat, [...] les robots ne sont pas forcément plus efficaces que les humains. Par exemple, un géologue peut repérer en quelques secondes une pierre intéressante, alors qu'il faudra des jours pour la repérer en manœuvrant un rover depuis la Terre, vu que les signaux radio mettent 5 à 22 minutes entre les deux planètes. Mais il y a une alternative qui me plaît bien : envoyer des humains en orbite martienne sans qu'ils se posent à la surface. Il est en effet très difficile — et donc coûteux — de poser des charges de plus d'une tonne sur Mars. Parce que l'atmosphère y est trop fine pour freiner correctement avec un parachute comme sur Terre, et trop épaisse pour ralentir juste au-dessus de la surface avec de simples rétrofusées comme sur notre Lune. Autre avantage : plus besoin de MAV pour remonter, ni d'habitat en surface. Au final, depuis l'orbite, les astronautes pourraient facilement aller se poser sur les petites lunes Phobos ou Deimos (qui n'ont presque pas de gravité), et surtout piloter en quasi temps réel des robots sophistiqués envoyés sur Mars elle-même. Une telle mission pourrait avoir lieu dès 2035.

09 novembre 2016

- Q 1.** En utilisant l'extrait du *CNRS Le Journal*, proposer un encadrement de la distance de Mars au Soleil. En déduire le demi-grand axe a_M de l'ellipse correspondant à la trajectoire de Mars.
- Q 2.** Sachant que la période de révolution de Mars est $T_M = 687$ jours, calculer la valeur de a_M . Cette valeur est-elle en accord avec les propos rapportés par l'extrait d'article précédent ? Retrouver également une estimation de la masse du Soleil.
- Pour la suite, on prendra $a_M = 228 \times 10^6$ km.
- Q 3.** Déterminer la valeur du champ de pesanteur sur Mars.

II Tempête sur Mars

Lors d'une sortie sur Mars, l'écran de contrôle de Mark Watney est superposé à celui de l'action (figure 1). À gauche figurent les données externes et à droite celles concernant le scaphandre. Ainsi la pression extérieure vaut 0,11 psi (pound per square inch) alors que la pression interne est de 4,75 psi. Pour la suite on prendra les valeurs lues sur l'écran de contrôle pour les pressions et températures externes et internes (scaphandre).



Figure 1 Écran de contrôle de Mark Watney

II.A – L'atmosphère martienne

- Q 4.** Un bon scientifique pourra s'étonner du pourcentage de dioxygène dans le scaphandre. Quel est le problème ?
- Q 5.** Estimer la masse volumique ρ de l'atmosphère martienne. Comparer à celle de l'atmosphère de la Terre.
- Q 6.** Tracer l'allure du diagramme $P(T)$ de l'eau en plaçant en particulier le point triple (611 Pa, 0,01 °C) et le point critique (22 MPa, 374 °C). Préciser la signification physique de ces points.
- Q 7.** Dans quel état se trouve l'eau sur Mars ?
- Q 8.** Au cours d'une tempête martienne, la combinaison de Mark Watney est percée. Donner deux raisons pour lesquelles Mark Watney ne peut pas survivre dans ces conditions. (On supposera que le scaphandre se dépressurise en restant à température constante.)

IV Sauvetage de Mark Watney par le vaisseau Hermès

Cette opération consiste à envoyer Mark Watney dans l'espace, grâce à un VAM, et à l'intercepter depuis le vaisseau Hermès « en plein vol », comme représenté figure 5. L'enjeu est donc que L'Hermès et Mark Watney se retrouvent au même endroit, au même moment avec une vitesse relative nulle.

IV.A – Trajectoire du vaisseau Hermès

Dans cette sous-partie, on se place dans le référentiel de Kepler.

Le vaisseau Hermès est utilisé pour les trajets Terre-Mars au cours desquels le vaisseau n'est soumis qu'à l'attraction du Soleil. L'orbite de transfert utilisée est une orbite de transfert de Hohmann : ellipse dont le périhélie est un point de l'orbite de la Terre et l'aphélie un point de l'orbite de Mars (figure 6). On supposera, pour simplifier, que les orbites de la Terre et de Mars sont circulaires de rayons respectifs a_T et a_M .

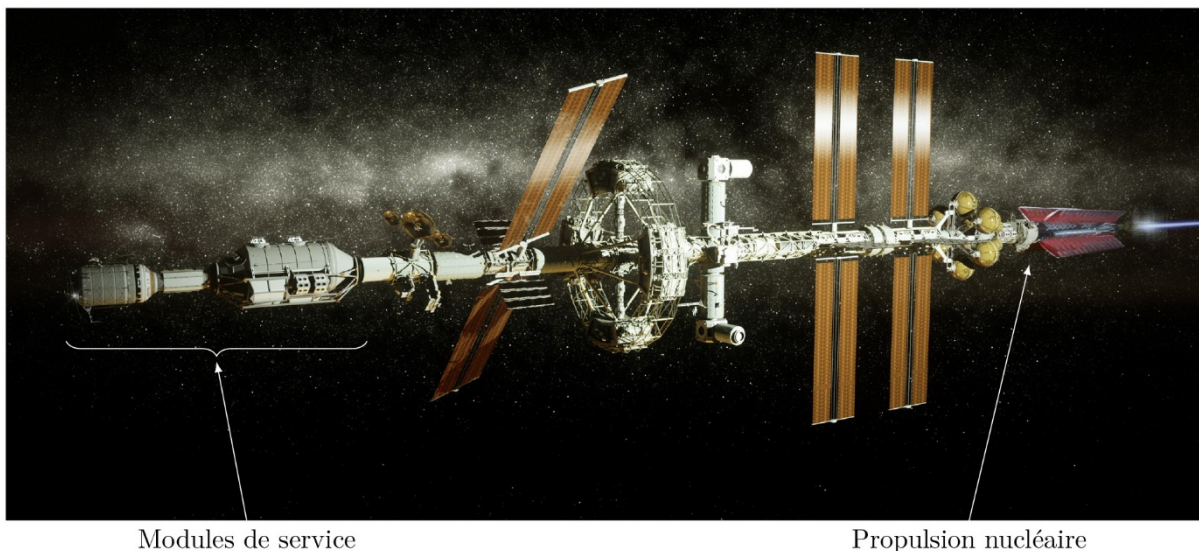


Figure 4 Le vaisseau Hermès

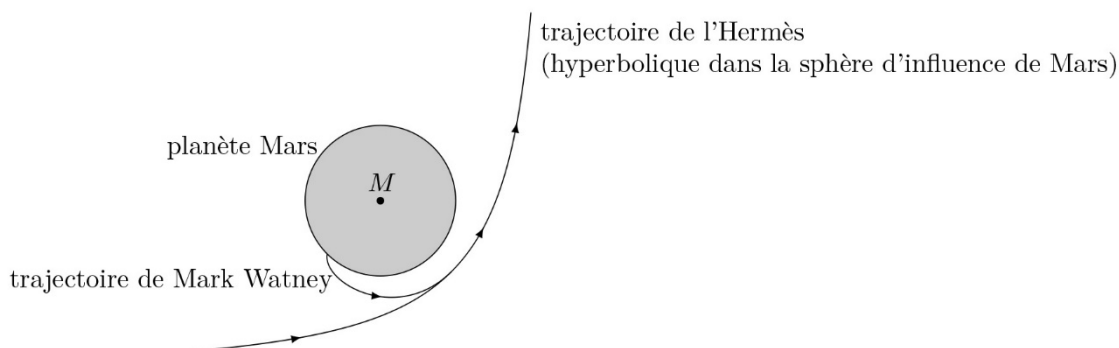


Figure 5 Principe de la récupération de Mark Watney

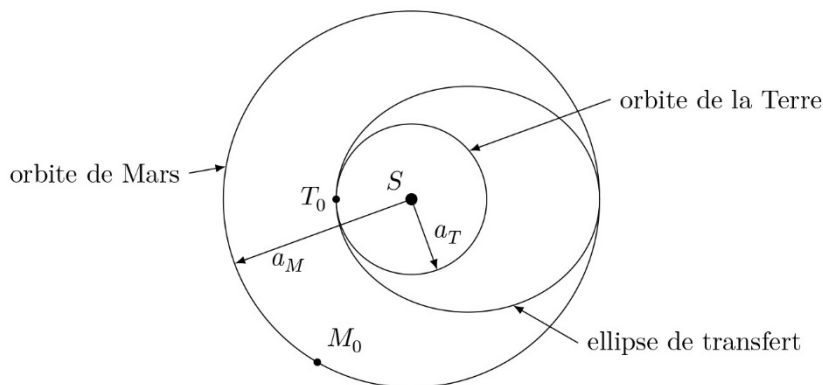


Figure 6

- Q 16.** Déterminer le demi grand axe a de l'ellipse de transfert.
 On considère le transfert du vaisseau de la Terre vers la planète Mars, les positions initiales de la Terre et de Mars étant notées respectivement T_0 et M_0 .
- Q 17.** Déterminer la durée du transfert. En déduire la position de Mars au moment du lancement sur Terre (M_0). En déduire également la position de la Terre au moment de l'arrivée du vaisseau à proximité de Mars (les positions de la Terre et de Mars seront à ce moment là notées respectivement T_1 et M_1).
- Q 18.** Montrer qu'un nouveau transfert, à partir de la Terre, ne peut avoir lieu qu'environ 780 jours après le premier lancement (période synodique).
- Q 19.** Une fois le vaisseau arrivé au voisinage de la planète Mars (M_1, T_1), combien de temps faut-il attendre pour envisager un transfert d'Hohmann permettant de ramener le vaisseau à proximité de la Terre ? On notera T_2 et M_2 les positions respectives de la Terre et de Mars au début de ce second transfert.
- Q 20.** Représenter les points T_0, M_0, T_1, M_1, T_2 et M_2 , ainsi que les orbites d'aller et de retour, sur un schéma reproduisant la figure 6.
- Q 21.** En déduire qu'une mission aller-retour vers Mars dure au minimum 972 jours. Sachant qu'entre le départ de l'Hermès vers la Terre, suite à la tempête, et son retour sur Mars, il s'est écoulé 549 jours, commenter.

Données

Terre-Mars

	Terre	Mars
Composition de l'atmosphère	N ₂ (77 %), O ₂ (21 %)	CO ₂ (95 %), N ₂ (2,7 %)
Rayon des planètes (km)	6380	3390
Densité globale	5,5	3,9

Diverses constantes et grandeurs

Constante gravitationnelle	$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
Célérité de la lumière	$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Constante d'Avogadro	$\mathcal{N}_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Constante des gaz parfaits	$R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
Masses molaires (g·mol ⁻¹)	H = 1, C = 12, N = 14, O = 16
Viscosité du CO ₂ (supposée indépendante de la température)	$\eta = 1,07 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Viscosité de l'air terrestre (à 15 °C)	$\eta_T = 1,79 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Distance Terre-Soleil	$a_T = 1 \text{ u.a.} = 1,50 \times 10^8 \text{ km}$
Température de la surface du Soleil	$T_s = 5778 \text{ K}$
Rayon du Soleil	$R_s = 6,96 \times 10^5 \text{ km}$
Masse du vaisseau Hermès	$\approx 500 \text{ t}$
1 psi = 0,0689 bar	

Pression de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température

t (°C)	P_s (Pa)	t (°C)	P_s (Pa)	t (°C)	P_s (Pa)	t (°C)	P_s (Pa)
-75	0,122	-40	12,84	0	611,15	35	5626,7
-70	0,261	-35	27,71	5	872,60	40	7381,4
-65	0,540	-30	38,01	10	1228,1	45	9589,8
-60	1,080	-25	63,29	15	1705,6	50	12344
-55	2,093	-20	103,26	20	2338,8	55	15752
-50	3,936	-15	165,30	25	3169,0	60	19932
-45	7,202	-10	259,90	30	4245,5	65	25022

d'après CRC Handbook of Chemistry and Physics - 2004

Partie C : Particules chargées dans l'atmosphère

Données utiles

Constantes fondamentales

Célérité de la lumière dans le vide	$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}$
Permittivité diélectrique du vide	$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$
Perméabilité magnétique du vide	$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$
Charge élémentaire	$e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$
Masse de l'électron	$m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Masse du proton	$m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$

Ce sujet aborde l'étude de quelques problèmes de physique de l'océan et de l'atmosphère, appliqués notamment aux télécommunications (acoustique sous-marine et radio). La première partie est consacrée à l'étude des mouvements individuels ou collectifs des particules chargées dans l'atmosphère et à l'origine des siffleurs ionosphériques. Elle est complètement indépendante de la seconde partie qui étudie les ondes acoustiques sous-marines et certaines de leurs applications.

Le sujet comporte une annexe, présentant deux documents, des valeurs numériques et un formulaire.

Certaines questions, repérées par une barre en marge, ne sont pas guidées et demandent de l'initiative de la part du candidat. Les pistes de recherche doivent être consignées ; si elles sont pertinentes, elles seront valorisées. Le barème tient compte du temps nécessaire pour explorer ces pistes et élaborer un raisonnement.

Dans tout le sujet, le repère euclidien $(Oxyz)$ est associé aux vecteurs $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ formant une base orthonormée et directe. Les grandeurs complexes sont soulignées (z, \underline{E}) sauf i (tel que $i^2 = -1$ et $\text{Im}(i) = 1$).

I Particules chargées dans l'atmosphère

L'atmosphère terrestre comporte de nombreuses particules chargées. Certaines d'entre elles parviennent à haute énergie dans la haute atmosphère avant d'être guidées par le champ magnétique terrestre. Leur freinage à l'arrivée s'accompagne de phénomènes optiques spectaculaires, observables près des pôles magnétiques terrestres vers lesquelles ces particules sont guidées.

D'autres particules chargées, moins énergétiques, dues à l'ionisation partielle des gaz de la haute atmosphère, influencent la propagation des ondes qui sont guidées entre la surface des océans et la haute ionosphère. C'est en particulier le cas des siffleurs ionosphériques, ondes radio fortement dispersées, générées par des sources naturelles, qui interagissent aisément avec les récepteurs radio en produisant un bruit caractéristique de sifflement, d'où leur nom. Ils ont été observés durant la première guerre mondiale puis clairement identifiés dès 1919.

I.A – Particule chargée en mouvement dans un champ magnétique

On étudie d'abord le mouvement d'une particule de charge q et de masse m sous la seule influence d'un champ magnétostatique uniforme $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$. La vitesse initiale de la particule est $\vec{v}_0 = v_\perp \vec{e}_x + v_\parallel \vec{e}_z$.

Q 1. Établir les équations différentielles vérifiées par les composantes $v_x(t)$, $v_y(t)$ et $v_z(t)$ de la vitesse $\vec{v}(t)$ de la particule. Que peut-on dire de $v_z(t)$ et de $\vec{v}^2(t)$?

On s'intéresse seulement au mouvement projeté dans un plan perpendiculaire à \vec{B}_0 ; la vitesse associée est notée $\vec{w}(t)$.

Q 2. Déterminer l'équation vérifiée par \vec{w} .

Q 3. Montrer que le mouvement de la particule chargée ainsi projeté est circulaire, de rayon ρ_c à déterminer, parcouru à vitesse angulaire constante Ω_c (algébrique) et déterminer Ω_c .

Q 4. Rappeler l'ordre de grandeur du champ magnétique terrestre (par exemple en France) et calculer Ω_c respectivement pour des électrons et pour des protons.

I.B – Particule chargée en mouvement dans des champs électrique et magnétique croisés

On étudie maintenant le mouvement de la particule de charge q et de masse m sous l'influence d'un champ magnétostatique uniforme $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$ et d'un champ électrostatique uniforme $\vec{E}_1 = E_1 \vec{e}_x$. La vitesse initiale de la particule est $\vec{v}_0 = \vec{v}_\perp$ où $\vec{v}_\perp \cdot \vec{e}_z = 0$.

Q 5. Établir les équations différentielles vérifiées par les composantes $v_x(t)$, $v_y(t)$ et $v_z(t)$ de la vitesse $\vec{v}(t)$ de la particule.

Q 6. Montrer qu'il en existe une seule solution constante dans le plan (Oxy) perpendiculaire à \vec{B}_0 , appelée *vitesse de dérive* \vec{V}_d (par définition $\vec{V}_d \cdot \vec{e}_z = 0$) et exprimer \vec{V}_d en fonction de E_1 et de B_0 .

On pose $\vec{u} = \vec{v} - \vec{V}_d$.

Q 7. Quelles sont les équations différentielles vérifiées par $\vec{u}(t)$? En déduire la trajectoire de la particule chargée.