

CONCOURS GENERAL DES LYCEES

SESSION 2018

TERMINALE S

PHYSIQUE-CHIMIE

RAPPORT DU JURY

Sommaire

1. Composition du jury de la session 2018.....	3
2. Statistiques pour la session 2018.....	4
3. Commentaires sur l'épreuve écrite.....	6
4. Annexes : sujet et corrigé.....	8

1. Composition du jury de la session 2018

OBERT Dominique, président, IGEN

SZYMCZAK Anne, vice-présidente, IGEN

BROMONT Valérie, professeure agrégée, académie de Paris

CARNIS Aurélie, professeure agrégée, académie de Versailles

DEBLIECK Clément, professeur agrégé, académie de Lille

FAYON Karine, professeure agrégée, académie de Créteil

FINET Audrey, professeure agrégée, académie de Versailles

FREULON Vincent, professeur agrégé, académie de Versailles

JAMONNEAU Pierre, professeur agrégé, académie de Nantes

MARCHAND Patricia, professeure agrégée, académie de Créteil

PEHLATE Christophe, professeur agrégé, académie de Versailles

SCHMITT Aline, professeure agrégée, académie de Lille

VAN BRACKEL Emmanuel, professeur agrégé, académie de Nantes

2. Statistiques pour la session 2018

Cette année 2164 candidats ont composé, contre 2301 inscrits, ce qui montre que l'engagement fort et la motivation des élèves ayant décidé de préparer le concours général ne faiblit pas entre la période d'inscription (fin du premier trimestre) et le concours (mi-mars, fin du second trimestre). Après une forte augmentation au cours de ces dernières années, le nombre de candidats ayant composé se stabilise puisqu'en 2017, 2220 candidats avaient composé contre 1951 candidats en 2016.

Les 2301 candidats inscrits au concours général de physique-chimie pour la session 2018 se répartissent de la manière suivante selon leur genre et leur origine territoriale.

	Filles	Garçons
Aix-Marseille	17	65
Amiens	15	29
Besançon	7	10
Bordeaux	7	54
Caen	3	17
Clermont-Ferrand	0	5
Créteil	63	103
Dijon	23	49
Grenoble	21	30
Guadeloupe	5	6
Guyane	1	2
Lille	19	65
Limoges	3	9
Lyon	43	116
Martinique	7	7
Mayotte	0	1
Montpellier	13	34
Nancy-Metz	15	44
Nantes	23	59
Nice	16	34
Nouvelle Calédonie	1	0
Orléans-Tours	16	43
Paris	92	184
Poitiers	3	22
Polynésie Française	2	0
Reims	11	24
Rennes	18	41
Réunion	5	10
Rouen	11	29
Strasbourg	25	37
Toulouse	44	78
Versailles	125	233
Lycée français à l'étranger	58	149
Total hors lycée français à l'étranger	654	1440
Totaux	712	1589

On dénombre donc environ 31 % de filles parmi les inscrits pour une représentation d'environ 47 % dans la population des élèves des classes de terminale S¹.

Les candidats des lycées français à l'étranger sont issus de 33 pays et se répartissent de la manière suivante :

	Filles	Garçons
Autriche	3	5
AUSTRALIE	0	1
Autriche	0	3
CANADA	1	4
CHINE	2	8
COLOMBIE	2	5
COTE D'IVOIRE	2	7
DANEMARK	2	0
EMIRATS ARABES UNIS	4	2
ESPAGNE	3	7
ETATS-UNIS	1	5
GABON	2	3
GRECE	0	3
GUATEMALA	0	1
GUINEE	1	0
INDE	1	0
ITALIE	1	1
KENYA	0	2
LIBAN	6	17
LUXEMBOURG	1	5
MALAISIE	0	2
MAROC	20	37
MAURICE	0	2
PAYS-BAS	1	2
ROYAUME-UNI	2	5
SALVADOR	0	2
SENEGAL	2	0
SINGAPOUR	1	4
SUISSE	0	2
THAILANDE	0	1
TUNISIE	3	5
TURQUIE	1	2
VENEZUELA	0	1

¹ Repères et références statistiques 2017 – Depp

3. Commentaires sur l'épreuve écrite

L'épreuve écrite de la session 2018 s'intitule « Quittons notre berceau ! ». Elle traite tout d'abord des différentes phases du vol d'un lanceur spatial vers Mars : la phase de vol vertical, faisant appel à l'équation de Tsiolkovski, et la phase de transfert s'appuyant sur l'étude de l'orbite de Hohmann. Puis elle s'intéresse aux procédés d'élaboration d'un nouveau propergol plus écologique et plus performant que l'hydrazine, et compare enfin la propulsion ionique et la propulsion à effet Hall.

Les deux premières parties ont été globalement traitées par la majorité des candidats. Le sujet comportait un nombre important de documents que les candidats se sont dans l'ensemble bien appropriés.

Le jury souligne la qualité des réponses en chimie mais il attire l'attention sur les questions qualitatives, traitées souvent de manière trop superficielle.

Le jury regrette que peu de candidats aient abordés la résolution de problème, pourtant située à la fin de la première partie. Un trop grand nombre d'entre eux a ignoré la question ou simplement recopié le schéma donné dans le sujet sans y apporter plus d'informations. Pour les candidats l'ayant traitée en profondeur, le jury leur conseille d'être plus explicites dans les hypothèses de résolution et dans leur validation. Par ailleurs, le jury rappelle que la résolution de problème représente un nombre de points importants dans le barème (environ 10 %) et que cette dernière permet de mettre en avant les candidats qui s'y investissent.

Remarques à propos des réponses apportées par les candidats.

Partie A – Objectif Mars

1) L'unité de la vitesse angulaire n'est pas toujours mentionnée.

2 à 3) Le choix entre le cosinus et le sinus est souvent hasardeux et l'interprétation sur la valeur maximale de la vitesse pas toujours en accord avec l'expression du candidat. Certains candidats ont essayé de justifier l'expression par une analyse dimensionnelle souvent erronée.

5 à 8) La détermination des quantités de matière, de la masse maximale et de la poussée du premier étage a souvent été bien traitée. Attention toutefois à veiller à la stœchiométrie de l'équation de la réaction et l'indication des états physiques des entités en présence.

9) Une bonne appropriation des documents sur cette question est à noter. Il ne fallait pas oublier de prendre en compte, dans le bilan, l'influence conjointe du premier étage et des deux boosters. Le jury regrette l'absence de commentaire en référence à la valeur de l'accélération de la pesanteur.

10 à 14) L'exploitation du débit massique dans l'expression de la masse, de l'impulsion spécifique d'un booster et l'interprétation de l'équation de Tsiolkovski n'ont pas posé de problème. Attention cependant à la rigueur mathématique.

15) Cette question, portant sur la détermination de la vitesse et de l'altitude atteintes juste avant le détachement des boosters, a rarement été traitée correctement bien que les candidats aient su trouver les informations utiles dans les documents.

16 à 17) Les commentaires sur l'influence des hypothèses n'ont souvent pas été assez détaillées : l'hypothèse a bien été évoquée mais le sens de l'influence sur les paramètres (augmentation ou diminution) peu mentionné. Les candidats ont bien vu l'intérêt des fusées à plusieurs étages.

18 à 20) La force d'attraction gravitationnelle est connue et bien schématisée. En conséquence, le vecteur accélération et le module de la vitesse sont bien déterminés.

21) Les candidats ont vu la conservation de l'énergie mécanique mais ont eu des difficultés à exploiter la définition de la vitesse de libération.

22) Comme indiqué en remarque générale, trop peu de candidats ont abordé cette question, et ceux qui l'ont abordée, se sont parfois contentés de recopier le schéma donné. Il est à regretter que ces candidats n'aient pas pensé à utiliser les lois de Kepler en lisant et en observant dans le document le mouvement d'astres dans le référentiel héliocentrique.

Partie B – Vers de nouveaux propergols

23 à 25) Peu de candidats ont pensé au phénomène des pluies acides. Les pictogrammes ont été bien interprétés.

26 à 27) Les différents types d'interaction sont souvent cités à bon escient mais sans justification ou avec une justification incohérente.

28) Un bon nombre de candidats maîtrise la notion de pourcentage massique.

29 à 30) Le lien entre une forte solubilité et une grande impulsion spécifique n'a pas été compris.

31) Les candidats ont su s'approprier l'équation de la réaction d'échange d'ions sur la résine.

32 à 33) La définition de la constante d'acidité et le lien entre son cologarithme décimal et le pH est facilement établi. Attention cependant à la confusion entre NH_3 et HN_3 .

34 à 37) Peu de candidats ont eu l'idée de réaliser la moyenne des pK_a pour déterminer le pH. En conséquence l'interprétation de l'évolution du pH n'a pas été justifiée correctement. Très peu de candidats ont proposé une méthode de détermination de fin d'élution.

38 à 39) La méthode des tangentes a été appliquée mais les candidats doivent penser à la mentionner. L'exploitation de la stœchiométrie pour l'équivalence est parfois mal traitée.

40 à 42) Les candidats ont su établir l'équation de la réaction d'oxydo-réduction. La majorité des candidats qui a traité ces questions a très bien traité le titrage en retour et a bien pensé au facteur 5 pour déterminer la quantité de matière d'ion azoture dans les 10 mL.

43) Peu de candidats ont su utiliser la définition du coefficient de rétention de la résine. Certains trouvent même un coefficient supérieur à 1. Un tel résultat doit impérativement être commenté.

44 à 48) Beaucoup de candidats ont considéré l'acide sulfurique comme un diacide faible dans l'équation de la réaction. Peu ont reconnu le montage de distillation simple. La diminution de la solubilité avec la température a été peu évoquée.

49 à 52) Peu de candidats pensent à faire intervenir les masses molaires dans le rendement molaire. La comparaison des deux méthodes n'a été que peu abordée.

Partie C – Propulsion électrique

53 à 55) Les avantages et inconvénients de la propulsion ionique par rapport à la propulsion chimique ont été repérés.

56 à 58) Les candidats n'ont pas nécessairement su déterminer les signes des grilles. La conservation de l'énergie mécanique a été posée. Les candidats qui ont traité cette question ont souvent omis d'exprimer la masse molaire en $\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$.

59 à 61) L'importance d'une masse atomique élevée a été mal identifiée. Les candidats ont analysé son impact sur la vitesse d'éjection mais n'ont pas vu le lien avec l'équation de Tsiolkovski.

62) La force de Lorentz a souvent été calculée avec le vecteur vitesse initiale à la place du vecteur vitesse.

63) La nature uniforme du mouvement a souvent été vue mais associée à d'autres termes non appropriés comme rectiligne. Certains candidats confondent « uniforme » et « uniformément accéléré ».

64) L'analyse dimensionnelle a été très mal traitée. Beaucoup de candidats concluent directement que le produit de la charge par le champ magnétique sur la masse est bien l'inverse d'un temps sans autre justification.

65 à 72) Les candidats ayant traité ces questions n'ont que rarement réussi à obtenir le pas de l'hélice et à commenter le résultat concernant d'une part les électrons et d'autre part les ions xénon.

4. Annexes : corrigé et sujet

- **Proposition de correction**
- **Sujet du concours général de physique-chimie de terminale S : session 2018**

Le corrigé du sujet de la session 2018 proposé en annexe vise à aider les futurs candidats à se préparer au concours général des lycées de physique-chimie de la filière S. Il constitue une proposition et n'a donc aucune visée normative.

Quittons notre berceau - Proposition de correction

Les remarques en italique ne sont pas attendues du candidat.

PARTIE A - Objectif Mars

I. D'où décoller depuis la Terre ?

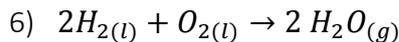
- 1) $\Omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{23 \times 3600 + 56 \times 60 + 4} = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}$. (Le candidat pourra utiliser le jour sidéral ou le jour solaire pour faire cette AN).
- 2) La vitesse étant constante : $v = \frac{d}{\Delta t} = \frac{2\pi R_T \cos \lambda}{T} = R_T \cos \lambda \Omega$
- 3) Il faut privilégier les faibles latitudes pour maximiser la vitesse et donc l'énergie cinétique.

II. Décollage

- 4) La propulsion du lanceur repose sur le principe d'action-réaction : le lanceur émet des gaz sur lesquels il « s'appuie » pour se propulser.

$$5) n_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{M(H_2)} = \frac{140 \cdot 10^6}{2,0} = 70 \cdot 10^6 \text{ mol}$$

$$n_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{M(O_2)} = \frac{840 \cdot 10^6}{32,0} = 26,3 \cdot 10^6 \text{ mol}$$



7)

(mol)	$2H_{2(l)}$	+	$O_{2(l)}$	→	$2 H_2O_{(g)}$
El	n_{H_2}		n_{O_2}		0
EF	$n_{H_2} - 2\xi_{max}$		$n_{O_2} - \xi_{max}$		$2\xi_{max}$

$$\xi_{max} = n_{O_2} \Rightarrow m_{H_2O} = 2\xi_{max}M(H_2O) = 945 \cdot 10^3 \text{ kg.}$$

$$8) q_m = \frac{m_{H_2O}}{T} = \frac{945 \cdot 10^3}{480} = 1,97 \cdot 10^3 \text{ kg.s}^{-1}$$

$$F_1 = q_m g I_{sp} = \frac{945 \cdot 10^3}{480} \times 9,81 \times 360 = 6,95 \text{ MN}$$

- 9) D'après la formule de Mechtcherski :

$$m(t)\overrightarrow{a(t)}_{G/Rg} = \overrightarrow{F}_{ext} + \overrightarrow{F}_1 + \overrightarrow{F}_b$$

On fait l'hypothèse que la fusée a un mouvement de translation verticale. On néglige les effets de l'air sur la fusée et la variation de l'intensité de la pesanteur g avec l'altitude.

En projection : $m(t)z''(t) = -m(t)g + F_1 + F_b \Rightarrow \ddot{z}(t=0) = -g + \frac{F_1 + F_b}{m_0}$

$$\Rightarrow \ddot{z}(t=0) = -9,81 + \frac{6,95 \cdot 10^6 + 2 \times 16 \ 000 \cdot 10^3}{2700 \cdot 10^3} = 4,62 \text{ m.s}^{-2}.$$

L'accélération initiale est d'environ $0,5 g$ supportable par un être humain. En réalité, le premier étage ne s'allume pas dès le départ, l'accélération initiale est donc plus faible.

III. La phase de vol vertical

$$10) m(t) = m_0 - q_m t = m_0(1 - \delta t)$$

11) Le terme correctif provient de la force qu'exerce la Terre sur la fusée, l'équation de Tsiolkovski non corrigée du document 1 ne tenant compte d'aucune autre action extérieure autre que celle de la force de poussée fournie par le moteur de la fusée.

12) $v_f = -gT + v_e \ln \frac{m_0}{m_f}$ (car $v_0 = 0$).

13) On peut agir :

- sur la vitesse d'éjection des gaz : plus elle sera élevée, plus v_f sera élevée. Cela se traduit par une *Isp* importante des ergols ;
- sur le rapport entre la masse initiale et la masse finale : ce rapport doit être le plus grand possible. Cela se traduit par augmenter la masse initiale, mais pour conserver le même débit, la fabrication de la structure devient compliquer ou par diminuer la masse finale, ce qui est contre l'intérêt de la fusée, à savoir venir placer la charge utile en orbite ;
- sur le débit : plus il sera important, plus la masse finale sera atteinte rapidement et donc plus le temps de propulsion T sera faible.

14) Vitesse d'éjection des gaz à la sortie d'un booster : $v_e = g Isp_b = 9,81 \times 270 = 2,65.10^3 \text{ m.s}^{-1}$.

15) Première étape : boosters

Conditions initiales : $v_0 = 0 \text{ m.s}^{-1}$ et $z_0 = 0 \text{ m}$

Masse finale une fois le propergol consommé :

$$m_f = m_0 - 2 \times m_{pb} = 2700.10^3 - 2 \times 630.10^3 = 1440.10^3 \text{ kg}$$

Vitesse atteinte d'après la formule de Tsiolkovski :

$$v_f = -gT + v_e \ln \frac{m_0}{m_f} + v_0 =$$

$$-9,81 \times 130 + 9,81 \times 270 \times \ln \frac{2700.10^3}{2700.10^3 - 2 \times 630.10^3} = 390 \text{ m.s}^{-1}$$

Altitude atteinte une fois le propergol consommé :

$$m_f = m_0(1 - \delta T) \Rightarrow \delta = \frac{1}{T} \left(1 - \frac{m_f}{m_0}\right) = 3,59.10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$\Rightarrow h_f = -\frac{1}{2}gT^2 + v_e \frac{1}{\delta} \left(-\frac{m_f}{m_0} \ln \left(\frac{m_0}{m_f}\right) + \delta T\right) = 14 \text{ km}$$

16) La diminution de g avec l'altitude aura pour effet d'augmenter légèrement la vitesse et l'altitude (à l'altitude z , la fusée est soumise à la force d'attraction gravitationnelle terrestre $\vec{F} = -\frac{GM_T}{(R_T+z)^2} \vec{e}_r = -mg(z)\vec{u}_z \Leftrightarrow g(z) = \frac{GM_T}{(R_T+z)^2}$. Jusqu'au détachement des boosters, l'altitude atteinte $z_f \ll R_T$. La variation de g est donc effectivement négligeable.).

A contrario, les forces de frottements sont importantes durant la première étape tant que la fusée se situe dans l'atmosphère terrestre, ce qui va tendre à diminuer la vitesse et l'altitude.

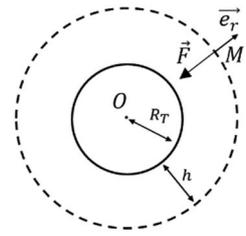
Par ailleurs, l'hypothèse la plus forte est sûrement le mouvement rectiligne de la fusée. La trajectoire est curviligne, ce qui permet de diminuer les effets de la gravité (supposons que l'axe de la fusée ait tourné d'un angle β , la projection du principe fondamental de la dynamique sur cet axe donnerait : $m(t)a(t) = -m(t)g\cos\beta - q_m v_e$, ce qui aurait pour conséquence d'augmenter la valeur de l'accélération).

17) L'inconvénient d'une fusée à un étage est de transporter les réservoirs qui enferment les propergols même une fois vides. Il faut donc se débarrasser de ces derniers au fur et à mesure. La fusée à étages permet une libération discrète de la masse inutile.

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

18) Le vaisseau est soumis à la force d'attraction gravitationnelle terrestre

$$\vec{F} = -\frac{Gm_1M_T}{(R_T+h)^2}\vec{e}_r = +\frac{Gm_1M_T}{r^2}\vec{e}_N \text{ dans la base de Frénet avec } r = R_T + h.$$



19) Le mouvement est circulaire et uniforme : $v = cte \Rightarrow \frac{dv}{dt} = 0$.

$$\vec{a}_{M/Rg} = \frac{v^2}{r}\vec{e}_N = -\frac{v^2}{r}\vec{e}_r : \text{l'accélération est centripète.}$$

20) D'après la deuxième loi de Newton appliquée au système {vaisseau} dans le référentiel géocentrique considéré galiléen pendant l'observation du vaisseau :

$$m\vec{a}_{M/Rg} = -\frac{GmM_T}{(R_T+h)^2}\vec{e}_r \Rightarrow v_1 = \sqrt{\frac{GM_T}{(R_T+h)}} = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \times 5,98 \cdot 10^{24}}{(6370+5800) \cdot 10^3}} = 5,71 \text{ km.s}^{-1}$$

21) L'énergie mécanique E_m d'un point matériel est la somme de son énergie cinétique E_c et de toutes les énergies potentielles relatives aux forces conservatives auxquelles est soumis ce point.

$$E_m = E_c + E_{p,tot} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GmM_T}{r}$$

En négligeant tout frottement du milieu interstellaire et l'attraction des autres astres devant celle de la Terre, le satellite n'est alors soumis qu'à une unique force conservative. Son énergie mécanique se conserve. Or la vitesse de libération est définie comme la vitesse qui permet au vaisseau d'échapper à l'attraction terrestre et de parvenir en un point infiniment éloigné du centre de la Terre avec une vitesse nulle. Ainsi, infiniment éloigné de la Terre, le satellite a son énergie cinétique nulle.

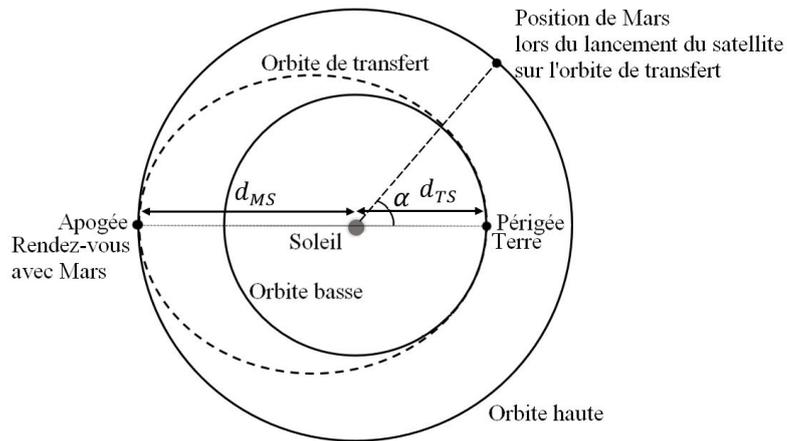
De plus l'énergie potentielle est prise nulle à l'infini. Ainsi $E_m = 0 = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{GmM_T}{(R_T+h)}$

$$\Rightarrow v_2 = \sqrt{2\frac{GM_T}{(R_T+h)}} = 8,10 \text{ km.s}^{-1}.$$

V. Orbite de transfert

22) On ne considère que l'attraction solaire sur le module. On se place désormais dans le référentiel héliocentrique. On considère que la Terre et Mars ont des orbites circulaires coplanaires, ce qui s'avère être proche de la réalité puisque les excentricités de la Terre et de Mars sont très faibles et que l'angle entre les plans d'orbite de la terre et de Mars est également faible.

On peut donc schématiser la situation ainsi :



Le module est en mouvement elliptique autour du Soleil. D'après la troisième loi de Kepler, ce mouvement est périodique de période T donnée par la relation :

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM_s} \Rightarrow \frac{T}{2} = \sqrt{\frac{\pi^2(d_{TS}+d_{MS})^3}{2^3 GM_s}} = 259 \text{ j.}$$

Durant ce temps, Mars parcourt $180 - \alpha = 360 \times \frac{T}{2T_{M/S}}$

Il faut déterminer la période de révolution de Mars autour du Soleil $T_{M/S}$. Pour cela, on applique de nouveau la troisième loi de Kepler à Mars, en considérant que Mars décrit une orbite circulaire autour du Soleil à la distance moyenne d_{MS} :

$$\frac{T_{M/S}^2}{d_{MS}^3} = \frac{4\pi^2}{GM_s} \Rightarrow T_{M/S} = \sqrt{\frac{4\pi^2 d_{MS}^3}{GM_s}} = 687 \text{ j.}$$

$$\Rightarrow \alpha = 44^\circ.$$

Il faudra donc un peu plus de 8 mois et demi pour que le module atteigne Mars et l'angle Terre-Soleil-Mars au moment de la poussée des fusées devra être de 44° .

Pour effectuer l'application numérique, on a négligé l'altitude du satellite par rapport à la Terre et par rapport à Mars et on a pris les distances moyennes Terre-Soleil et Mars-Soleil. On a également négligé l'obliquité de l'orbite de Mars par rapport au plan de l'écliptique.

Remarque : ce résultat est bien supérieur au temps réel du voyage au cours duquel le module d'exploration effectuera plus de deux manœuvres impulsives.

PARTIE B - Vers des nouveaux propergols

I. Le nitrate d'hydroxylammonium HAN

- 23) Les ergols solides délivrent, en peu de temps, une forte poussée à partir d'une masse et d'un volume réduits et sont ensuite largués. Ils sont faciles à stocker et à manipuler.
- 24) La combustion du perchlorate d'ammonium génère des tonnes d'acide chlorhydrique à l'origine des pluies acides.
- 25) L'hydrazine est inflammable, toxique, corrosif et dangereux pour l'homme (cancérogène) : ces propriétés justifient la volonté de son remplacement par des propergols plus verts.
- 26) Pour assurer la cohésion du HAN, on peut envisager des interactions coulombiennes entre les ions du composé et entre deux composés de HAN. De plus, les éléments hydrogène portés par les cations sont liés de manière covalente à des éléments très électronégatifs N et O et l'anion présente des doublets non liants portés par les éléments O très électronégatifs. Il peut donc se former des liaisons hydrogène entre les ions du composé et entre deux composés de HAN.
- 27) L'eau et le HAN sont polaires. Il existe donc des interactions de Van der Waals entre ces deux composés. L'eau peut réaliser des liaisons hydrogène avec le cation et l'anion, ce qui explique la forte solubilité de HAN dans l'eau.
- 28) Une réaction acido-basique consiste en un échange de protons. L'équation de la réaction qui se produit est : $NH_2OH_{(aq)} + HNO_{3(l)} \rightarrow NH_3OH^+_{(aq)} + NO_3^-_{(aq)}$.

On utilise une masse de 30,28 g d'une solution aqueuse d'hydroxylamine à 50% en

$$\text{masse} : n(NH_2OH)_0 = \frac{m(NH_2OH)_0}{M(NH_2OH)} = \frac{\frac{50}{100}m}{M(NH_2OH)} = \frac{\frac{50}{100} \times 30,28}{(14,0+3,0+16,0)} = 0,46 \text{ mol.}$$

Le mélange est stœchiométrique : $n(HNO_3)_0 = n(NH_2OH)_0$.

$$\text{Et } n(HNO_3)_0 = \frac{m(HNO_3)_0}{M(HNO_3)} = \frac{p_2 m_{sol,ac}}{M(HNO_3)} = \frac{p_2 \rho V}{M(HNO_3)} \Rightarrow V = \frac{n(HNO_3)_0 M(HNO_3)}{p_2 \rho}$$

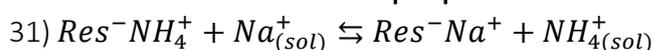
$$\Rightarrow V = \frac{\frac{50}{100} \times 30,28}{(14,0+3,0+16,0)} \times (1,0+14,0+3 \times 16,0) = \frac{\frac{65}{100} \times 1,40}{31,8} = 31,8 \text{ mL.}$$

On peut supposer la réaction exothermique, ce qui nécessite une addition lente et à basse température de l'acide nitrique.

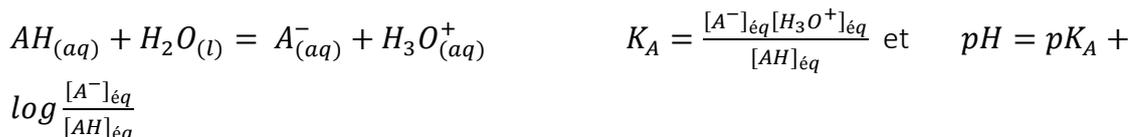
II. L'azoture d'ammonium

- 29) L'azoture d'ammonium associé au nitrate d'hydroxylammonium permet d'augmenter l'impulsion spécifique du propergol et donc la vitesse d'éjection des gaz formés.
- 30) L'impulsion spécifique du mélange ternaire diminue avec l'augmentation d'eau. Il faut donc le moins d'eau possible dans le mélange pour avoir l'impulsion spécifique la plus grande possible. Plus un composé est soluble dans l'eau et plus sa quantité de matière dans un même volume est grande. Le fait que HAN et AA soient fortement solubles permet de réaliser un mélange avec peu d'eau et d'obtenir une grande impulsion spécifique devant celle de l'hydrazine.

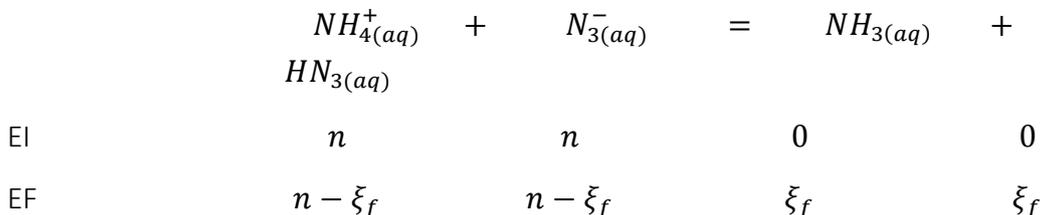
1. Première méthode de préparation



32) La constante d'acidité est la constante d'équilibre associée à la réaction d'un acide faible dans l'eau :



33)



34) D'après les questions précédentes :

$$K_{A1} = \frac{[NH_3]_{\text{éq}}[H_3O^+]_{\text{éq}}}{[NH_4^+]_{\text{éq}}} \quad \text{et} \quad K_{A2} = \frac{[N_3^-]_{\text{éq}}[H_3O^+]_{\text{éq}}}{[HN_3]_{\text{éq}}} \quad pH = pK_{A1} + \log \frac{[NH_3]_{\text{éq}}}{[NH_4^+]_{\text{éq}}} \quad \text{et}$$

$$pH = pK_{A2} + \log \frac{[N_3^-]_{\text{éq}}}{[HN_3]_{\text{éq}}}$$

En sommant les deux expressions du pH :

$$pH = \frac{pK_{A1} + pK_{A2}}{2} + \frac{1}{2} \log \frac{[NH_3]_{\text{éq}}}{[NH_4^+]_{\text{éq}}} \frac{[N_3^-]_{\text{éq}}}{[HN_3]_{\text{éq}}} = \frac{pK_{A1} + pK_{A2}}{2} = \frac{9,2 + 4,7}{2} = 7,0$$

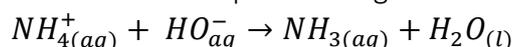
Remarque : on néglige ici les réactions prépondérantes secondaires entre l'eau et les ions azote d'une part, entre l'eau et les ions ammonium d'autre part, ainsi que l'autoprotolyse de l'eau, hypothèses qui s'avèreront valables une fois les quantités de matière des ions azote et ammonium déterminées par le titrage.

35) Lors de l'éluion, l'excès d'eau pure dans la résine est éliminé au fur et à mesure de l'éluion de la solution d'azote de sodium. Le pH est donc proche de 7. L'échange d'ions qui se produit sur la résine conduit à obtenir dans l'éluat une solution d'azote d'ammonium dont le pH attendu est également de 7. Le pH reste donc constant.

36) Si le taux d'échange de la résine est de 100%, alors le pH de la solution dans le bécher sera le même que celui de l'eau pure. Il n'est pas possible de déterminer la fin du passage de la solution d'azote de sodium dans la colonne.

37) Une fois que l'on suppose l'éluion terminée, après avoir suffisamment fait couler d'eau pure, on peut placer un nouveau bécher sous la colonne. On continue à faire couler de l'eau pure en entrée de colonne et on récupère l'éluat de ce bécher auquel on ajoute de la soude en prenant soin de s'être placé sous la hotte (muni de blouse, de gants et de lunettes). S'il y a encore présence d'ion ammonium, un dégagement de vapeur blanche devrait être observable. Si tel est le cas, il faut continuer à ajouter de l'eau en tête de colonne. Sinon, on peut arrêter : les ions ammonium ne seront présents alors qu'à l'état de traces.

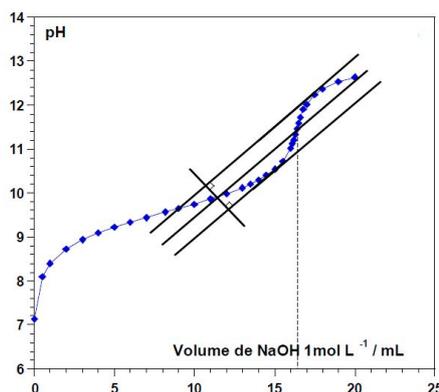
38) La réaction acido-basique de titrage est :



D'après la méthode des tangentes :

On trouve un $V_{B,\text{éq}} = 16,5 \text{ mL}$.

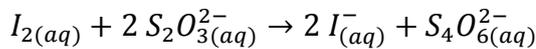
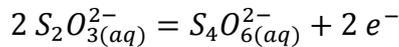
A l'équivalence, les réactifs sont introduits en proportions stœchiométriques :



$$n_1 = C_B V_{B, \text{éq}} = 16,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

$$39) \frac{n_{0, N_3^-}}{2} = n_{I_2, \text{utile}} = n_{I_2, 0} - n_{I_2, \text{excès}} \Rightarrow n_{I_2, \text{excès}} = n_{I_2, 0} - \frac{n_{0, N_3^-}}{2} = C_{I_2} V_{I_2} - \frac{n_{0, N_3^-}}{2}$$

$$40) I_{2(aq)} + 2 e^- = 2 I_{(aq)}^-$$



$$41) \text{A l'équivalence : } n_{I_2, \text{excès}} = \frac{n_{\text{thio}, \text{éq}}}{2} = \frac{C_{\text{thio}} V_{\text{éq}}}{2}$$

$$42) \Rightarrow C_{I_2} V_{I_2} - \frac{n_{0, N_3^-}}{2} = \frac{C_{\text{thio}} V_{\text{éq}}}{2} \Rightarrow n_{0, N_3^-} = 2 C_{I_2} V_{I_2} - C_{\text{thio}} V_{\text{éq}} \Rightarrow n_{10 \text{ mL}, N_3^-} = 5 \times$$

$$(2 C_{I_2} V_{I_2} - C_{\text{thio}} V_{\text{éq}})$$

$$n_{10 \text{ mL}, N_3^-} = 5 \times (2 \times 5,0 \cdot 10^{-2} \times 100,0 \cdot 10^{-3} - 5,0 \cdot 10^{-1} \times 11,0 \cdot 10^{-3}) = 22,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

$$43) k_r = \frac{n(Na^+)_{\text{res}}}{n(Na^+)_{\text{sol}}}$$

$n(Na^+)_{\text{res}} = n_1$ car les ions sodium qui se sont fixés sur la résine ont libéré en quantité de matière égale des ions ammonium.

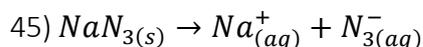
$$n(Na^+)_{\text{sol}} = n(N_3^-)_{\text{sol}}$$

Dans 10 mL d'éluat, il y a seulement $16,5 \cdot 10^{-3}$ mol d'ions ammonium alors qu'il y a $22,5 \cdot 10^{-3}$ mol d'ions azoture. Seule une partie des ions sodium de la solution S a été fixée et a été échangée par des ions ammonium :

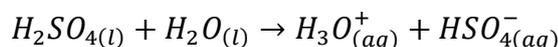
$$k_r = \frac{n(Na^+)_{\text{res}}}{n(Na^+)_{\text{sol}}} = \frac{n_1}{n_{10 \text{ mL}, N_3^-}} = \frac{16,5 \cdot 10^{-3}}{22,5 \cdot 10^{-3}} = 0,73$$

2. Seconde méthode de préparation

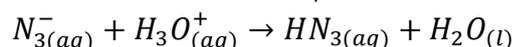
44) L'expérimentateur doit manipuler avec une blouse, des gants et des lunettes car l'acide sulfurique est corrosif. Il faut travailler sous hotte car l'inhalation de plusieurs composés est dangereuse. Il faut également manipuler doucement la verrerie puisque l'acide hydrazoïque peut s'enflammer suite à un choc. Enfin, il faut veiller à ne pas travailler à trop haute température car l'azoture de sodium et l'acide hydrazoïque peuvent s'enflammer voire exploser s'ils sont trop chauffés.



46) L'acide sulfurique est un acide fort. En solution aqueuse, il se dissocie et forme des ions oxonium :



Les ions azoture constituent la base conjuguée de l'acide faible acide hydrazoïque. Ces ions réagissent avec les ions oxonium selon l'équation :



Remarque : L'acide hydrazoïque et l'éther sont des solvants polaires. Une partie de l'acide hydrazoïque se solubilise dans l'éther et forme HN_3 (éthéré).

47) La manipulation de l'étape 4 est une distillation simple.

48) Dans le condensat, on récupère l'acide hydrazoïque facilement inflammable s'il est chauffé même modérément. Il faut donc le maintenir à basse température. Ensuite, avec les vapeurs d'ammoniac, on souhaite faire précipiter l'azoture d'ammonium. La

solubilité de ce précipité doit diminuer lorsque la température diminue, ce qui permet d'augmenter le rendement de la synthèse.



50) On repère la signature de l'ion ammonium dans le sel $NH_4N_3(s)$ au travers des 4 pics d'absorption à 1403, 1810, 2846 et 3130 cm^{-1} présents dans le spectre du précipité blanc récupéré. Le produit de la synthèse est donc vraisemblablement l'azoture d'ammonium.

Remarque : la présence des autres pics due à l'ion azoture.

51) Le rendement molaire de la synthèse est : $R = \frac{n_{NH_4^+, N_3^-}}{n_{Na^+, N_3^-}} = \frac{m_{NH_4^+, N_3^-}}{m_{Na^+, N_3^-}} \frac{M_{Na^+, N_3^-}}{M_{NH_4^+, N_3^-}} = \frac{3,21}{4,46} \times$

$$\frac{23+3 \times 14}{4+4 \times 14} = 78\%.$$

52) La première méthode présente l'avantage d'être moins dangereuse et plus simple à mettre en œuvre que la seconde, au cours de laquelle se forme de l'acide hydrazoïque toxique et explosif. Mais le taux d'échange de cations sur la résine n'étant que de 73%, la première méthode de préparation ne permet pas d'obtenir de l'azoture d'ammonium pur contrairement à la seconde méthode, qui présente de plus un bon rendement.

PARTIE C - Propulsion électrique

I. Propulseur ionique

- 53) La propulsion ionique est assurée par l'éjection d'ions xénon.
- 54) Les propulseurs ioniques sont moins encombrants que les propulseurs chimiques et par conséquent la masse initiale à embarquer sur la fusée est moins importante, ce qui permet d'avoir une charge utile plus importante (*bien qu'il faille tout de même alimenter les propulseurs ioniques avec des panneaux solaires qui augmentent l'encombrement*). De plus, l'impulsion spécifique d'un propulseur ionique est plus élevée que dans un propulseur chimique. Enfin la durée de vie d'un propulseur ionique est très largement supérieure à celle d'un propulseur chimique.
- 55) La poussée d'un propulseur ionique est très faible, ce qui rend impossible le décollage de la fusée dans l'atmosphère. La poussée dépend non seulement de la vitesse d'éjection du gaz mais également du débit massique. Ce dernier est très faible pour un propulseur électrique ($5\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$) contrairement à un propulseur chimique (pour un booster, si on le considère constant, le débit massique est de l'ordre de $\frac{630\cdot 10^3}{130} \approx 4800\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$).
- 56) Les ions $Xe_{(g)}^+$ sont accélérés entre les deux grilles, la grille intérieure est donc chargée positivement.
- 57) On considère le système {cation} dans le référentiel du module d'exploration pendant la durée d'éjection du cation. On se place dans l'espace suffisamment loin de tout astre pour négliger la force d'attraction gravitationnelle devant la force électrique à laquelle est soumis le cation. On suppose qu'un seul ion se situe entre les deux plaques accélératrices. L'ion n'est donc soumis qu'à une unique force conservative. L'énergie mécanique du cation se conserve :
- $$\Delta E_m = 0 \Leftrightarrow \Delta E_c = -\Delta E_p \Leftrightarrow E_{cf} - E_{ci} = E_{pi} - E_{pf} \Leftrightarrow \frac{1}{2}mv_e^2 = q(V_p - V_N)$$
- $$\Delta V = \frac{mv_e^2}{2q} = \frac{M(Xe)}{N_a} \frac{v_e^2}{2e} \text{ en assimilant la masse de l'ion à la masse de l'atome de xénon.}$$
- $$\Delta V = \frac{131,2\cdot 10^{-3}}{6,02\cdot 10^{23}} \frac{(30\cdot 10^3)^2}{2 \times 1,60\cdot 10^{-19}} = 6,1\cdot 10^2 \text{ V}$$
- 58) La grille extérieure est chargée négativement et pourrait attirer et ralentir les ions sortant s'ils n'étaient pas neutralisés et ainsi diminuer leur vitesse d'éjection.

II. Choix du xénon

- 59) Plus la masse des ions éjectée sera grande et plus la variation de vitesse du module sera importante d'après Tsiolkovski et plus la force poussée sera importante. Il faut donc choisir un élément chimique dont la masse atomique est la plus importante possible.
- 60) Il est également possible d'agir sur la vitesse d'éjection pour augmenter la force de poussée. Plus la charge massique $\frac{e}{m(X^+)}$ de l'ion X^+ formé est élevée et plus la vitesse d'éjection de l'ion sera élevée : $v_e = \sqrt{\frac{2e}{m(X^+)}(V_p - V_N)}$.

61) D'après le tableau, le mercure présente l'avantage d'avoir une masse molaire très élevée, un avantage pour avoir un grand débit massique, mais un inconvénient pour la vitesse d'éjection. Le césium et le xénon ont des caractéristiques assez comparables, si ce n'est que le césium présente l'avantage d'avoir une énergie de première ionisation très faible et peut donc perdre facilement un électron mais une énergie de deuxième ionisation plus élevée. En revanche, le césium et le mercure ont tendance à être corrosifs avec certaines parties du moteur. Comparativement aux deux autres gaz rares, le xénon a une énergie d'ionisation légèrement plus faible et une masse molaire plus élevée ce qui fait de lui un meilleur candidat.

III. Propulseur à effet Hall

62) A l'aide de la deuxième loi de Newton : $m\vec{a} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$.

Les trois composantes de l'accélération en coordonnées cartésiennes sont $\begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q\dot{y}B/m \\ -q\dot{x}B/m \\ 0 \end{pmatrix}$.

63) $\dot{z} = cte = v_0 \cos \theta$. Le mouvement suivant l'axe (O, \vec{u}_z) est un mouvement de translation uniforme.

64) $[\omega_c] = [charge] \frac{[champ\ magnétique]}{[masse]} = \frac{[masse][accélération]}{[vitesse][champ\ magnétique]} \frac{[champ\ magnétique]}{[masse]} = \frac{[accélération]}{[vitesse]}$
 $[\omega_c] = \frac{MLT^{-2}}{MLT^{-1}} = T^{-1}$ ce qui est homogène à une pulsation dont l'unité est le $rad.s^{-1}$.

65) $\dot{x}(t) = v_0 \sin \theta \cos(\omega_c t)$
 $\dot{y}(t) = -\frac{|q|v_0 \sin \theta}{q} \sin(\omega_c t)$
 $\dot{z} = cte = v_0 \cos \theta$
 $\Rightarrow \|\vec{v}\| = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} = v_0$

L'action du champ magnétique sur la particule ne modifie pas la norme de sa vitesse. La particule soumise à son action garde donc une énergie cinétique constante comme le précise le document 12.

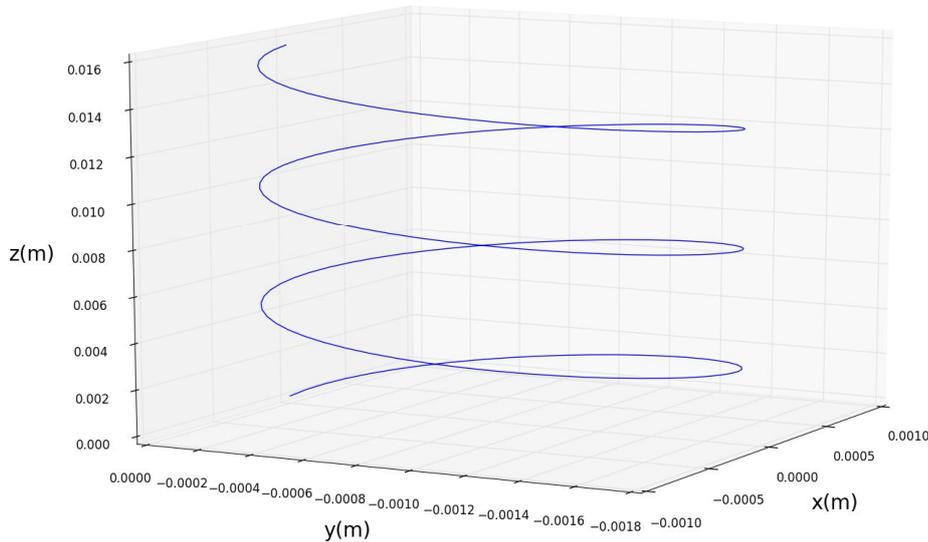
66) $\left(y(t) - \frac{v_0 \sin \theta}{\frac{qB}{m}}\right)^2 = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{\left(\frac{qB}{m}\right)^2} \cos^2(\omega_c t) = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{\omega_c^2} \cos^2(\omega_c t)$
 $x^2(t) = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{\omega_c^2} \sin^2(\omega_c t)$
 $\left(y(t) - \frac{v_0 \sin \theta}{\frac{qB}{m}}\right)^2 + x^2(t) = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{\omega_c^2} = R^2$

Dans le plan (xOy) la trajectoire est un cercle de rayon $R = \frac{v_0 \sin \theta}{\omega_c}$ et suivant l'axe (O, \vec{u}_z) , le mouvement est un mouvement de translation uniforme.

La trajectoire de la particule est donc une hélice de rayon $R = \frac{v_0 \sin \theta}{\omega_c}$ et de pas $h = |z(t + T_c) - z(t)|$ avec $T_c = \frac{2\pi}{\omega_c}$ et $z(t) = v_0 t \cos \theta$. D'où $h = v_0 T_c \cos \theta =$

$v_0 \frac{2\pi}{\omega_c} \cos \theta$. Cette hélice s'enroule autour de l'axe (O, \vec{u}_z) . Or les lignes de champ magnétique sont des courbes tangentes au vecteur champ magnétique en chacun de leur point. Le champ magnétique est suivant l'axe (O, \vec{u}_z) à chaque instant. Les lignes de champ magnétique sont donc des droites parallèles à l'axe (O, \vec{u}_z) . L'hélice s'enroule autour des lignes de champ.

Allure de la trajectoire d'un électron confiné dans un champ magnétique uniforme



- 67) Une augmentation de la valeur du champ magnétique aura pour effet de diminuer le rayon et le pas de l'hélice.
- 68) Le champ magnétique est le plus intense en sortie de propulseur, là où les lignes de champ sont les plus resserrées.
- 69) Pour ioniser un atome de xénon gazeux en ion xénon(I) $Xe_{(g)}^+$, il faut fournir à un atome de xénon gazeux une énergie d'au moins 12,13 eV mais inférieure à 21,21 eV (dans un tel cas, l'ion $Xe_{(g)}^{2+}$ serait formé). L'énergie cinétique de l'électron doit donc appartenir à ce domaine. La norme de la vitesse de l'électron étant constante, son énergie cinétique l'est aussi : $E_c = \frac{1}{2} m_e v_0^2 \Rightarrow v_0 = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}}$

$$R = \frac{v_0 \sin \theta}{\omega_c} = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}} \frac{\sin \theta}{\frac{eB}{m_e}} = \sqrt{2m_e E_c} \frac{\sin \theta}{eB} =$$

$$\sqrt{2 \times 9,11 \cdot 10^{-31} \times 12,13 \times 1,60 \cdot 10^{-19}} \frac{\sin 45}{1,60 \cdot 10^{-19} \times 10^{-2}}$$

$R = 0,83 - 1,1$ mm pour E_c entre 12,13 et 21,21 eV et pour un champ magnétique de $2 \cdot 10^{-2}$ T. L'ordre de grandeur de R est le mm.

$$h = 2\pi \sqrt{2m_e E_c} \frac{\cos \theta}{eB} = 2\pi \sqrt{2 \times 9,11 \cdot 10^{-31} \times 12,13 \times 1,60 \cdot 10^{-19}} \frac{\cos 45}{1,60 \cdot 10^{-19} \times 10^{-2}}$$

$h = 5,2 - 6,9$ mm. L'ordre de grandeur de h est le mm.

- 70) $R_{Xe^+} = m_{Xe^+} \frac{v_{Xe^+} \sin \theta}{eB} = \frac{M(Xe) v_{Xe^+} \sin \theta}{N_a eB} = \frac{131,2 \cdot 10^{-3}}{6,02 \cdot 10^{23}} \frac{30 \cdot 10^3 \sin 45}{1,60 \cdot 10^{-19} \times 10^{-2}} = 2,9$ m ce qui est très grand devant le diamètre de la chambre. Le mouvement des ions n'est donc pas affecté par le champ magnétique. Les ions sont éjectés du moteur contrairement aux électrons qui y restent confinés.

- 71) Un propulseur à effet Hall ne contient pas de grilles qui peuvent se détériorer au cours du temps.
- 72) La divergence du jet implique qu'une partie de l'éjection du gaz ne s'effectue pas de manière axiale et diminue la valeur de la poussée, ce qui n'est pas souhaitable.

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
- Numérotter 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 : 00101

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

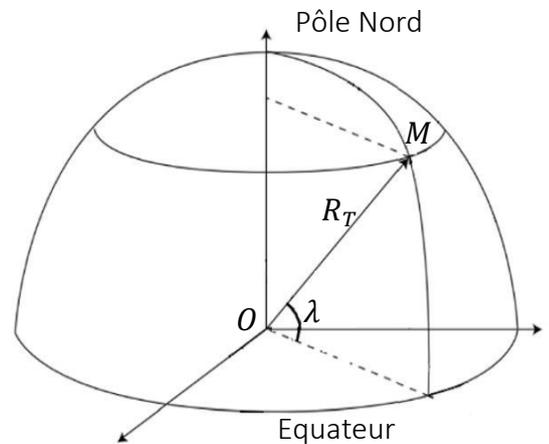
Considérons le cas particulier d'un point M décrivant, dans un référentiel donné, une trajectoire circulaire et uniforme. Durant le mouvement, le rayon du cercle CM balaie un angle θ pendant la durée Δt , C étant le centre du cercle. La vitesse angulaire du point M dans ce référentiel est :

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

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

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

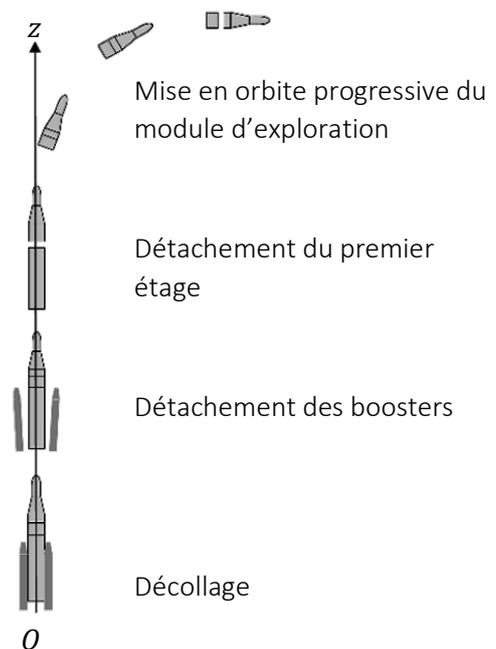


Figure 1 - Schéma de la mise en orbite autour de la Terre du module d'exploration

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.

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

$r_p = FP$; $r_a = FA$

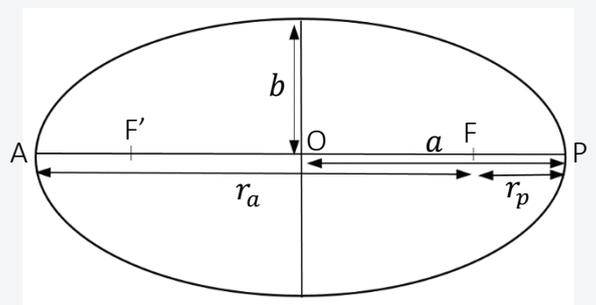
e : excentricité de l'ellipse telle que $e = \frac{r_a - r_p}{r_a + r_p}$

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 de 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.

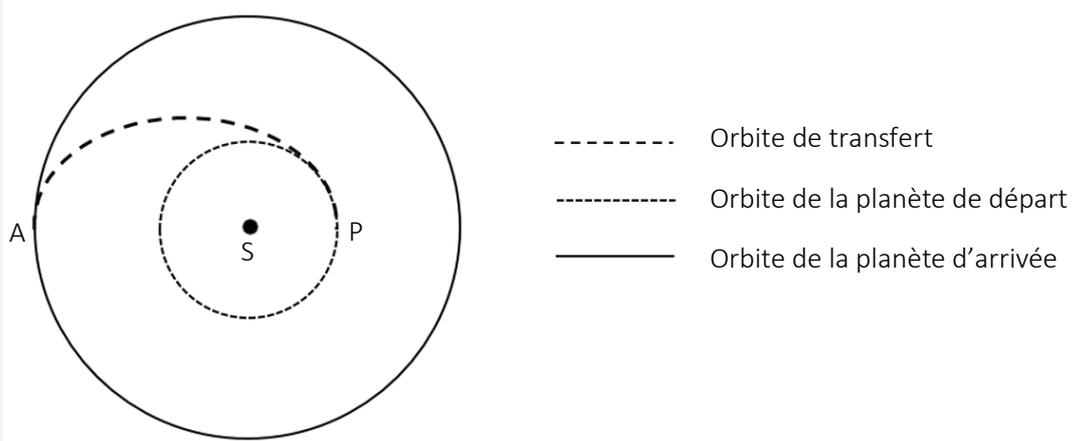
Une fois en orbite, le module d'exploration devra mettre en route d'autres moteurs pour se libérer de l'attraction terrestre et se satelliser autour de Mars.

- 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 $1,40 \text{ g.mL}^{-1}$, 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 ($NH_4^+_{(aq)}, N_3^-_{(aq)}$) et d'eau a été étudiée en laboratoire.

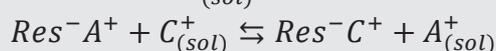
- 29) Quel intérêt l'association des deux propergols HAN et AA présente-t-elle ?
- 30) Quel avantage présente leur forte solubilité dans l'eau ?

1. Première méthode de préparation

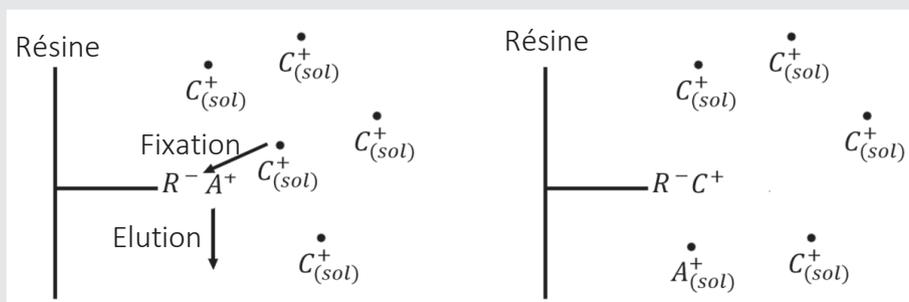
Pour fabriquer une solution d'azoture d'ammonium AA, la première méthode de préparation fait appel à une colonne de résine échangeuse de cations.

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.

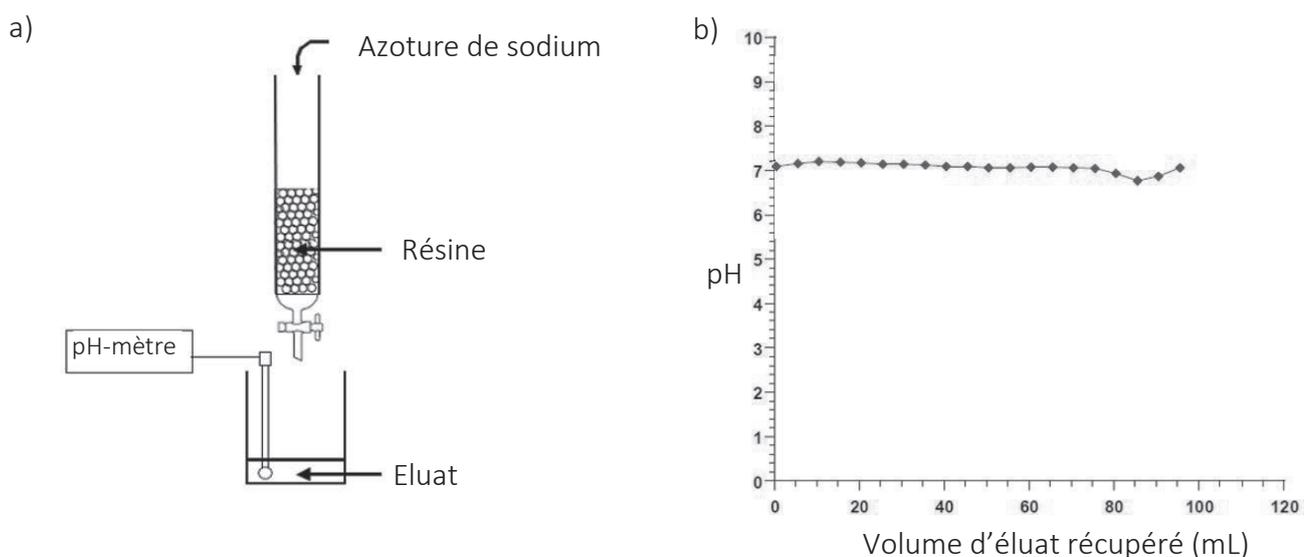


Figure 2 – Passage de la solution d'azoture de sodium sur la résine échangeuse d'ions (figure a)) et suivi du pH de l'éluat (figure b))

- 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).

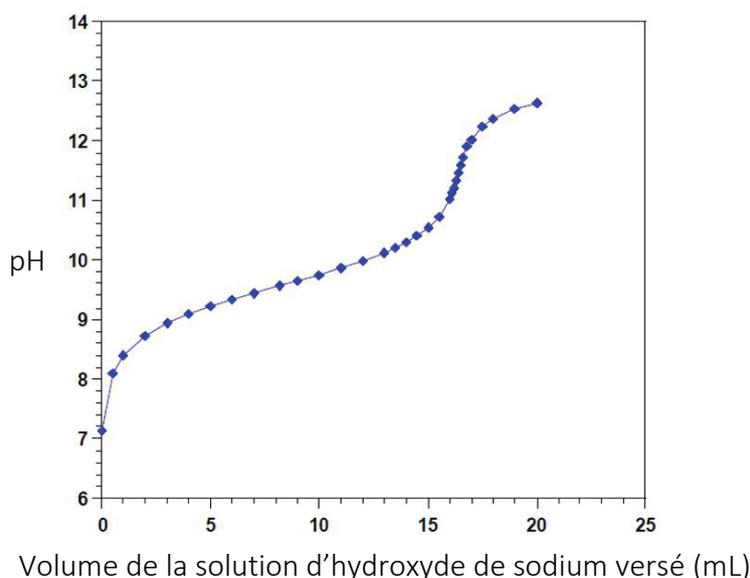


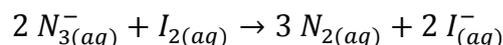
Figure 3 – Titration de 10,0 mL d'éluat par une solution d'hydroxyde de sodium à $C_B = 1,00$ mol.L⁻¹

- 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 $V_{I2} = 100,0$ mL de diiode à $C_{I2} = 5,0 \cdot 10^{-2}$ 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 $V_{éq} = 11,0$ 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 azote 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.

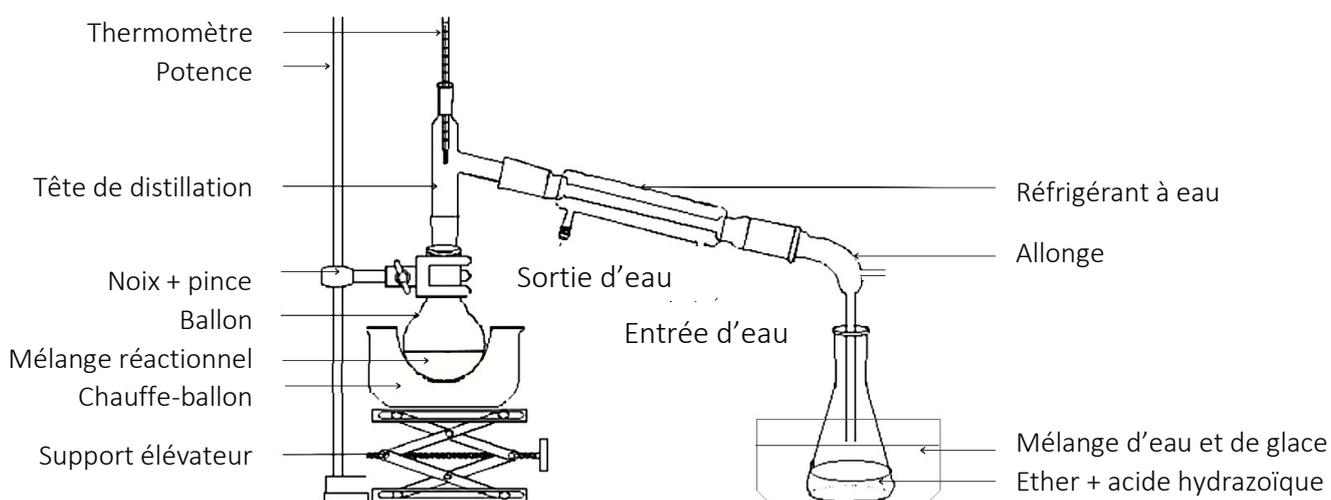


Figure 4 – Schéma du montage de l'étape 4

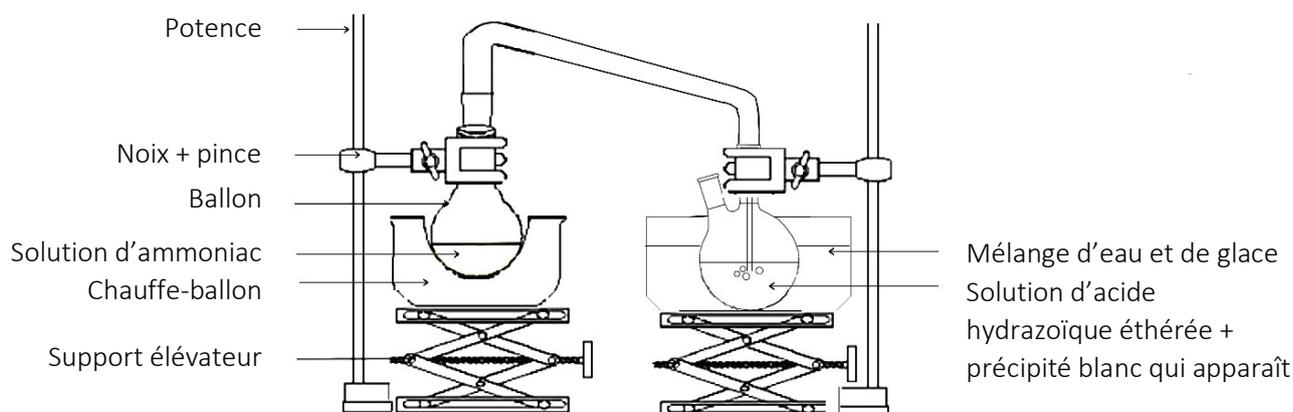
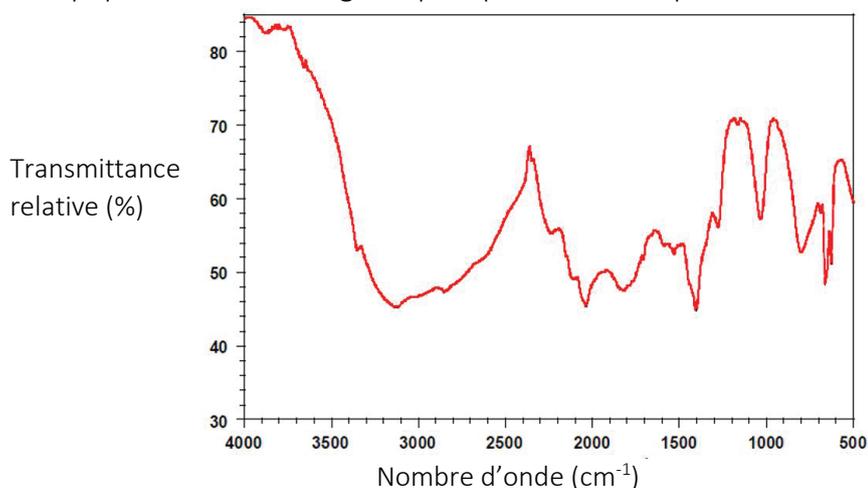


Figure 5 – Schéma du montage de l'étape 5

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.

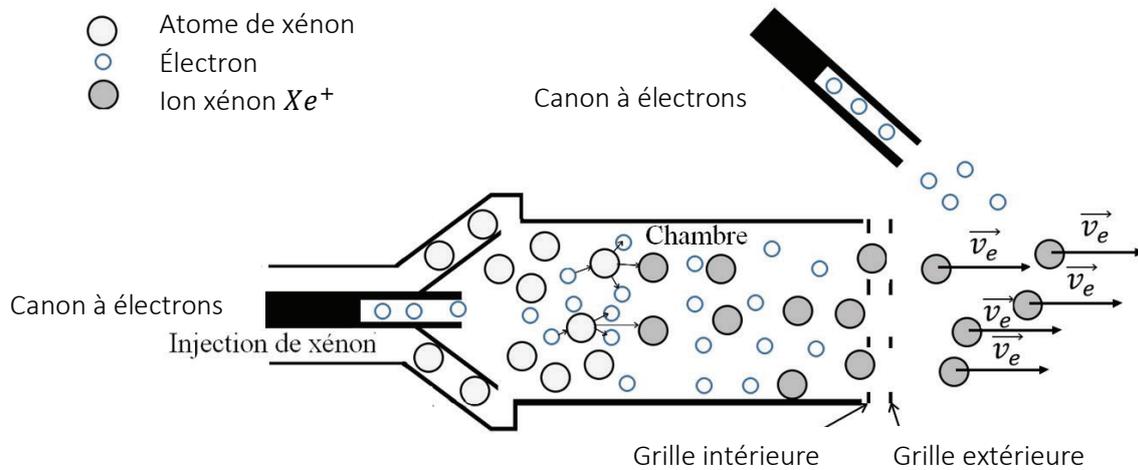


Figure 7 - Schéma du principe de fonctionnement simplifié d'un propulseur ionique



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

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

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.

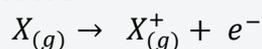
- 57) Quelle différence de potentiel $\Delta V = V_p - V_N$ doit être appliquée entre les deux grilles pour que les ions $Xe_{(g)}^+$ de vitesse négligeable à l'entrée de ces grilles aient une vitesse avoisinant les 30 km.s^{-1} en sortie de ces grilles ? Effectuer l'application numérique.
- 58) Quel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

II. Le choix du xénon

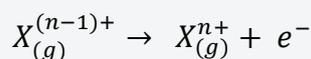
Les premiers tests effectués par les États-Unis et l'URSS dans les années 1970 sur les propulseurs ioniques ont été effectués avec du mercure et du césium, mais ces derniers ont tendance à être corrosifs pour certaines parties du moteur.

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

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

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

- 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.

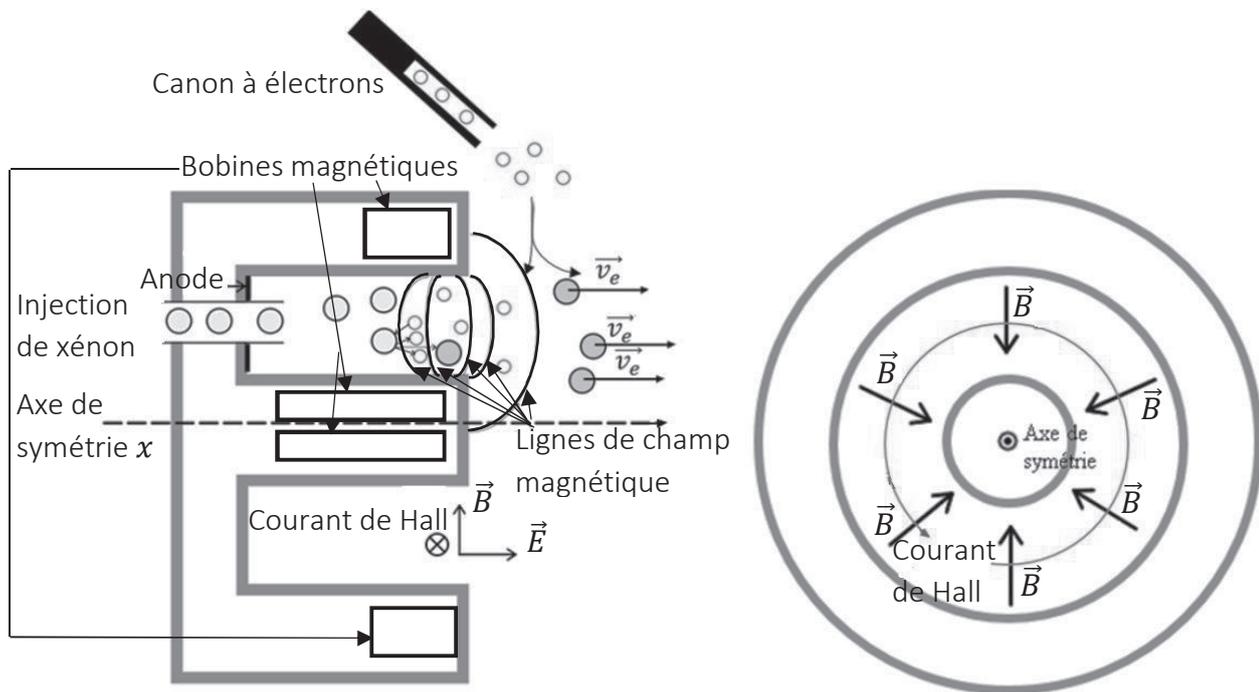


Figure 9 - Schéma du principe de fonctionnement simplifié d'un propulseur à effet Hall (vue de profil – vue de face)

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.

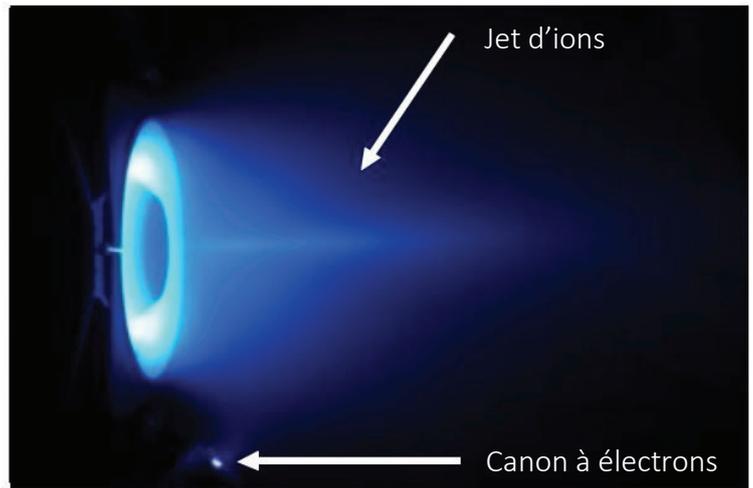
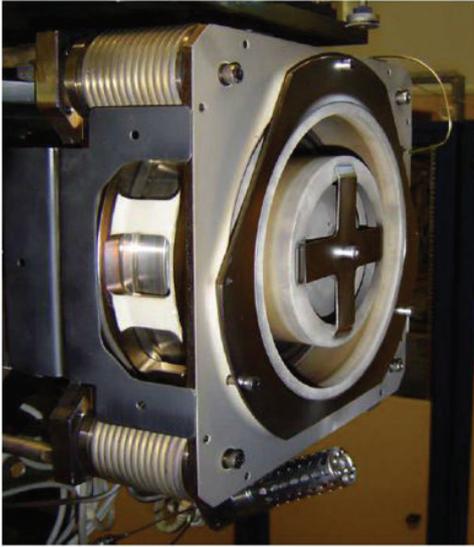


Figure 10 - Photo d'un propulseur à effet Hall et jet d'ions observable sur le banc d'essai

Document 12 : Force magnétique

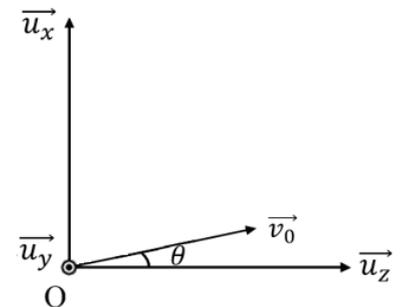
Une particule chargée de masse m , de charge q , de vecteur vitesse \vec{v} , plongée dans un champ magnétique \vec{B} est soumise à la force magnétique :

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

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.

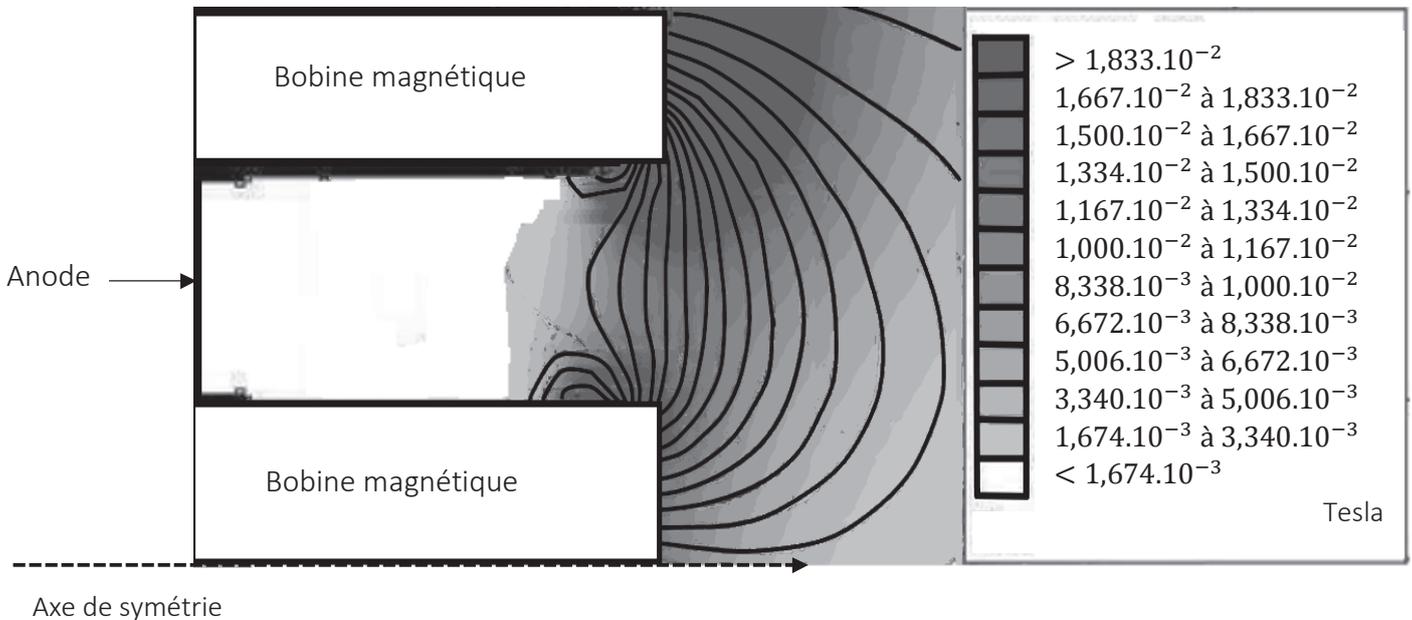


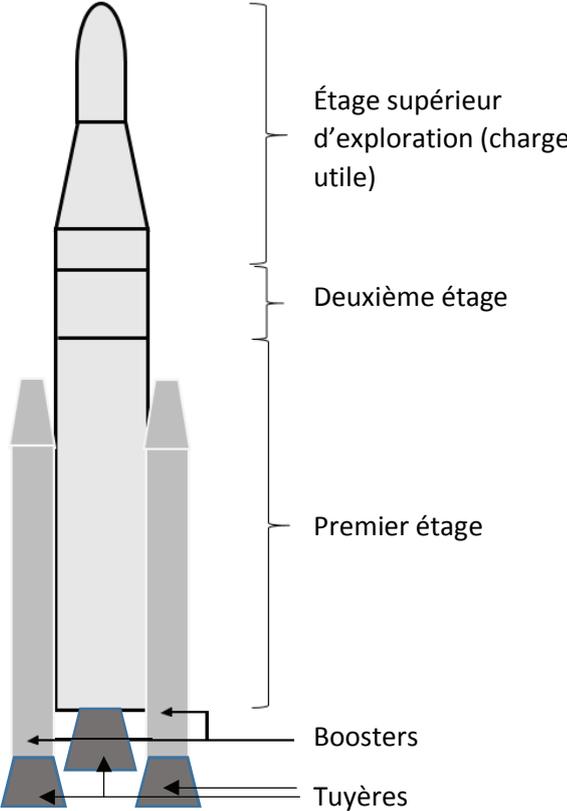
Figure 11 – Lignes de champ et intensités du champ magnétique dans un propulseur à effet Hall
(d'après la thèse de Claude Boniface)

- 68) Dans quelle zone du propulseur le champ magnétique est-il le plus intense ?
- 69) À l'aide du tableau 2 page 13, 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	

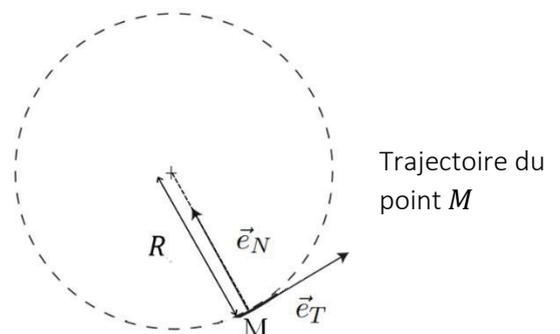
Accélération du point matériel en repère de Frenet

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

\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.



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 : $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$.

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 : $K_{A1}(NH_4^+ / NH_3(aq)) = 9,2$

$K_{A2}(HN_3(aq) / N_3^-(aq)) = 4,7$

pH d'une eau pure à 25°C : $pH = 7,0$.

Masses molaires atomiques

Élément	H	C	N	O	Na	Xe
Masse molaire atomique (g.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 : $32,05 \text{ g.mol}^{-1}$ Masse volumique : $1,0011 \text{ g.mL}^{-1}$ Apparence : liquide fumant et huileux, incolore à odeur d'ammoniac Risques :</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">     </div>	<p>Nitrate d'hydroxylammonium</p> $\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}-\text{N}^{\oplus}-\text{O}^{\ominus}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array} \quad \begin{array}{c} \ominus \text{O}^{\ominus}-\text{N}^{\oplus}-\text{O}^{\ominus} \\ \\ \text{O} \end{array}$
<p>Éther Liquide incolore très volatile de température d'ébullition égale à $34,6 \text{ }^\circ\text{C}$ à pression atmosphérique et de température de fusion de $-16 \text{ }^\circ\text{C}$, de formule topologique :</p> $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_3$	<p>Ammoniac À température et pression ambiante, c'est un gaz incolore à odeur piquante. Il est suffocant à haute concentration.</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 $339 \text{ }^\circ\text{C}$.</p>
<p>Acide hydrazoïque C'est un acide faible de température d'ébullition égale à $35,7 \text{ }^\circ\text{C}$ 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) :**
 $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$