

Physique 2

Présentation du sujet

Après avoir plongé dans l'infiniment petit en 2021, nous prenons de la hauteur cette année, avec un sujet qui s'intéresse à l'exploration martienne, et plus exactement à un des nombreux projets de la NASA envisageant une exploration humaine de la planète rouge.

Dans un premier temps, les modalités du voyage sont étudiées. Faisant essentiellement appel à la mécanique de première année, cette approche nécessite des connaissances élémentaires du programme, mais également du bon sens afin de suivre la logique proposée, en particulier à l'occasion de la question ouverte.

Dans une seconde partie, le sujet s'intéresse au projet NERVA (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application), utilisant la propulsion nucléaire lors des phases d'insertion sur les trajectoires de transfert. Le sujet, bien documenté, invite le candidat à une étude dynamique du vaisseau, avant de se pencher sur les aspects thermodynamiques, pour finir par l'étude de la tuyère, en cherchant à justifier sa géométrie. Cette seconde partie évalue donc essentiellement des compétences acquises au cours de la deuxième année de classes préparatoires, chaque sous-partie s'ouvrant sur des questions de cours.

De nombreuses données sont proposées dans le document réponse joint à l'énoncé, ainsi que deux annexes relatives à quatre questions de la première partie.

Analyse globale des résultats

S'il est toujours délicat d'analyser globalement une situation à partir de 3500 copies différentes, il paraît néanmoins possible d'affirmer que le sujet a révélé un certain nombre de difficultés.

Alors que la première partie est essentiellement relative au programme de PCSI, et que la seconde s'appuie majoritairement sur celui de PC, le jury peut déplorer que les bases du programme de première année sont plus difficilement restituées. Si cela est souvent le cas, le jury est conscient que les conditions de travail de ces deux dernières années ne sont certainement pas étrangères à la situation actuelle, et ne souhaite absolument pas en tirer d'autres enseignements hâtifs. Il note d'autre part que les bilans, qui constituent une approche fondamentale du programme de deuxième année, sont rarement traités avec le soin idoine.

Il a notamment constaté une bonne volonté manifeste de la plupart des candidats, s'efforçant de remplir de nombreuses copies, alors même que le sujet n'était absolument pas maîtrisé. Si la non maîtrise de certains concepts physiques est regrettable, il apparaît tout aussi important de noter la pauvreté de certains raisonnements mathématiques : sans faire référence à des notions qui peuvent paraître compliquées, le jury déplore que bon nombre d'étudiants ne soient pas en mesure de placer un angle sur un cercle, confondant régulièrement $3\pi/2$ et $3\pi/4$. Dans le même registre, l'usage des puissances (déduire x de x^a) s'est avéré être un obstacle insurmontable pour un bien trop grand nombre de candidats.

Le jury constate également une explosion de « raisonnements/démonstrations » basés sur des analyses dimensionnelles. Si ce type de raisonnement est à favoriser lorsqu'il s'agit d'appréhender un concept délicat, il convient de rappeler qu'il ne s'agit nullement d'une démonstration à part entière, mais d'une première approche facilitatrice, qui peut parfois s'avérer incomplète, voire aboutir à des résultats faux.

Il est important également de souligner l'attention portée aux questions ouvertes : au nombre de 5 sur 46, elles représentent un peu plus de 20 % du barème. Il va sans dire que le jury y a été particulièrement attentif et s'est efforcé d'évaluer les différentes compétences développées à cette occasion.

Il est également important de souligner l'importance des applications numériques dans ce sujet. Étant très concret, ces applications numériques devaient permettre de lui donner tout son sens et ne devaient donc pas être négligées. Si le jury a été bienveillant sur le nombre de chiffre significatifs, il a toutefois apprécié une certaine mesure dans leur utilisation.

Enfin, le malus de présentation a concerné moins de 5 % des copies, ce qui révèle une attention réelle à la forme de la copie rendue : le jury tient à remercier les étudiants pour cette marque de respect qui sera utile à tout ingénieur. Il demande la plus grande vigilance toutefois dans l'usage d'acronymes, en particulier lorsqu'ils ne sont que peu utilisés. Par exemple, « ip1 » pour « infiniment petit d'ordre 1 » a été peu mais régulièrement rencontré ; un scientifique se doit d'être compris de tous et rester vigilant sur les mots qu'il emploie.

Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

I Le voyage entre la Terre et Mars

I.A – Vitesse de la Terre et de Mars dans le référentiel héliocentrique

Q1. Comme cette question ne demande que de donner les dimensions et l'unité, le jury a fait preuve de bienveillance face à la multiplicité des notations. Il note toutefois que certaines écritures mêlant dimensions et grandeurs peuvent s'avérer notoirement fausses et invite les candidats à davantage de cohérence.

Q2. Il est attendu ici un théorème (ou une « loi » !) du moment cinétique explicite ainsi que la particularité de la force étudiée, qu'elle soit nommée « force centrale » ou que sa direction soit explicite. Notons qu'un dessin donnant la direction de la force peut suffire.

Q3. Cette question a été particulièrement mal rédigée. Alors qu'il s'agit d'une question de cours, bon nombre de candidats partent du résultat, supposant \vec{OM} selon \vec{e}_r , et invalidant ainsi toute démonstration ultérieure. Au détour de cette question, le jury tient à rappeler l'intérêt de la sémantique en physique : si la constante des aires avait pris tout son sens, certains candidats ne l'appelleraient pas « constante de l'air » par exemple. Cela éviterait que le candidat erre, comme il le dit d'ailleurs parfois, sans le savoir.

Q4. Une simple relation fondamentale de la dynamique (qui peut recevoir bien d'autres dénominations !) permet de conclure. Notons que si des variables sont mentionnées, elles ne doivent pas apparaître coute que coute dans le résultat final.

I.B – Aspect énergétique et troisième loi de Kepler

Q5. Lorsqu'une question demande de déduire une expression, il ne peut s'agir en aucun cas de donner un résultat sans aucune explication. Certains commentaires relèvent avec étonnement une énergie mécanique négative. Le jury invite tout préparationnaire à s'interroger sur le sens du signe de l'énergie mécanique pour un mouvement newtonien.

Q6. Plusieurs méthodes sont envisageables dans cette question, mais là encore le candidat doit réaliser qu'il est invité à aller un tout petit peu au-delà d'une simple écriture brute de la troisième loi de Kepler, parfois incorrecte, voire inhomogène.

I.C – Voyage aller Terre – Mars

Q7. Les deux tiers des candidats se sont trompés sur cette question, imaginant une orbite de transfert entre 0 et $\pi/2$. Il va sans dire que cette méprise révèle de sérieuses lacunes et augure mal de la suite de cette étude.

Q8. Cette question a sans aucun doute été l'une des moins bien traitées, relativement au nombre de candidats qui l'ont abordée : si 70 % des candidats se sont attelés à cette question, près de 80 % d'entre

eux n'obtiennent pas de points. En effet, ayant l'habitude de travailler avec des orbites circulaires, le passage à une orbite elliptique constitue pour la majorité une difficulté insurmontable. Beaucoup n'ont pas compris que le passage de l'orbite circulaire à l'orbite elliptique nécessitait un apport d'énergie et qu'on ne pouvait pas écrire une conservation de l'énergie mécanique.

Q9 et Q10. Ces deux questions étant dans la suite logique de la **Q8**, elles sont peu abordées et le plus souvent mal abordées. Pourtant, le simple bon sens permet d'engranger la majorité des points. Nous invitons vraiment les candidats à s'interroger sur la deuxième loi de Kepler afin de mieux appréhender cette évolution de la vitesse au cours d'un orbite de transfert : ainsi rechercher « la » vitesse d'un mouvement elliptique devient impossible.

Notons que le jury a fait preuve de mansuétude en évitant toute « double peine » : un candidat qui se serait trompé sur **Q8** mais qui aurait suivi un raisonnement cohérent dans ces questions s'est vu attribuer les points malgré une application numérique fausse.

Q11. Cette question est également peu abordée, mais le jury apprécie la prise de recul de certains candidats notant combien la planète rouge porte bien son nom de par la combativité qu'il faudrait aux astronautes pour arriver à leurs fins.

I.D – Durée de la mission

Q12. Là encore, beaucoup de difficultés à trouver le bon angle.

Q13. Cette question ouverte, sans nul doute la plus exigeante de l'épreuve, a fait preuve de la plus grande vigilance de la part du jury. Ce dernier déplore que les deux tiers des candidats n'aient pas abordé cette question. Afin de privilégier le raisonnement au calcul, les compétences « communiquer », « analyser » et « réaliser » ont été évaluées, en ayant à cœur de valoriser tout raisonnement construit, même s'il n'aboutit pas à un résultat tangible. Plusieurs portes d'entrée sont envisageables, mais force est de constater que le plus difficile est d'entrer. Une des étapes clé pour aborder un problème ouvert est de poser un ou plusieurs symboles qui représentent les grandeurs physiques recherchées ou utiles au raisonnement. Le jury constate que cela ne fait pas partie des réflexes des candidats. Suivre le raisonnement d'un candidat est souvent ardu lorsqu'il s'agit d'une juxtaposition de phrases : il ne doit pas négliger la force des schémas.

Q14. À priori, cette question ne demande qu'à placer un point, donné, sur un cercle, soit d'être capable de déterminer où figure $3\pi/4$. Malheureusement, cette demande représente pour certains un réel obstacle.

Q15. Cette question peut être abordée de plusieurs manières. De par sa position elle est assez peu abordée.

Q16. La relation donnant l'excentricité étant donnée, de nombreux candidats savent la retrouver et la calculer. Concernant le tracé des trajectoires, le jury tient tout de même à rappeler que les données permettent de savoir que, quoiqu'il en soit de la valeur numérique, le candidat doit aboutir à une conique, ce que certains semblent ignorer, allant parfois jusqu'à modifier les orbites de la Terre et de Mars pour que ces dernières conviennent à leur tracé : une telle attitude, heureusement minoritaire, inquiète le jury.

Q17 à Q21. Cette partie n'est que très peu abordée par les candidats : seuls les tout meilleurs ont su appréhender cette nouvelle trajectoire.

II Le projet NERVA (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application)

II.A – Étude dynamique

Q22. De très nombreux candidats, ayant décroché sur la partie mécanique, reconnaissent dans cette question une question de cours, et s'attellent au bilan qui leur est donné. L'énoncé définit avec soin le système et l'étude à mener, le jury s'attend dès lors à trouver des études de belle facture. Il s'avère qu'il est, dans la grande majorité des cas, extrêmement déçu : le simple fait de définir la quantité de mouvement $\vec{p}(t + dt)$ semble insurmontable à plus de 80 % des candidats : certains oublient qu'il y a des

gaz qui s'échappent, d'autres que \vec{v}_1 est une vitesse relative, et beaucoup confondent allègrement vecteurs et scalaires, ce qui occasionne des erreurs en cascade. Le jury se permet de noter également qu'il signale régulièrement, dans ses rapports, que le mot gaz est invariable.

Q23. Il semblerait que de nombreux étudiants ne comprennent pas que le verbe « établir » appelle une démonstration, et non une simple analyse dimensionnelle, qui certes permet d'obtenir l'attribution des points dévolus à la valeur, mais pas ceux prévus pour la démonstration, particulièrement simple pourtant.

Q24 et Q25. Ces deux questions font peur à la majorité des candidats, alors qu'ils ont rencontré maintes fois des situations similaires où la séparation des variables permet une résolution simple.

II.B – Approche thermodynamique

Q26. Là encore, nombreux sont les candidats à reconnaître une question de cours, mais nombreux aussi sont ceux qui confondent système ouvert et système fermé, énergie cinétique et variation d'énergie cinétique, voire soustraient les enthalpies de changement d'état et de changement de température. Nous les engageons à rechercher la cohérence de leur propos.

Q27. Cette question est mal comprise par une majorité de candidats, qui s'imagine qu'on leur demande de vérifier le calcul donné, alors qu'il est simple de vérifier la valeur de la force, compatible avec les données de l'énoncé.

Q28. Si le début de cette question est souvent bien traité, le jury tient à rappeler que lorsqu'il est demandé au candidat une comparaison, il ne doit pas se satisfaire d'un « très petit » ou « très grand », mais est tenu de comparer sa valeur à une valeur de référence.

II.C – La tuyère

Q29. La réponse à cette question est immédiate. Majoritairement bien traitée, certaines relations surprises apparaissent toutefois régulièrement.

Q30. Si la valeur de K est majoritairement bien trouvée, le jury tient à l'occasion de cette question à rappeler aux candidats que, lorsqu'une relation finale est donnée, il convient de porter un soin particulier à sa démonstration. Beaucoup de négligences sur l'expression des vecteurs conduisent ici à des relations notoirement fausses. L'opérateur $\vec{v} \cdot \text{grad}$ appliqué à \vec{v} est très mal compris. C'est un opérateur scalaire qui agit sur le vecteur vitesse.

Q31. Si cette question ne présente pas de difficulté, un nombre non négligeable de candidats s'emmêle malencontreusement dans les puissances.

Q32 et Q33. Ces questions nécessitent une certaine vigilance. Le jury apprécie le soin apporté à de tels calculs pour aboutir aux expressions attendues, et note que l'intégration par rapport à P d'un terme tel que $P^{-1/\gamma}$ représente un obstacle mathématique majeur pour beaucoup. Il tient aussi à faire preuve de bienveillance lorsque le candidat obtient une expression fausse mais suit un raisonnement correct : il privilégie alors le raisonnement.

Q34. Cette question était multiple, avec des niveaux de résolution variables. Si très peu ont répondu à tous les items, nombreux sont ceux qui l'ont abordée partiellement.

Q35. Cette question nécessite de la réflexion et il est évident que le candidat qui a dessiné l'allure de $f(\alpha)$ à la question précédente est avantagé ! Si, intuitivement, le candidat devine que la tuyère (3) est correcte, le jury attend une justification, et est très heureux lorsque certains poursuivent sur le cas de la tuyère (2).

Q36. Ici, une simple comparaison des pressions suffit, mais pour cela il est nécessaire d'avoir bien compris l'approche proposée dans les questions qui précèdent.

Q37. Très nombreux sont les candidats qui ont traité cette question, proche du cours. Toutefois, si le premier item est le plus souvent correct — quoique l'approximation acoustique soit souvent expliquée de façon très approximative — la seconde partie laisse apparaître des valeurs très fantaisistes allant jusqu'à 1011 Pa !

Q38. La majorité des candidats sait résoudre cette question de cours. Mais, identifiée comme telle, elle doit faire l'objet d'une attention particulière, ce qui n'est malheureusement pas toujours le cas. On note régulièrement des soucis de signe ou de notation — en particulier en ce qui concerne la confusion entre d et ∂ ou l'usage de l'opérateur divergence (non obligatoire puisqu'un traitement unidimensionnel suffisait) — qui s'évaporent par miracle lorsqu'il s'agit d'écrire l'équation de d'Alembert : cet état d'esprit laisse le jury particulièrement amer.

Q39 et Q40. Ces questions, liées, ne présentent pas de difficultés particulières dès lors qu'elles sont résolues avec soin, et permettent de déduire facilement le type d'écoulement étudié.

Q41. Si les relations de Laplace offrent une résolution efficace, l'identification avec le premier principe n'est qu'exceptionnellement révélée. Notons, comme précédemment, des modifications plus ou moins discrètes afin d'aboutir à la relation donnée : le jury sanctionne cette attitude.

Q42 et Q43. Les applications numériques demandées à l'occasion de ces questions permettent de mieux comprendre le fonctionnement et l'intérêt de la tuyère de Laval : le jury regrette que seuls 2% des candidats aient la satisfaction intellectuelle de déduire des observations précédentes que le nombre de Mach est unitaire au col.

Q44. Un calcul sans difficulté permet d'aboutir à la relation recherchée, mais placée en fin de problème, cette question a été très peu abordée.

Q45 et Q46. Ces questions permettent de faire le lien entre les résultats obtenus et les schémas de la NASA. Le candidat parvenant à établir la correspondance entre ses calculs et la figure se voyait récompensé de ses efforts. Le jury est sensible à tout candidat sachant utiliser à bon escient le diagramme de phases qui lui est fourni.

Conclusion

Au terme de ce tour d'horizon complet ; il convient de rappeler que si nous avons égrainé, au fil des questions, les erreurs les plus souvent rencontrées par le jury, ce dernier a aussi apprécié les nombreuses copies de bonne facture régulièrement découvertes, et en félicite les auteurs. Globalement, quelle que soit la production du candidat, il tient à féliciter chacun pour l'abnégation dont il a dû faire preuve, au cours de ces deux années, pour arriver jusqu'aux écrits des concours, et lui rappelle que le résultat d'une épreuve de concours n'est que le reflet, à un instant t , de ses connaissances inhérentes à ce sujet, et en rien une valeur intrinsèque liée à ce préparationnaire. Nous tenons également à remercier chacun des enseignants, qui a donné beaucoup de son énergie et de ses compétences pour amener chacun des candidats à ce stade, dans des conditions parfois très exigeantes et inédites.

Aux préparationnaires qui liront ce rapport en vue des éditions ultérieures, le jury tient à faire passer le message qu'une préparation sérieuse se doit d'être réalisée sur deux années afin qu'elle soit gage de réussite. Il souligne la volonté de bienveillance qui l'anime, mais demande au candidat de prendre le temps de lui expliquer sa démarche, dans la plus grande clarté possible : ce passage de la compréhension pour soi à la compréhension pour autrui est un point de départ essentiel pour son métier ultérieur. Cette démarche s'accompagnera forcément d'échecs, que ce soit au cours des années ou au cours de l'épreuve. Le jury l'invite à les aborder avec clairvoyance et bon sens : chaque obstacle surmonté est un pas de plus vers le succès, et l'honnêteté intellectuelle dont il fera preuve sera appréciée.

Comme il est toujours bon de prendre un peu de hauteur, mais que le faire en allant sur Mars la bien nommée s'avère être un rude combat, faisons-le à l'ombre de sages qui nous ont précédés, tel que Michel

Serres : « Qui attend l'inspiration ne produira jamais que du vent, tous deux aérophagiques. Tout vient toujours du travail, y compris le don gratuit de l'idée qui arrive ».