

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

SESSION 2018

COMPOSITION DE PHYSIQUE-CHIMIE

(Classes de terminale S)

Durée : 5 heures

L'usage de la calculatrice est autorisé

Consignes aux candidats

- Ne pas utiliser d'encre claire
- N'utiliser ni colle, ni agrafe
- Numéroté chaque page en bas à droite (numéro de page / nombre total de pages)
- Sur chaque copie, renseigner l'en-tête + l'identification du concours :

Concours / Examen : CGL

Section/Spécialité/Série : PHYSI

Epreuve : 101

Matière : PHCH

Session : 2018

Quittons notre berceau !

« La Terre est le berceau de l'humanité, mais on ne peut vivre éternellement dans son berceau. »

C. Tsiolkovski

Document 1 : Équation de Tsiolkovski

Constantin Tsiolkovski est considéré comme le père de l'aéronautique moderne. En 1903, dans son ouvrage « *L'exploration de l'espace cosmique par des engins à réaction* », il décrit une fusée qui serait assez puissante pour se libérer de l'attraction terrestre et atteindre d'autres planètes. L'équation, qu'il met au point et porte aujourd'hui son nom, est l'équation fondamentale de l'aéronautique reliant la vitesse instantanée de la fusée $v(t)$ à sa masse $m(t)$ à l'instant t :

$$\Delta v = v(t) - v_0 = v_e \ln \left(\frac{m_0}{m(t)} \right)$$

où m_0 est la masse initiale de la fusée, v_0 la vitesse initiale de la fusée et v_e la vitesse d'éjection des gaz, par rapport au référentiel de la fusée, supposée constante.

Dans cette équation, la fusée n'est soumise qu'à la force de poussée fournie par son moteur. Elle ne tient compte d'aucune autre action extérieure.

Le candidat est invité à se référer régulièrement à l'équation de Tsiolkovski et à la partie D - Annexes en fin d'énoncé. Celle-ci regroupe les données utiles à la résolution de certaines questions.

Chaque partie peut être traitée indépendamment.

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

PARTIE A - Objectif Mars

Pour aller sur Mars, la NASA (National Aeronautics and Space Administration) développe actuellement un lanceur spatial nommé le Space Launch System (SLS) dont les caractéristiques sont données en annexe. Il est constitué de deux propulseurs d'appoint (les boosters), de deux étages cryogéniques et d'un module d'exploration. Le lanceur sera lancé depuis la surface de la Terre et aura pour objectif de mettre un module d'exploration en orbite autour de Mars.

I. D'où décoller depuis la Terre ?

Document 2 : Vitesse angulaire

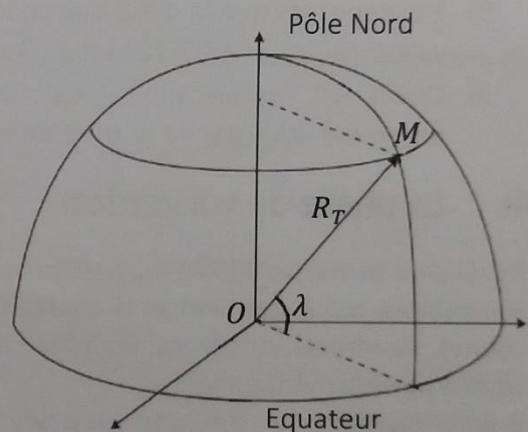
Considérons le cas particulier d'un point M décrivant, dans un référentiel donné, une trajectoire circulaire et uniforme. Durant le mouvement, le rayon du cercle CM balaie un angle θ pendant la durée Δt , C étant le centre du cercle. La vitesse angulaire du point M dans ce référentiel est :

$$\omega = \frac{\theta}{\Delta t}$$

On s'intéresse au lanceur juste avant le décollage dans le référentiel géocentrique, référentiel dont l'origine est le centre de la Terre et dont les trois axes pointent vers des étoiles lointaines qui apparaissent fixes.

On assimile le lanceur à un point matériel M fixe à la surface de la Terre de centre O .

- 1) Quelle est la valeur de la vitesse angulaire Ω du lanceur dans le référentiel géocentrique ?
- 2) Exprimer la vitesse v du lanceur dans le référentiel géocentrique en fonction de sa latitude λ , du rayon terrestre R_T et de la vitesse angulaire Ω .
- 3) Quelles latitudes faut-il privilégier pour le site de lancement ? Justifier.



II. Décollage

Le premier étage est un étage cryogénique. Il contient deux réservoirs, l'un de dioxygène et l'autre de dihydrogène, maintenus tous deux à l'état liquide. Injectés dans la chambre de combustion, la réaction de ces deux composés chimiques conduit à la formation de vapeur d'eau qui s'échappe par la tuyère du moteur et propulse le lanceur.

Document 3 : Formule de Mechtcherski

Lors de l'éjection de gaz d'une fusée à la vitesse \vec{v}_e par rapport au référentiel de la fusée, dans un référentiel galiléen R_g , tout se passe comme si la fusée était soumise à la somme vectorielle des forces extérieures \vec{F}_{ext} agissant sur elle et d'une force supplémentaire appelée force de poussée définie comme :

$$\vec{F} = -q_m \vec{v}_e$$

pour une fusée dont la tuyère est parfaitement adaptée, où q_m désigne le débit massique de gaz, c'est-à-dire la masse de gaz éjectée par seconde.

Ainsi

$$m(t)\vec{a}(t) = \vec{F}_{ext} + \vec{F}$$

$\vec{a}(t)$ désignant le vecteur accélération de la fusée dans R_g et $m(t)$, la masse de la fusée à l'instant t .

Document 4 : Impulsion spécifique d'un propergol

Un propergol est un mélange énergétique constitué par un ou plusieurs ergols, soit séparés soit réunis, apte à fournir, par réaction chimique de décomposition, l'énergie nécessaire à la propulsion d'un moteur-fusée. Les performances d'un ergol sont mesurées par leur impulsion spécifique I_{sp} , qui indique la durée pendant laquelle le moteur fournit une poussée égale au poids sur Terre des gaz éjectés. L'impulsion spécifique est ainsi directement reliée à la vitesse d'éjection des gaz d'une fusée :

$$I_{sp} = \frac{F}{q_m g} = \frac{v_e}{g}$$

- 4) Sur quel principe repose la propulsion du lanceur ?
- 5) Déterminer les quantités de matière de dioxygène et de dihydrogène contenues dans les deux réservoirs du premier étage.
- 6) Écrire l'équation modélisant la transformation chimique menant à la formation de vapeur d'eau au niveau du premier étage.
- 7) Déterminer la masse maximale de vapeur d'eau qui s'échappe pendant la durée de propulsion du premier étage.
- 8) En supposant que le débit massique de vapeur d'eau du premier étage est constant, montrer que sa valeur est $q_m = 1,97 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. En déduire la valeur de la poussée du premier étage.
- 9) Quelle est l'accélération initiale du lanceur si les deux boosters et le premier étage s'allument ensemble à l'instant $t = 0$? Commenter la valeur obtenue.

III. La phase de vol vertical

Ce lanceur de masse initiale m_0 (comprenant le propergol, la structure qui le contient et la charge utile à placer en orbite), de vitesse initiale v_0 , d'altitude initiale z_0 , a une tuyère parfaitement adaptée.

Pour simplifier, on suppose que les deux boosters consomment en premier la totalité de leurs propergols puis se détachent de la fusée. Le premier étage consomme alors à son tour son propergol et se détache. On s'intéresse à la première phase du mouvement, c'est-à-dire avant le détachement des boosters sauf à la question 17).

Durant cette première phase, à l'instant t , la masse du lanceur est $m(t)$ et sa vitesse $v(t)$. Les propulseurs d'appoint éjectent des gaz à la vitesse v_e supposée constante par rapport au lanceur.

On note dm_g la masse de gaz éjectés par le lanceur entre les instants t et $t + dt$ et on définit le débit massique

$$q_m = \frac{dm_g}{dt} = -\frac{dm}{dt}. \text{ On note } \delta = \frac{q_m}{m_0}.$$

Le débit massique est considéré comme constant. Une fois la totalité des gaz éjectés au bout de la durée T , le lanceur atteint sa vitesse finale v_f et sa masse est m_f et les boosters sont détachés.

On émet les hypothèses que le lanceur a un mouvement de translation verticale jusqu'au détachement des boosters, que les effets de l'air sur la fusée et la variation de l'intensité de la pesanteur g avec l'altitude sont négligeables.

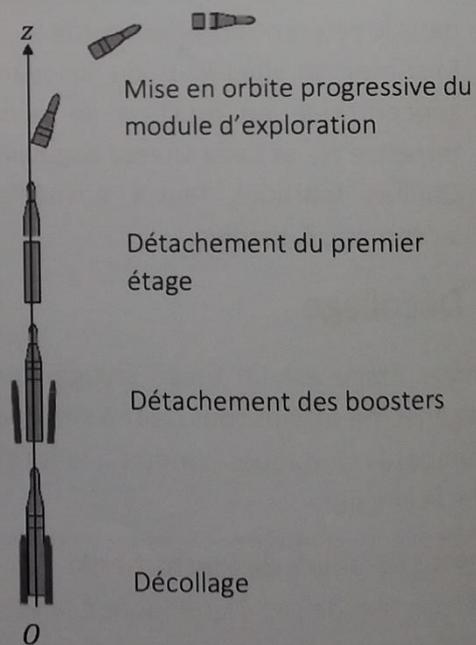


Figure 1 - Schéma de la mise en orbite autour de la Terre du module d'exploration

10) Exprimer la masse $m(t)$ en fonction de m_0 , δ et t .

L'équation de Tsiolkovski corrigée s'écrit :

$$v(t) = v_0 + v_e \ln\left(\frac{m_0}{m(t)}\right) - gt$$

11) Commenter l'expression de l'équation de Tsiolkovski corrigée.

12) Exprimer la vitesse de fin de propulsion v_f juste avant le détachement des boosters en fonction de g , T , v_e , m_0 et m_f .

13) Sur quels paramètres peut-on agir pour avoir la vitesse de fin de propulsion la plus élevée possible ?

En conséquence de l'équation de Tsiolkovski corrigée, on admet que l'altitude de la fusée peut se mettre sous la forme :

$$z(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0t + \frac{v_e}{\delta}\left(-\frac{m(t)}{m_0}\ln\left(\frac{m_0}{m(t)}\right) + \delta t\right) + z_0$$

avec z_0 l'altitude initiale de la fusée.

14) Déterminer la vitesse d'éjection v_e des gaz à la sortie d'un booster.

15) Déterminer les valeurs de la vitesse v_f et l'altitude h_f atteintes juste avant le détachement des boosters.

16) Quelles influences sur les valeurs de v_f et h_f les hypothèses formulées ont-elles ?

17) D'un point de vue qualitatif, quel est l'intérêt d'une fusée à plusieurs étages ?

IV. La mise en orbite du module d'exploration autour de la Terre

Document 5 : Énergie potentielle gravitationnelle terrestre d'un point matériel

Si l'on note r la distance du centre de la Terre à un point matériel de masse m , l'énergie potentielle gravitationnelle terrestre du point matériel s'écrit pour $r > R_T$: $E_p(r) = -\frac{GmM_T}{r}$ en prenant l'énergie potentielle nulle en un point infiniment éloigné.

Document 6 : Vitesse de libération d'un satellite

Pour se libérer de l'attraction terrestre, un satellite doit dépasser une vitesse minimale, appelée vitesse de libération de la Terre. Elle est définie comme la vitesse qui permet au satellite d'échapper à l'attraction terrestre et de parvenir en un point « infiniment » éloigné du centre de la Terre avec une vitesse nulle.

Document 7 : Ellipse

a : demi-grand axe ; b : demi-petit axe

A : apoastre ; P : périastre

F et F' : les foyers de l'ellipse

F : astre attracteur de masse m_F

$r_p = FP$; $r_a = FA$

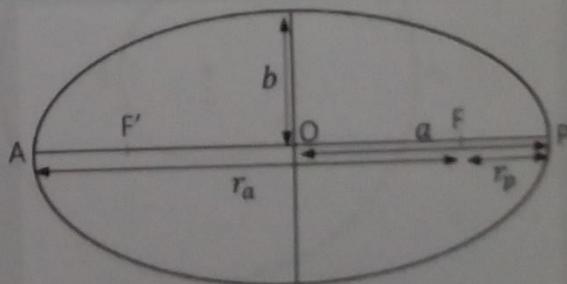
e : excentricité de l'ellipse telle que $e = \frac{r_a - r_p}{r_a + r_p}$

Pour $e = 0$, la trajectoire est un cercle.

Pour $0 < e < 1$, la trajectoire est une ellipse.

L'énergie mécanique d'un point matériel de masse m décrivant la trajectoire elliptique a pour expression :

$$E_m = -\frac{Gmm_F}{2a}$$



Pour préparer les missions habitées vers Mars, un premier vol d'essai non habité du module d'exploration a eu lieu. Ce module, placé en orbite circulaire à une altitude h de 5800 km autour de la Terre, pourra à terme accueillir jusqu'à quatre astronautes et effectuer des rendez-vous avec des modules de plus grande capacité, non encore développés, destinés à faire le trajet vers Mars.

- 18) Une fois le deuxième étage détaché, en négligeant tout frottement du milieu interstellaire et l'attraction des autres astres devant celle la Terre, on peut supposer que le module, de masse m_1 en orbite circulaire de rayon r autour de la Terre, est soumis à une force unique conservative. À quelle force est soumis le module ? Rappeler son expression et faire un schéma de la situation.
- 19) Comment peut être qualifiée l'accélération ? Donner l'expression du vecteur accélération du module dans le référentiel géocentrique.
- 20) En déduire l'expression de la vitesse v_1 du module d'exploration dans ce référentiel en fonction de G, M_T, R_T et h . Calculer sa valeur.

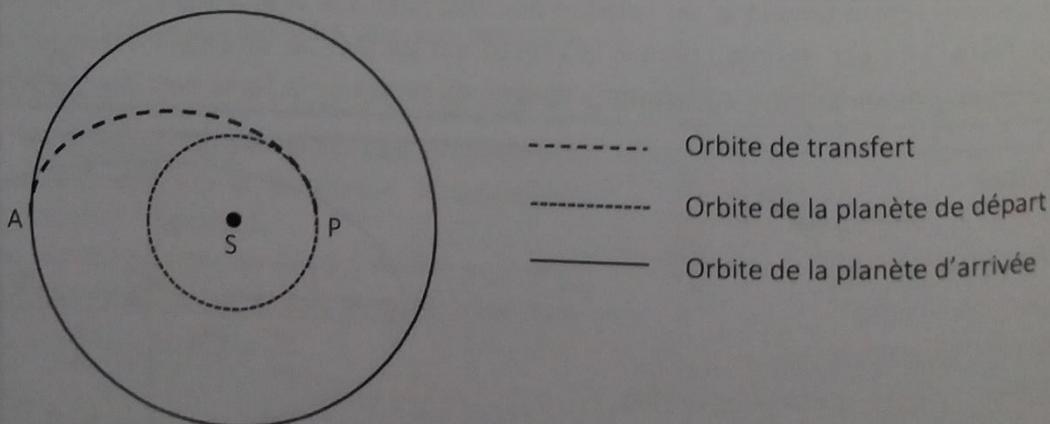
Une fois en orbite, le module d'exploration devra mettre en route d'autres moteurs pour se libérer de l'attraction terrestre et se satelliser autour de Mars.

- 21) Rappeler la définition de l'énergie mécanique d'un point matériel et en déduire la valeur de la vitesse de libération v_2 que devra atteindre le module depuis son orbite terrestre à l'altitude $h = 5800$ km pour échapper à l'attraction terrestre.

V. Orbite de transfert

Document 8 : Orbite de transfert

Walter Hohmann, architecte allemand, a effectué des calculs détaillés de trajectoires de module d'exploration reliant deux planètes d'orbites circulaires coplanaires. En utilisant uniquement deux manœuvres impulsives, il a montré que la trajectoire consommant le moins d'énergie possible était une orbite elliptique tangente aux deux orbites coplanaires. Pour ce faire, le module initialement en orbite autour de la première planète effectue une trajectoire elliptique, appelée orbite de transfert, dont le Soleil est un des foyers, jusqu'à se positionner sur une orbite coplanaire autour de la deuxième planète.



Lorsque le module passe par le périhélie P de l'orbite de transfert, les moteurs sont activés pour faire varier la vitesse du module et le faire passer de l'orbite circulaire de la planète de départ à l'orbite de transfert. Lorsque le module arrive à l'apogée A de l'orbite de transfert, les moteurs sont activés pour faire varier sa vitesse et le faire passer de l'orbite de transfert à l'orbite circulaire de la planète d'arrivée.

22) On ne prend en compte que l'attraction solaire sur le module. Le module décrit une trajectoire de Hohmann depuis la Terre jusqu'aux abords de Mars. Déterminer l'angle Terre-Soleil-Mars au moment de l'allumage des fusées du module lorsqu'il est encore en orbite autour de la Terre et le temps que mettra ce module pour parcourir la trajectoire de Hohmann.

Pour répondre à cette question, il appartient au candidat de modéliser la situation. Il est notamment attendu de sa part :

- *qu'il schématise la situation ;*
- *qu'il introduise les grandeurs pertinentes et qu'il associe à chacune d'elles une notation ;*
- *qu'il précise les lois physiques qu'il est amené à utiliser ainsi que les hypothèses et les approximations qu'il est amené à formuler ;*
- *que les calculs soient menés littéralement mais qu'ils aient pour but final d'obtenir une valeur numérique qui réponde à la question posée ;*
- *qu'il critique le résultat.*

PARTIE B - Vers des nouveaux propergols

Les ergols solides sont très utilisés dans les propulseurs d'appoint (boosters). Ils sont faciles à stocker et à manipuler. Toutefois, ils ne permettent pas un arrêt suivi d'un réallumage du moteur et ont une impulsion spécifique moyenne. De plus, la prise en compte de l'innocuité des substances chimiques est plus que jamais d'actualité, en particulier dans le domaine de la propulsion spatiale, eu égard aux forts tonnages mis en œuvre. L'un des ergols solides les plus utilisés est le perchlorate d'ammonium mais sa combustion génère des tonnes d'acide chlorhydrique.

Après la mise en orbite, les corrections de trajectoire s'effectuent au moyen d'une petite poussée par des moteurs embarqués. Cette petite poussée peut être assurée par la décomposition d'ergols liquides produisant des gaz à très haute température et à très forte pression. Actuellement, le monoergol le plus utilisé est l'hydrazine mais il tend à être remplacé.

I. Le nitrate d'hydroxylammonium HAN

Le laboratoire de recherche de l'US Air Force a mis au point un carburant dont le composant principal est le nitrate d'hydroxylammonium ou HAN (NH_3OH^+, NO_3^-). Le HAN est un composé ionique très énergétique. Il est très soluble dans l'eau. C'est un composé non toxique, non cancérigène, qui ne présente aucun risque d'auto-inflammation.

- 23) Quels avantages présentent les ergols solides ?
- 24) À quel phénomène peut contribuer la combustion d'un trop fort tonnage de perchlorate d'ammonium ?
- 25) Quelles propriétés de l'hydrazine peuvent justifier la volonté de son remplacement par d'autres espèces chimiques ?
- 26) Citer les deux types d'interactions assurant la cohésion du HAN.
- 27) Proposer une interprétation de la grande solubilité du HAN dans l'eau.
- 28) Pour un test en laboratoire, le HAN est préparé par réaction acide - base entre l'hydroxylamine NH_2OH et l'acide nitrique HNO_3 . Pour cela une masse de 30,28 g d'une solution aqueuse d'hydroxylamine à 50 % en masse est agitée et maintenue à une température inférieure à 4 °C à l'aide d'un bain de glace. L'acide nitrique à 65 % en masse, de masse volumique $1,40 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$, est ajouté goutte à goutte à l'aide d'une burette graduée. Quel volume d'acide nitrique doit être versé pour réaliser ce mélange en conditions stœchiométriques ? Pourquoi l'addition est-elle réalisée goutte à goutte et à basse température ?

II. L'azoture d'ammonium AA

(d'après une adaptation de la thèse de Kamal Farhat)

La fabrication d'un propergol HAN-AA-eau associant un mélange de nitrate d'hydroxylammonium, d'azoture d'ammonium (NH_4^+, N_3^-) et d'eau a été étudiée en laboratoire.

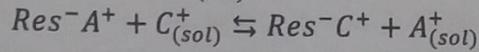
- 29) Quel intérêt l'association des deux propergols HAN et AA présente-t-elle ?
- 30) Quel avantage présente leur forte solubilité dans l'eau ?

1. Première méthode de préparation

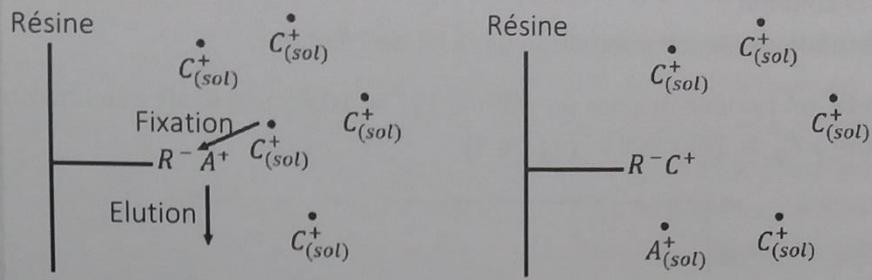
Pour fabriquer une solution d'azoture d'ammonium AA, la première méthode de préparation fait appel à une colonne de résine échangeuse de cations.

Document 9 : Résine échangeuse d'ions

Une résine échangeuse d'ions est un matériau insoluble qui contient des groupements chargés fixes et des contre-ions mobiles. Ces ions peuvent être échangés de façon réversible contre des ions portant la même charge présents dans la solution à traiter. Soit le système constitué d'une résine échangeuse de cations. L'équation de la réaction d'échange entre le contre-ion mobile A^+ de la résine Res^-A^+ contenant des groupements chargés fixes notés R^- et le cation $C^+_{(sol)}$ de la solution à traiter s'écrit :



et peut se schématiser ainsi :



Le coefficient de rétention k_r d'une résine est donné par :

$$k_r = \frac{n(C^+)_{res}}{n(C^+)_{sol}}$$

où $n(C^+)_{res}$ et $n(C^+)_{sol}$ désignent les quantités de matière du cation C^+ respectivement dans la résine après élution et dans la solution avant élution.

(d'après Samir Kenouche du département des Sciences de la matière l'université M. Khider de Biskra)

On prépare une colonne de résine, de telle sorte que les contre-ions mobiles portés par la résine soient les cations ammonium NH_4^+ et que leur quantité de matière soit très largement supérieure à celles des cations sodium versés et échangés sur la résine. On rince la résine avec de l'eau pure jusqu'à ce que le pH de l'éluat soit égal à celui de l'eau pure. On verse alors très lentement 15,0 mL d'une solution d'azoture de sodium dans la colonne de résine et on place un bécher vide sous la colonne pour y recueillir l'éluat. On laisse s'écouler lentement la solution jusqu'à ce qu'elle affleure la résine puis on poursuit par l'ajout d'eau pure en quantité suffisante. Le pH de l'éluat est mesuré pendant toute l'élution (figure 2b)). La manipulation est réalisée à 25°C.

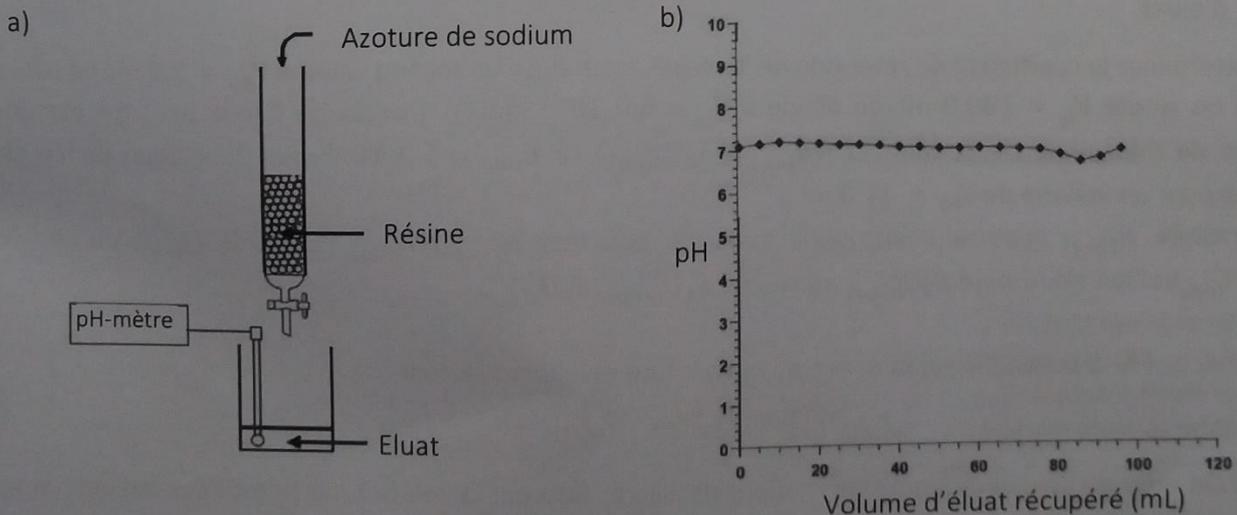


Figure 2 – Passage de la solution d'azoture de sodium sur la résine échangeuse d'ions (figure a) et suivi du pH de l'éluat (figure b))

- 31) Écrire l'équation de la réaction d'échange d'ions qui s'opère sur la résine.
- 32) Définir la constante d'acidité K_A d'un couple acide/base $AH_{(aq)}/A^-_{(aq)}$. En déduire le lien entre pH et $pK_A = -\log K_A$.
- 33) On considère un mélange stœchiométrique de deux solutions, l'une contenant des ions ammonium et l'autre des ions azoture. Écrire l'équation de la réaction acide - base se produisant.
- 34) Déterminer le pH d'une solution issue de ce mélange.
- 35) Proposer une interprétation à l'évolution du pH de l'éluat.
- 36) Peut-on utiliser le suivi du pH de l'éluat pour déterminer la fin de l'éluat de la solution d'azoture de sodium dans la colonne ?
- 37) Proposer une méthode de détermination de la fin de l'éluat.

Après éluat complète, on prélève ensuite un volume $V_{A1} = 10,0$ mL d'éluat que l'on titre par une solution d'hydroxyde de sodium à $C_B = 1,00$ mol.L⁻¹ (figure 3).

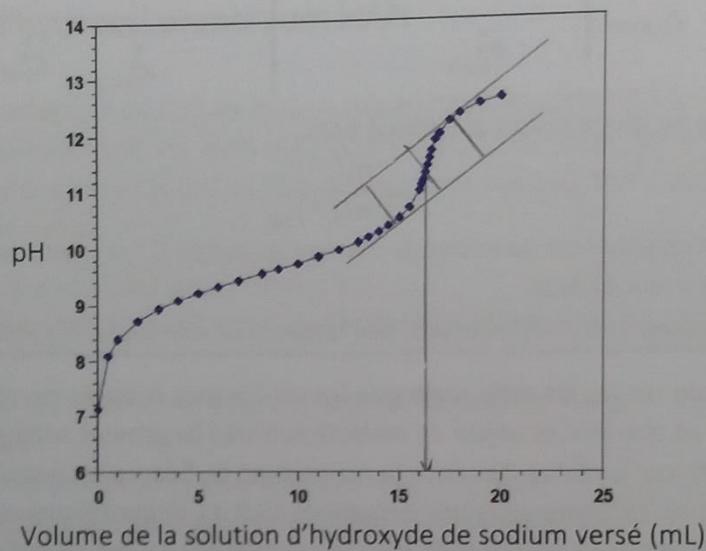


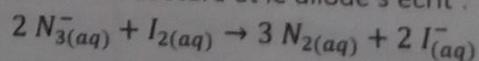
Figure 3 – Titrage de 10,0 mL d'éluat par une solution d'hydroxyde de sodium à $C_B = 1,00$ mol.L⁻¹

- 38) Déterminer la quantité de matière n_1 d'ions ammonium NH_4^+ présents dans les $V_{A1} = 10,0$ mL d'éluat.

Pour déterminer le coefficient de rétention de la résine, on prélève un second volume $V_{A2} = 2,0$ mL de l'éluat auquel on ajoute $V_{I_2} = 100,0$ mL de diiode à $C_{I_2} = 5,0 \cdot 10^{-2}$ mol.L⁻¹. L'excès de diiode est titré par une solution de thiosulfate de sodium ($2 Na^+_{(aq)} + S_2O_3^{2-}_{(aq)}$) à $C_{thio} = 5,0 \cdot 10^{-1}$ mol.L⁻¹. L'équivalence est repérée pour un volume de $V_{eq} = 11,0$ mL.

L'ion azoture $N_3^-_{(aq)}$ appartient au couple oxydant/réducteur $N_2(aq)/N_3^-_{(aq)}$, le diiode $I_2(aq)$, au couple $I_2(aq)/I^-_{(aq)}$ et l'ion thiosulfate $S_2O_3^{2-}_{(aq)}$ au couple $S_4O_6^{2-}_{(aq)}/S_2O_3^{2-}_{(aq)}$.

On admet que la réaction d'oxydation entre l'ion azoture et le diiode s'écrit :



- 39) On note $n_{I_2,excès}$ la quantité de matière de diiode titré par la solution de thiosulfate de sodium et n_{0,N_3^-} , la quantité de matière d'ions azoture présents initialement dans les $V_{A2} = 2,0$ mL de l'éluat. Exprimer $n_{I_2,excès}$ en fonction de n_{0,N_3^-} et des données de l'énoncé.
- 40) Écrire la réaction d'oxydoréduction entre le diiode et l'ion thiosulfate.

41) En déduire une autre expression de $n_{I_2,excès}$.

42) Déterminer alors la quantité de matière d'ions azoture présents dans un volume de 10,0 mL d'éluat.

43) En déduire le coefficient de rétention k_r de la résine. Commenter.

2. Seconde méthode de préparation

L'azoture d'ammonium peut être également préparé à l'état solide par barbotage d'ammoniac dans une solution étherée d'acide hydrazoïque HN_3 . Les cinq étapes associées sont les suivantes :

- étape 1 : 4,46 g d'azoture de sodium et 25 mL d'eau sont introduits dans un ballon ;
- étape 2 : on ajoute 25 mL d'éther ;
- étape 3 : 5 mL d'acide sulfurique concentré $H_2SO_{4(l)}$ sont ajoutés très lentement ;
- étape 4 : le mélange réactionnel est ensuite chauffé à 40 °C pendant 30 minutes. L'acide hydrazoïque est récupéré dans un erlenmeyer contenant de l'éther placé dans un bain d'eau glacé (figure 4) ;
- étape 5 : une solution aqueuse d'ammoniac est chauffée à l'aide d'un chauffe-ballon pour créer des vapeurs d'ammoniac que l'on fait barboter dans de l'acide hydrazoïque étheré placé dans un bain d'eau glacé (figure 5). Après filtration et séchage, une masse de 3,21 g de précipité blanc est obtenue.

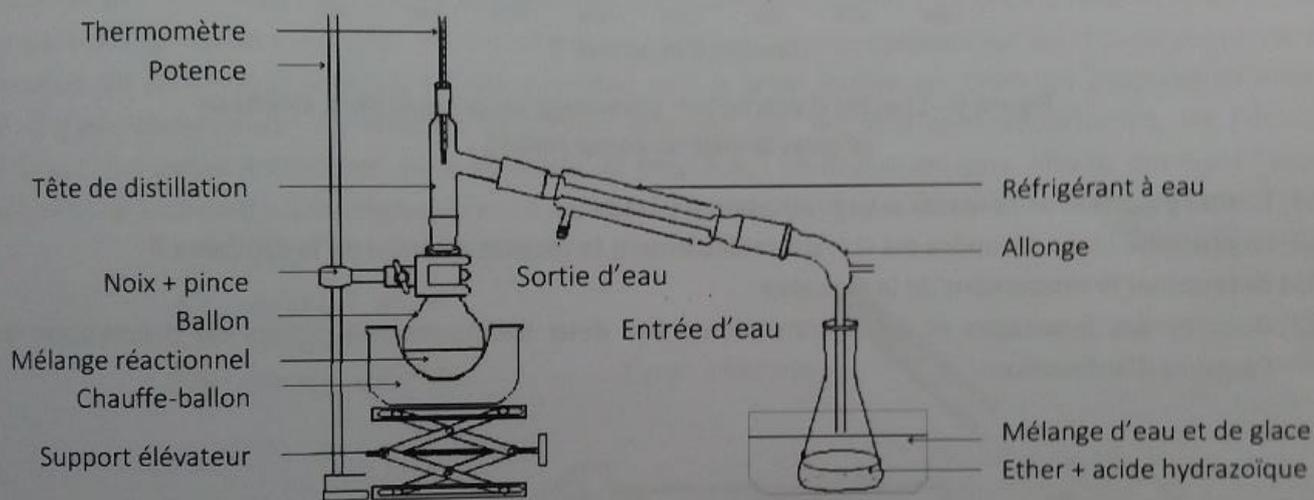


Figure 4 – Schéma du montage de l'étape 4

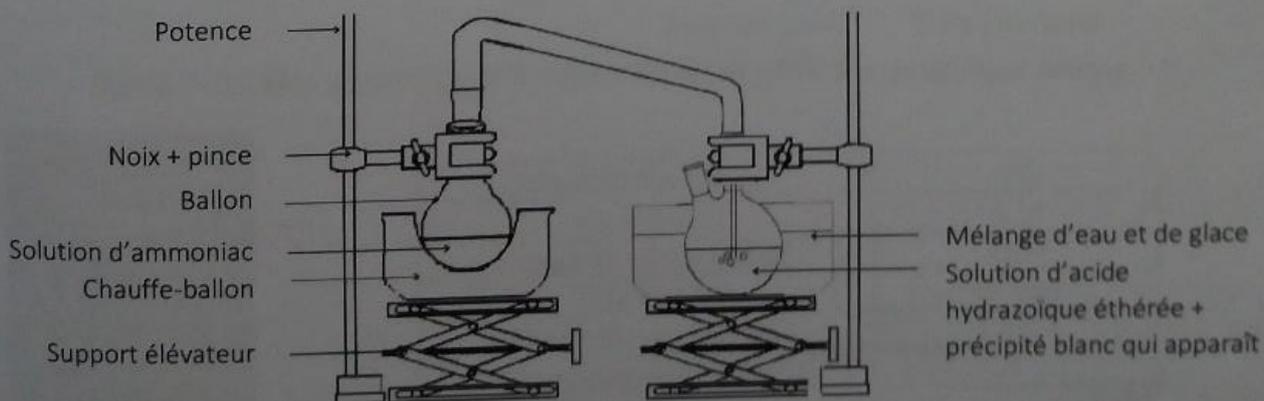


Figure 5 – Schéma du montage de l'étape 5

44) Quelles précautions l'expérimentateur doit-il prendre au cours de ces étapes de fabrication ?

- 45) Écrire l'équation de mise en solution de l'azoture de sodium (étape 1).
 46) Écrire l'équation de la réaction correspondant à l'étape 3. Justifier.
 47) Comment se nomme l'opération réalisée à l'étape 4 ?
 48) Quelle est l'utilité du bain d'eau glacée ?

L'analyse spectroscopique dans l'infrarouge du précipité blanc récupéré a été effectuée (figure 6).

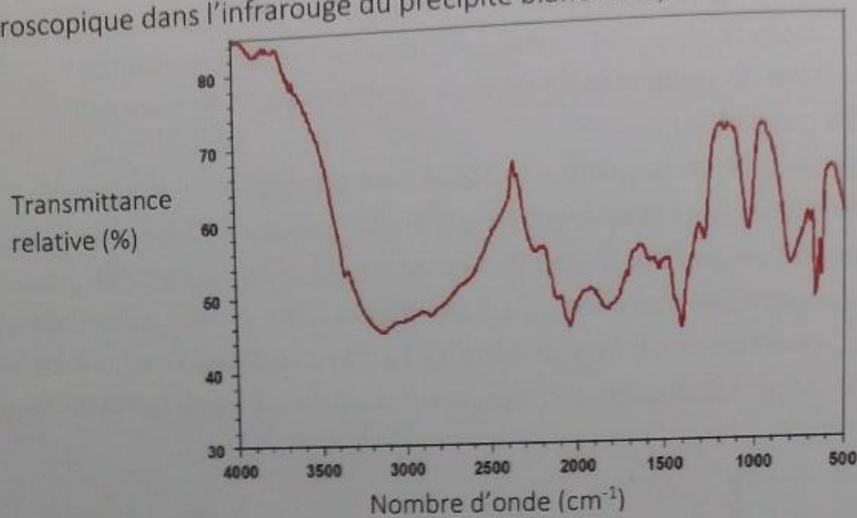


Figure 6 - Spectre d'absorption infrarouge du produit de la synthèse
 (d'après la thèse de Kamal Farhat)

- 49) Écrire l'équation de la réaction se produisant à l'étape 5.
 50) Le précipité blanc récupéré est-il vraisemblablement le produit attendu de la synthèse ?
 51) Déterminer le rendement de la synthèse.
 52) Discuter des avantages et des inconvénients des deux méthodes présentées de préparation de l'azoture d'ammonium.

PARTIE C - Propulsion électrique

Dans un satellite à propulsion utilisant des ergols, le dispositif de propulsion (ergols, réservoirs, tuyauterie, vannes, pompes,...) représente environ 55 % de la masse totale du satellite. Une méthode alternative à la propulsion chimique dans l'espace est la propulsion électrique. Les propulseurs électriques sont moins encombrants que les propulseurs chimiques. Deux types de propulseurs sont utilisés aujourd'hui : les propulseurs ioniques et les propulseurs à effet Hall.

Ces deux propulseurs fonctionnent grâce à l'ionisation d'un gaz. Les ions produits au sein de ce moteur sont accélérés puis neutralisés en sortie de moteur.

I. Propulseur ionique

Les propulseurs ioniques sont constitués d'une chambre où sont lentement injectés des atomes de xénon (figure 7). Ces derniers, bombardés électroniquement, sont ionisés. Les ions sont alors accélérés électriquement entre deux grilles percées de milliers de trous, l'une chargée positivement et l'autre négativement. Entre ces deux grilles, les électrons et les ions sont soumis à un champ électrique qui repousse les électrons et accélère les ions. La grille intérieure n'exerce aucune répulsion sur les ions car les parois de la chambre du propulseur sont au même potentiel que la grille intérieure. Dans les propulseurs ioniques développés récemment, les vitesses d'éjection atteintes par les ions sont importantes, de l'ordre de 30 km.s^{-1} . Un canon à électrons situé en sortie de propulseur neutralise les ions. Afin de diminuer l'érosion des grilles qui conduit à une dégradation de leur performance, des grilles en carbone sont à l'étude.

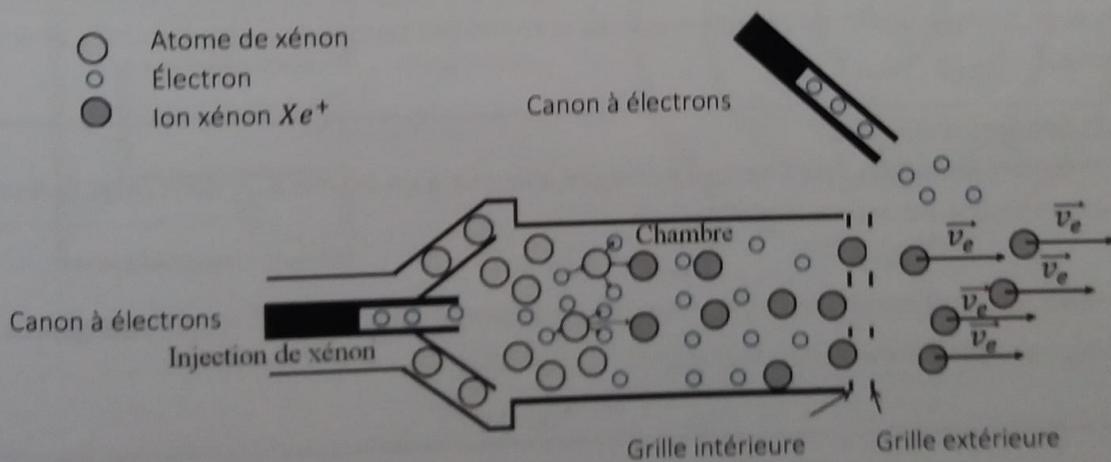


Figure 7 - Schéma du principe de fonctionnement simplifié d'un propulseur ionique



Figure 8 – Photographie d'un propulseur ionique développé par les laboratoires de recherche Hughes

| | |
|--|---------|
| Puissance injectée (W) | 450 |
| Poussée (N) | 0,18 |
| Impulsion spécifique (s) | 2800 |
| Efficacité (%) | 50 à 60 |
| Durée de vie (heures) | 12000 |
| Débit massique de xénon (mg.s^{-1}) | 5 |

Tableau 1 – Caractéristiques du propulseur ionique

- 53) Comparativement à la propulsion chimique assurée par l'éjection de gaz, comment est assurée la propulsion ionique ?
- 54) Quels avantages présente la propulsion ionique par rapport à la propulsion chimique ?
- 55) Pourquoi la propulsion ionique n'est-elle pas utilisée pour le décollage d'une fusée ?
- 56) Des deux grilles accélératrices, préciser quelle grille est chargée positivement. Justifier.

Document 10 : Énergie potentielle électrostatique

On note V_p le potentiel de la grille chargée positivement et V_N le potentiel de la grille chargée négativement. Lorsqu'une particule de charge q est plongée dans un champ électrique uniforme \vec{E} , elle est soumise à une force conservative à laquelle est associée une énergie potentielle électrique :

$$E_{pe}(M) = qV_M \quad \left| \begin{array}{l} E_{pe}(M) \text{ en J} \\ V_M \text{ en V} \\ q \text{ en C} \end{array} \right.$$

où V_M désigne le potentiel électrostatique qui règne au point M.

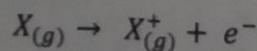
- 57) Quelle différence de potentiel $\Delta V = V_p - V_N$ doit être appliquée entre les deux grilles pour que les ions $Xe_{(g)}^+$ de vitesse négligeable à l'entrée de ces grilles aient une vitesse avoisinant les 30 km.s^{-1} en sortie de ces grilles ? Effectuer l'application numérique.
- 58) Quel est le rôle du canon à électrons situé à l'extérieur de la chambre ?

II. Le choix du xénon

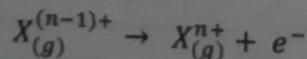
Les premiers tests effectués par les États-Unis et l'URSS dans les années 1970 sur les propulseurs ioniques ont été effectués avec du mercure et du césium, mais ces derniers ont tendance à être corrosifs pour certaines parties du moteur.

Document 11 : Énergies d'ionisation

L'énergie de première ionisation est l'énergie nécessaire à fournir à un atome $X_{(g)}$ dans l'état gazeux pour lui arracher un électron. Elle est associée à la réaction :



L'énergie de nième ionisation est l'énergie nécessaire à fournir à l'ion $X_{(g)}^{(n-1)+}$ dans l'état gazeux pour lui arracher un électron. Elle est associée à la réaction :



| Élément chimique X | Numéro atomique | Masse atomique (g.mol ⁻¹) | Charge massique de l'ion X^+ ($\frac{e}{m(X^+)}$) (10 ⁵ C.kg ⁻¹) | Énergie de première ionisation (eV) | Énergie de deuxième ionisation (eV) |
|--------------------|-----------------|---------------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Césium (Cs) | 55 | 132,9 | 7,25 | 3,89 | 25,10 |
| Mercure (Hg) | 80 | 200,6 | 4,80 | 10,44 | 18,75 |
| Argon (Ar) | 18 | 39,95 | 24,13 | 15,80 | 22,63 |
| Krypton (Kr) | 36 | 83,80 | 11,50 | 14,00 | 24,36 |
| Xénon (Xe) | 54 | 131,3 | 7,34 | 12,13 | 21,21 |

Tableau 2 - Tableau comparatif des caractéristiques de différents éléments candidats à la propulsion ionique

$m(X^+)$: masse de l'ion X^+

- 59) En quoi la masse atomique est-elle une caractéristique importante dans le choix d'un élément dans un moteur ionique à éjection ?

- 60) Quel autre paramètre peut-on modifier pour augmenter la norme de la force de poussée F ? Comment la charge massique de l'ion X^+ formé influence-t-elle ce paramètre ?
- 61) Justifier l'emploi du xénon dans un moteur ionique parmi les cinq éléments proposés.

III. Propulseur à effet Hall

Dans un propulseur à effet Hall, on injecte des atomes de xénon dans une chambre cylindrique de diamètre 10 cm. Les électrons sont émis par un canon à électrons situé hors de cette chambre. Une partie de ces électrons est attirée vers l'anode située au fond de la chambre. En chemin, ils sont soumis à un champ magnétique radial qui permet de les confiner à la sortie de la chambre, là où le champ magnétique est le plus important.

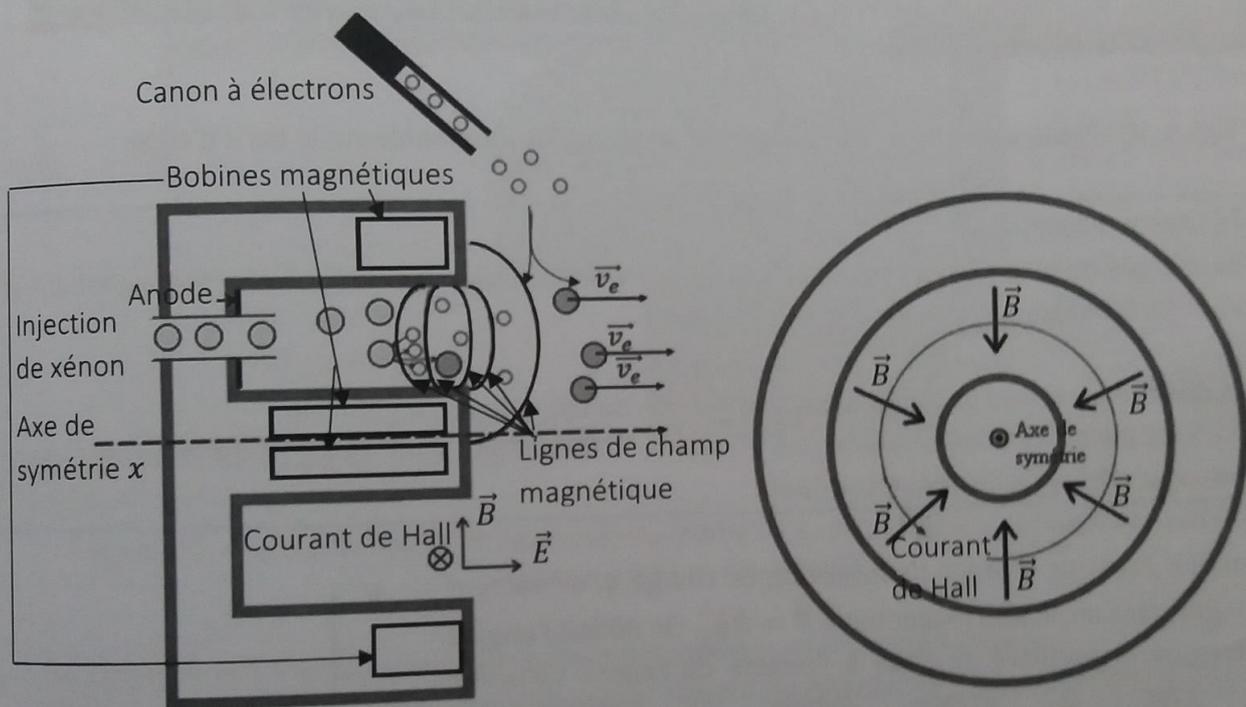


Figure 9 - Schéma du principe de fonctionnement simplifié d'un propulseur à effet Hall (vue de profil - vue de face)

Ce confinement permet l'existence d'un champ électrique intense à la sortie de la chambre, champ dirigé suivant l'axe de symétrie x du propulseur. La combinaison de ce champ électrique axial et du champ magnétique essentiellement radial conduit les électrons à se déplacer autour de l'axe de symétrie et engendre un fort courant de quelques dizaines d'ampère, dit courant de Hall. Les ions sont alors générés par collisions entre les atomes de xénon et les électrons du courant de Hall. Ils sont ensuite accélérés par le champ électrique. Le mécanisme d'ionisation est plus efficace que pour un propulseur ionique à grilles mais le jet d'ions xénon a une plus forte divergence qu'avec le propulseur ionique à grilles. L'autre partie des électrons émis par le canon à électrons sert majoritairement à neutraliser le faisceau d'ions qui sort du propulseur.

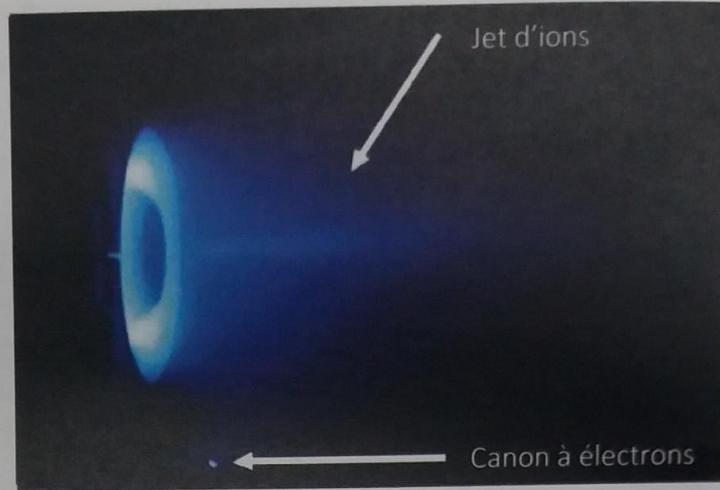


Figure 10 - Photo d'un propulseur à effet Hall et jet d'ions observable sur le banc d'essai

Document 12 : Force magnétique

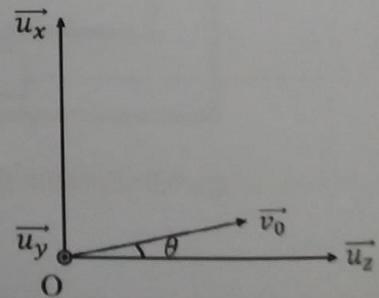
Une particule chargée de masse m , de charge q , de vecteur vitesse \vec{v} , plongée dans un champ magnétique \vec{B} est soumise à la force magnétique :

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

Le symbole \wedge désigne le produit vectoriel, dont l'explication du calcul figure en annexe.

Cette force, orthogonale à la vitesse, fournit une puissance nulle à la particule. La particule, soumise à cette force, garde donc une énergie cinétique constante.

On considère une particule chargée de masse m , de charge q , de vecteur vitesse \vec{v} plongée dans un champ magnétique $\vec{B} = B\vec{u}_z$. On définit l'origine des temps lorsque la particule se situe à l'origine du repère cartésien $(O; x, y, z)$ avec la vitesse initiale \vec{v}_0 telle que $\vec{v}_0 = v_0 \sin \theta \vec{u}_x + v_0 \cos \theta \vec{u}_z$ et $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$.



62) À l'aide de la deuxième loi de Newton et en négligeant le poids de la particule, établir les expressions des trois composantes de l'accélération en coordonnées cartésiennes en fonction notamment des composantes de la vitesse.

63) Quelle est la nature du mouvement suivant l'axe (O, \vec{u}_z) ?

On admet que :

$$x(t) = \frac{v_0 \sin \theta}{\omega_c} \sin(\omega_c t)$$

$$y(t) = \frac{v_0 \sin \theta}{\frac{qB}{m}} (\cos(\omega_c t) - 1)$$

avec $\omega_c = \frac{|q|B}{m} > 0$ appelée pulsation cyclotron.

64) Montrer que ω_c est homogène à une pulsation.

- 65) Montrer que la norme de la vitesse de la particule est v_0 à chaque instant. Interpréter.
- 66) Justifier que la trajectoire de la particule autour d'une ligne de champ magnétique est une hélice de rayon $R = \frac{v_0 \sin \theta}{\omega_c}$ et de pas $h = v_0 \frac{2\pi}{\omega_c} \cos \theta$. Tracer l'allure de la trajectoire.
- 67) Quelle est l'influence d'une augmentation de la valeur du champ magnétique sur le rayon et le pas de l'hélice ?

La figure ci-dessous illustre la topologie magnétique d'un propulseur à effet Hall. Les lignes de champ magnétique en sortie de propulseur sont quasi radiales.

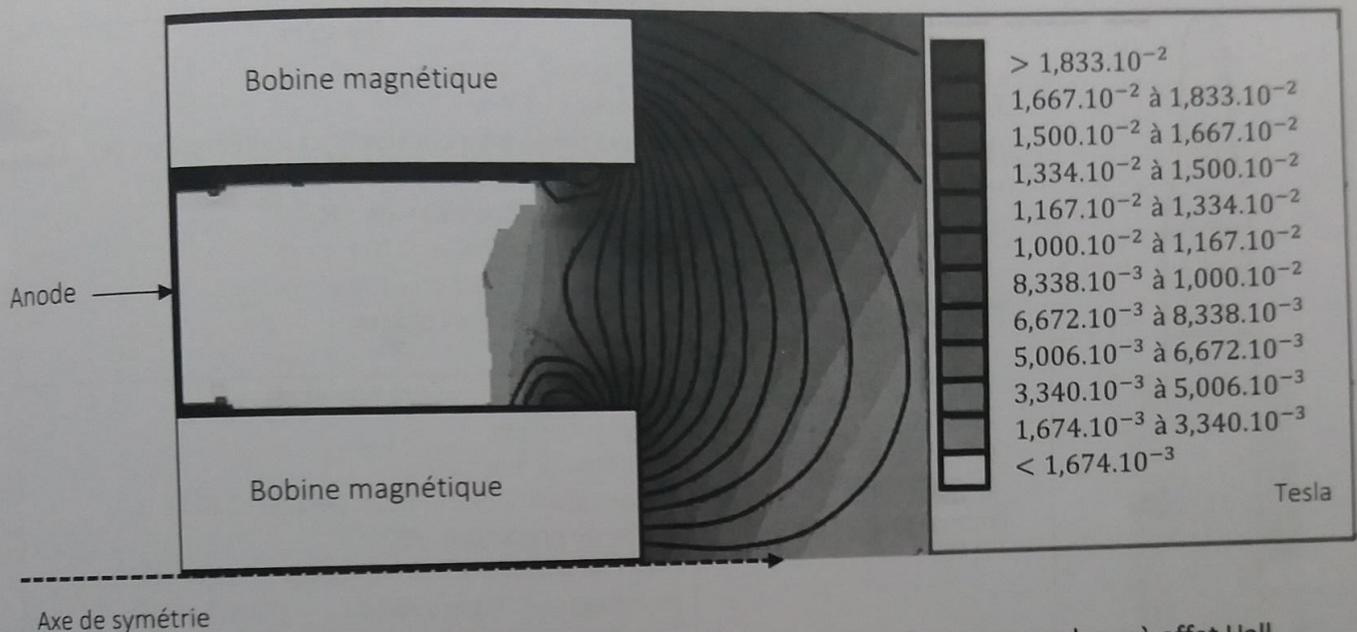


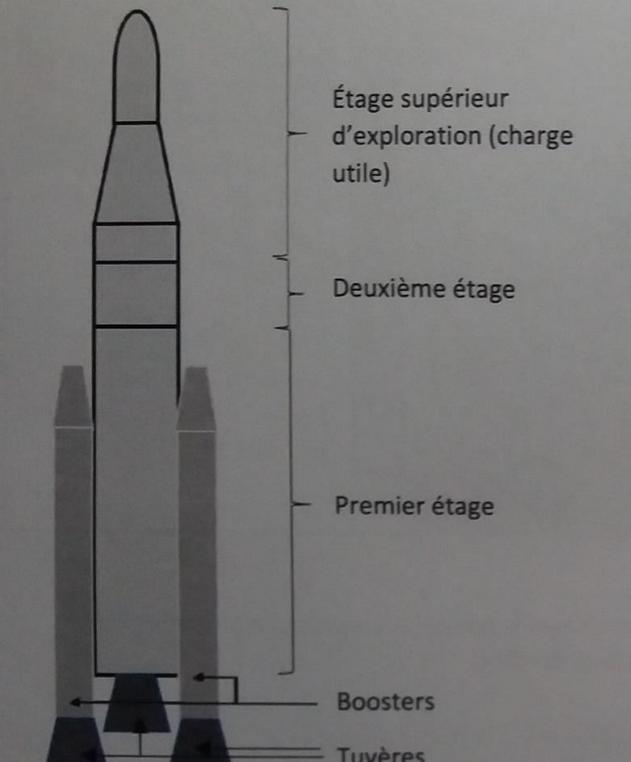
Figure 11 – Lignes de champ et intensités du champ magnétique dans un propulseur à effet Hall
(d'après la thèse de Claude Boniface)

- 68) Dans quelle zone du propulseur le champ magnétique est-il le plus intense ?
- 69) À l'aide du tableau 2 page 174, déterminer l'ordre de grandeur de l'énergie cinétique d'un électron nécessaire pour ioniser un atome de xénon gazeux en ion xénon $Xe_{(g)}^+$. Donner une estimation du rayon et du pas de l'hélice qu'aurait un tel électron pour un angle d'incidence $\theta = 45^\circ$ dans la zone où le champ magnétique est le plus intense.
- 70) Déterminer l'ordre de grandeur du rayon R_{Xe^+} pour un ion $Xe_{(g)}^+$ dont la vitesse avoisinerait les 30 km.s^{-1} ? Commenter.
- 71) Citer un avantage d'un propulseur à effet Hall par rapport à un propulseur ionique.
- 72) En quoi la plus forte divergence du jet est-elle un inconvénient ?

PARTIE D – Annexes

Caractéristiques techniques du Space Launch System

(d'après le site Rocket and Space technology, Robert A. Braeunig)

| | |
|---|---|
|  | Générales |
| | Longueur : 98 m Nombre d'étages : 2 Masse au lancement : 2700 t Charge utile : 70000 kg |
| | Boosters |
| | Nombre : 2 Diamètre : 3,7 m Masse totale d'un booster (incluant l'ergol solide) : 730 t Masse d'ergol solide dans un booster : 630 t Masse d'un booster à vide : 100 t Impulsion spécifique : 270 s Temps de combustion : 130 s Poussée : 16 000 kN chacun |
| | Premier étage |
| Longueur : 65 m Diamètre : 8,4 m Masse totale (incluant le propergol) : 1100 t Masse de propergol : 980 t (840 t de dioxygène et 140 t de dihydrogène) Impulsion spécifique : 360 s Temps de combustion : 480 s | |
| Deuxième étage | |
| Longueur : 14 m Diamètre : 5,0 m Masse totale (incluant le propergol) : 31 t Masse de propergol : 27 t Impulsion spécifique : 460 s Temps de combustion : 1100 s Poussée : 110 kN | |

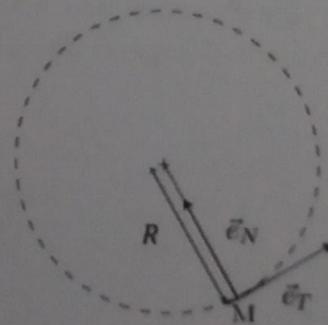
Accélération du point matériel en repère de Frenet

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt} \vec{e}_t + \frac{v^2}{R} \vec{e}_N$$

\vec{e}_N et \vec{e}_t sont deux vecteurs unitaires qui forment la base de Frenet.

\vec{e}_t est le vecteur unitaire tangent à la trajectoire, orienté selon le sens du mouvement de M ($\vec{v} = v\vec{e}_t$ où \vec{v} désigne le vecteur vitesse du point matériel dans le référentiel d'étude).

\vec{e}_N s'obtient en tournant de $\frac{\pi}{2}$ vers l'intérieur de la concavité.



Trajectoire du point M

Impulsions spécifiques de quelques ergols

| Ergols | ISP (s) |
|---|---------|
| Hydrazine | 224 |
| HAN | 227 |
| AA | 215 |
| HAN + AA + eau (mélange stœchiométrique avec 20 % d'eau en masse) | 342 |
| HAN + AA + eau (mélange stœchiométrique avec 40 % d'eau en masse) | 303 |
| HAN + AA + eau (mélange stœchiométrique avec 60 % d'eau en masse) | 216 |

(d'après la thèse de Kamal Farhat)

Données numériques physiques

Constante de gravitation universelle : $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

Masse de la Terre : $M_T = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

Rayon de la Terre : $R_T = 6370 \text{ km}$

Jour sidéral : $T_T = 23 \text{ h } 56 \text{ min } 4 \text{ s}$

Jour solaire : $T = 24 \text{ h}$

Excentricité orbitale de la Terre : $e_T = 0,0167$

Distance moyenne Terre - Soleil $d_{TS} = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$

Masse de Mars : $M_M = 6,39 \cdot 10^{23} \text{ kg}$

Rayon de Mars : $R_M = 3390 \text{ km}$

Excentricité orbitale de Mars : $e_M = 0,0934$

Distance moyenne Mars - Soleil $d_{MS} = 228 \cdot 10^6 \text{ km}$

Masse du Soleil : $M_S = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

Angle entre les plans d'orbite de la Terre et de Mars : $\alpha = 1,85^\circ$

Charge élémentaire : $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Masse de l'électron : $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Constante d'Avogadro : $N_a = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Intensité de la pesanteur sur Terre : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Un électron-volt : $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Données chimiques

Produit ionique de l'eau à 25°C : $K_e = 10^{-14}$

Constantes d'acidité à 25°C : $K_{A1}(\text{NH}_4^+/\text{NH}_3(\text{aq})) = 9,2$

$K_{A2}(\text{HN}_3(\text{aq})/\text{N}_3^-(\text{aq})) = 4,7$

pH d'une eau pure à 25°C : $\text{pH} = 7,0$

Masses molaires atomiques

| Élément | H | C | N | O | Na | Xe |
|---|-----|------|------|------|------|-------|
| Masse molaire atomique ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) | 1,0 | 12,0 | 14,0 | 16,0 | 23,0 | 131,2 |

Test de mise en évidence d'ions

| | | |
|------------------------------|--------------|---|
| Ion ammonium NH_4^+ | Par la soude | Dégagement de vapeur blanche d'ammoniac / papier imbibé de sulfate de cuivre anhydre qui bleuit |
| Ion sodium Na^+ | | Fil de fer trempé dans la solution contenant Na^+ dans la flamme bleue d'un bec Bunsen. La flamme devient jaune. |

Informations diverses sur les composés chimiques rencontrés

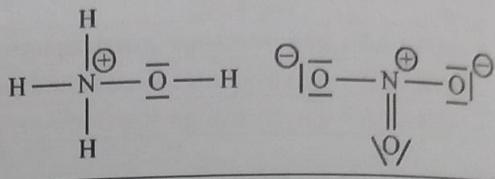
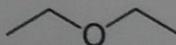
| | |
|---|--|
| <p>Hydrazine (Source : CNESST) Formule moléculaire brute : N_2H_4 Masse molaire moléculaire : $32,05 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ Masse volumique : $1,0011 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ Apparence : liquide fumant et huileux, incolore à odeur d'ammoniac Risques :</p>  | <p>Nitrate d'hydroxylammonium</p>  <p>Ammoniac À température et pression ambiante, c'est un gaz incolore à odeur piquante. Il est suffocant à haute concentration.</p> |
| <p>Éther Liquide incolore très volatile de température d'ébullition égale à $34,6^\circ\text{C}$ à pression atmosphérique et de température de fusion de -16°C, de formule topologique :</p>  | <p>Acide sulfurique C'est un acide fort. Il se présente sous la forme d'un liquide huileux corrosif. Une solution d'acide sulfurique concentré a un point d'ébullition proche de 339°C.</p> |
| <p>Acide hydrazoïque C'est un acide faible de température d'ébullition égale à $35,7^\circ\text{C}$ à pression atmosphérique. C'est un produit toxique et explosif. Il est facilement inflammable suite à un choc, par friction ou chauffé modérément.</p> | <p>Azoture de sodium C'est un solide blanc cristallin qui se décompose à la chaleur. Chauffé rapidement, il peut causer une explosion.</p> <p>Azoture d'ammonium C'est un solide blanc cristallin explosif dont l'inhalation peut provoquer des troubles de l'organisme.</p> |

Table réduite des nombres d'onde en spectroscopie d'absorption infrarouge de l'ion ammonium dans l'azoture d'ammonium

| Nombres d'onde (cm^{-1}) | | | |
|-------------------------------------|------|------|------|
| 1403 | 1810 | 2846 | 3130 |

(d'après University Chemical Laboratory, Cambridge, June 1958)

Formulaire mathématique

- Soient p et q deux réels strictement positifs : $\log(p \times q) = \log p + \log q$
- Norme d'un vecteur :**
 Soit \vec{a} un vecteur quelconque tel que $\vec{a} = a_x \vec{u}_x + a_y \vec{u}_y + a_z \vec{u}_z$ dans les coordonnées cartésiennes.
 La norme du vecteur \vec{a} est $\|\vec{a}\| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$.
- Produit vectoriel :**

$$\vec{c} = \vec{a} \wedge \vec{b} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_y b_z - a_z b_y \\ a_z b_x - a_x b_z \\ a_x b_y - a_y b_x \end{bmatrix}$$

- Équation d'un cercle de rayon R et de centre (x_0, y_0) :**
 $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$

