

1/ REMARQUES GÉNÉRALES

Le sujet portait sur la physique des aéronefs, traité du point de vue de la mécanique du vol, des instruments de mesure embarqués, et de la propulsion par les réacteurs. Il était assez long, mais quelques très bons candidats sont parvenus à en aborder la quasi-intégralité. Il alternait entre questions de cours et questions de réflexion, questions qualitatives et de calcul, analyse de documents. Cette variété de questionnement a permis à la majorité des candidats de s'exprimer, avec souvent des contrastes très nets dans une même copie selon la partie abordée, preuve que des candidats ayant des qualités différentes ont pu les montrer à travers cet énoncé. Il est d'ailleurs intéressant de noter qu'à l'exception de la partie III.3., véritablement plus difficile que les précédentes, toutes les parties du sujet ont été également abordées, avec à chaque fois une proportion notable de candidats ayant été capables de produire des réponses cohérentes sur un enchaînement de questions.

Il faut toutefois reconnaître que le sujet s'est révélé difficile pour une frange importante des candidats du niveau du concours CCINP. Plus que les quelques copies très faibles rencontrées au cours de la correction, c'est avant tout les réponses aberrantes fréquemment lues dans des copies moyennes qui montrent que bien peu de candidats ont saisi le contenu physique du problème qui leur était soumis.

Dans ce sujet, une proportion significative de questions appelait une réponse rédigée autrement que par un calcul. On constate qu'une fraction importante des candidats a de grosses difficultés de rédaction : syntaxe approximative, absence de logique dans l'enchaînement des arguments, considérations hors-sujet, sans parler des copies dans lesquelles les portions de réponse sont à retrouver au milieu de nombreuses ratures. Si les éléments de correction langagière ne sont pas évalués en tant que tels, ils influent positivement ou négativement dans l'appréciation du correcteur, et peuvent faire pencher la balance lorsque la réponse fournie n'est que partiellement complète ou justifiée. Les candidats doivent s'entraîner à **faire preuve de concision** dans leurs réponses, en allant à l'essentiel mais sans oublier d'argument-clé. Ils doivent en outre s'assurer de répondre à la question posée, en respectant le cadre qui est imposé. Par exemple, refaire la démonstration complète du théorème de Bernoulli à partir de l'équation d'Euler est une perte de temps lorsque la question ne le demande pas. Répondre à une question fondée sur un document de l'énoncé sans s'appuyer sur ce document ne peut conduire à l'attribution de points. Cette année, aucune question n'était véritablement calculatoire. On a donc été peu confronté à des pages de calculs stériles et inhomogènes. Par contre, les égalités scalaire/vecteur ou entre une grandeur élémentaire et une grandeur finie restent fréquentes. La plupart des candidats manquent de rigueur dans la mention des hypothèses permettant de démarrer ou de simplifier un calcul : un résultat final, même juste, ne suffit pas à obtenir l'intégralité des points.

La partie I du sujet s'est révélée piégeuse pour des candidats qui avaient sans doute, au cours de leur année de préparation, abordé des notions relatives à la physique des ailes d'avion (qui n'est pas au programme de la filière PC) : au lieu d'analyser précisément les documents qui étaient mis à leur disposition, ils ont tenté de se référer à des souvenirs plus ou moins précis sur ce sujet, et sont passés à côté de l'analyse qui leur était demandée en se fondant uniquement sur les outils du programme.

Enfin, l'énoncé introduisait pour la première fois une question du type « résolution de problème » (Q16). Plus qu'un résultat, les correcteurs testent avant tout la capacité du candidat à construire une démarche de façon autonome. Il est donc impératif de se rendre compréhensible : présenter le cadre de la modélisation, définir les notations introduites, expliciter les hypothèses effectuées. Les tentatives de résolution ne respectant pas ces conditions minimales se révèlent inévaluables. Cette question a permis

d'effectuer un tri entre ceux qui posaient un cadre pertinent pour traiter le problème et ceux qui partaient dans des directions sans rapport avec la question (réacteur modélisé comme une fusée, description de la phase de montée vers l'altitude de croisière et non de la phase de décollage sur la piste...). L'estimation des valeurs numériques non fournies (durée de la phase d'accélération sur la piste, longueur d'une piste de décollage...) était considérée avec une grande marge de tolérance, les candidats n'étant pas des spécialistes de l'aéronautique. L'impossibilité à modéliser les frottements de façon précise lors de la phase de décollage (qu'il s'agisse de la force de traînée quadratique, ou des frottements de roulement) devait conduire le candidat à critiquer la modélisation effectuée et le résultat obtenu. C'est à cet effet que la finesse de l'avion au décollage avait été fournie. Certains ont choisi de l'utiliser pour obtenir un ordre de grandeur des frottements fluides : cette démarche, si elle était correctement explicitée, était acceptable. En résumé, cette résolution de problème, qui représentait presque 8 % du barème, a permis à de bons candidats de se distinguer. D'autres, probablement peu familiers de ce type d'exercice, y ont en revanche passé beaucoup de temps pour une valorisation modeste. Nous recommandons donc aux futurs candidats de s'exercer aux résolutions de problème pendant l'année. À défaut, il est sans doute préférable que les candidats se consacrent prioritairement aux questions plus classiques de l'énoncé.

Il est à noter qu'il y a eu très peu de copies non soignées aussi la grande majorité des étudiants a obtenu la note maximale au bonus. Pour les prochaines sessions du concours, il importe de maintenir la qualité de présentation des copies et d'améliorer leur rédaction (la communication écrite est au cœur du métier d'ingénieur). Enfin, il ne faut pas utiliser de sigles dans les copies surtout s'ils sont relativement obscurs : PHIS, LQM, BAME...

2/ REMARQUES SPÉCIFIQUES

Q1 : Peu de définitions exactes. Beaucoup assimilent les lignes de courant aux trajectoires des particules de fluide, ce qui n'est vrai qu'en régime stationnaire.

Q2 : Relativement peu de réponses entièrement satisfaisantes. La déviation des lignes de courant n'est pas à elle seule un argument permettant de conclure à l'existence d'une force de portance. On attendait une justification de la variation de la vitesse du fluide sur l'extrados en faisant appel à la conservation du débit volumique, puis une justification en retour de la diminution de la pression en utilisant le théorème de Bernoulli. Certains candidats ont invoqué avec raison l'effet Venturi.

Q3 : Souvent bien traitée lorsque la Q2 est comprise. L'identification des courbes peut toutefois être fausse car tous les candidats n'ont pas remarqué que l'axe des C_p était gradué vers le bas.

Q4 : Question assez peu traitée, mais lorsqu'elle l'est, la réponse est correcte.

Q5 : Bien dans la majorité des copies. Les réponses données en unités SI sont comptées justes, conformément aux préconisations des programmes de CPGE. Rappelons que la notation dimensionnelle d'une grandeur sans dimension est 1, et non 0 ou l'ensemble vide.

Q6 : Les justifications ne se fondent que trop rarement sur le document présenté. Quand elles le sont, elles ne font pas toujours mention de la *différence* des C_p .

Q7 : De nombreuses réponses fausses liées au fait que l'expression de l'énoncé définissait C_z en fonction de F_z , si bien que la surface de référence se trouvait au dénominateur. C'est bien F_z et non C_z qu'il s'agit de maximiser au décollage.

Q8 : Une question *a priori* simple, mais qui révèle le manque de sens physique de beaucoup de candidats. La force de traînée est souvent « compensée par la vitesse », voire par les forces de frottements !

Q9 : des candidats invoquent le fait que le poids diminue avec l'altitude, ce qui n'est certes pas faux, mais négligeable à cette échelle, et sans rapport avec la question posée.

Q10 : Les forces de portance et de traînée ont des directions relatives à l'orientation de l'avion : elles ne sont donc pas forcément verticales et horizontales. Schéma souvent faux ce qui conduit à une expression de la finesse fausse. Peu d'interprétation physique de la finesse convaincante : souvent les candidats se

contentent d'exprimer littéralement l'expression de f en fonction des distances (« c'est le rapport entre ... et ... »).

Q11 : Certains candidats placent de façon malhonnête le minimum de C_x au croisement de l'axe des abscisses : cela conduit le correcteur à douter de la justesse du raisonnement lorsqu'on demande de repérer le point de trainée minimale. Le positionnement du point de finesse maximale n'est quasiment jamais justifié.

Q12 : L'angle d'incidence est souvent assimilé à l'angle α défini pour interpréter la finesse (Q10) et non à l'angle i , défini figure 1 et étudié figure 5. Les justifications sont alors baroques.

Q13 : Le résultat attendu est souvent donné, mais la loi de composition des vitesses qui le justifie est très rarement mentionnée.

Q14 : Des candidats trouvant des angles de dérive proches, voire supérieurs à 90° , ne semblent pas perturbés outre mesure par leur résultat !

Q15 : Question très rarement bien traitée, du fait que la loi de composition des vitesses n'est pas écrite. Beaucoup de candidats se contentent d'écrire la vitesse de l'avion sous la forme $V_a \cos(\theta)$. D'autres interprètent mal l'énoncé, et pensent que le vent s'oppose au mouvement de l'avion à l'aller et au retour. L'absence de réflexion sur les chiffres significatifs ne permet qu'à très peu de candidats de conclure que le temps gagné sur le trajet retour ne compense pas tout à fait le temps perdu sur le trajet aller (ce qui n'a toutefois pas été sanctionné). Quoi qu'il en soit, l'absence trop fréquente d'expression littérale empêche le correcteur de contrôler la justesse du raisonnement.

Q16 : cf. *supra*

Q17 : F étant un point d'arrêt, la ligne de courant ne doit pas rentrer dans le tube de Pitot.

Q18 : Question très mal traitée : les candidats se contentent d'écrire les relations de Bernoulli sur chaque ligne de courant, mais sans les simplifier alors que l'énoncé imposait explicitement les variables dont devaient dépendre les deux vitesses et les deux pressions. Les hypothèses du théorème de Bernoulli doivent être rappelées : la plupart des candidats le font spontanément, mais attention à ne pas oublier l'hypothèse stationnaire.

Q19 : La relation est généralement correcte, mais il faut la démontrer à partir de la loi de la statique des fluides. Utiliser la relation de Bernoulli entre les points H et I n'est pas très avisé, surtout lorsque le candidat omet de préciser que les vitesses en H et I sont nulles !

Q20 : Quelques candidats « se rattrapent » et donnent ici certains résultats demandés à la Q18. Certains donnent la bonne expression, mais semblent la sortir de leur mémoire (ou de leur calculatrice ?) sans justification.

Q21 : Cette question de cours a permis de juger de la rigueur de raisonnement des candidats. Rappelons les étapes-clés attendues :

- analyser explicitement les symétries (préciser les plans de symétrie) et invariances (préciser par quelles translations ou rotations et selon quelles directions ou autour de quel axe), et ne pas mélanger les conséquences de ces deux analyses ;
- définir la surface de Gauss en la représentant sur un schéma ;
- appliquer le théorème de Gauss : ici, mentionner la symétrie vis-à-vis du plan de charge est indispensable pour exprimer correctement le terme de flux ;
- donner par analogie le champ électrique produit par le plan de charge de signe opposé ;
- appliquer le théorème de superposition et conclure.

Des erreurs et imprécisions ont été constatées à tous les niveaux de ce raisonnement. En particulier lors de l'application du théorème de Gauss, la distinction des trois surfaces d'intégration n'est pas toujours bien conduite : l'orientation relative du champ électrique et des vecteurs surface est presque toujours passée sous silence.

Enfin, précisons que les plans de symétrie mentionnés pour déterminer l'orientation du champ électrique doivent contenir le point M courant. Le plan (xOz) , par exemple, n'est pas correct.

Q22 : Les questions d'algébrisation sont traitées de façon aléatoire, quitte à faire disparaître le déplaisant signe moins apparu au cours du calcul.

Q23 : Les candidats doivent apprendre à rédiger de façon claire et synthétique sur ce genre de questions. Deux arguments principaux sont nécessaires et suffisants pour répondre : a) la présence de glace modifie la permittivité relative du milieu dans lequel passent les lignes de champ, donc la capacité du condensateur varie en fonction de l'épaisseur de glace : mesurer la capacité permet de remonter à cette épaisseur moyennant un étalonnage préalable. b) l'effet de saturation observé nécessite d'utiliser plusieurs capteurs de tailles différentes pour que l'un au moins d'entre eux soit dans sa zone linéaire.

Souvent, les candidats se lancent dans des développements inutiles et hors-sujet. Dire qu'on utilise plusieurs capteurs « pour améliorer la précision » ne répond pas à la question.

Quelques excellents candidats ont souligné le fait qu'on ne se contentait pas d'utiliser un seul grand capteur car les plus petits capteurs avaient une meilleure sensibilité pour les faibles épaisseurs de glace.

Q24 : Mêmes difficultés, en termes de rédaction, que pour la question précédente. L'idée de la mesure est souvent évoquée, bien que de nombreux candidats placent l'émetteur d'ultrasons au-dessus de l'aile et non pas à sa surface. Un schéma correctement légendé éclairait avantageusement le raisonnement.

Q25/Q26 : Un taux de réponses justes bien inférieur à ce qu'on aurait pu attendre. Parmi les erreurs les plus fréquentes, on trouve des expressions du type $(M(t) + \delta m_e)\vec{v}_e$ et $(M(t + dt) + \delta m_s)\vec{v}_s$, ou encore une écriture de la quantité de mouvement du système ouvert sous la forme $M(t)\vec{v}(t)$: cette dernière expression fait intervenir une vitesse $\vec{v}(t)$ dont on devine qu'il s'agit de la vitesse du centre d'inertie du système ouvert, mais cela n'est pas défini dans l'énoncé (et hélas, pas non plus dans la copie des candidats qui l'utilisent).

Q27 : L'hypothèse de stationnarité est utilisée à bon escient dans beaucoup de copies.

Q28 : Les candidats ne réfléchissent pas suffisamment au système sur lequel ils raisonnent. Cela aurait évité l'apparition, dans le même bilan des forces, de $\vec{F}_{\text{avion/air}}$ et $\vec{F}_{\text{air/avion}}$ (la seconde étant négligeable devant la première « car l'air est très léger » !) ou d'une « réaction du support »...

Q29 : Très rares sont les candidats qui parviennent à donner l'expression algébrisée des forces de pression en entrée et en sortie.

Q30 : Seuls les candidats ayant vraiment bien compris les questions précédentes donnent des réponses véritablement satisfaisantes à cette question. Les autres s'appuient sur le sens physique pour tenter de rattraper la situation.

Q31 : Le bon résultat est obtenu dans beaucoup de copies. Par contre, il est beaucoup plus rare d'en voir la justification complète. L'absence de travail utile est liée à l'absence de pièces mobiles dans le diffuseur. Dire qu'il n'y a aucun travail au cours de la transformation révèle une incompréhension du sens du premier principe industriel, et de l'usage de l'enthalpie dans ce principe.

Q32 : Ne pas oublier de préciser que l'air est un gaz parfait pour appliquer les lois de Laplace.

Q33 : Plutôt bien traitée lorsque la question est abordée.

Q34 : Des erreurs de signe qui faussent l'application numérique, et donc celles des questions suivantes.

Q35 : Les températures sont parfois permutées, ce qui donne des racines avec un argument négatif.

Q36 : Question difficile pour la majorité des candidats. Il fallait croiser les résultats de cette sous-partie et de la sous-partie précédente. Quasiment plus aucune application numérique juste à ce stade.

Q37 : Sans surprise vu les difficultés rencontrées aux questions précédentes, on n'obtient presque jamais la bonne valeur du rendement. Toutefois, les commentaires critiques sur la valeur obtenue et la mention de quelques rendements typiques de moteurs thermiques ont été valorisés.

Q38 : Très souvent correctement traité. Le symbole dimensionnel d'une température est Θ , et non K ou

pire, T , qui se confond avec la dimension d'un temps.

Q39 : Quasiment aucun candidat n'a vu que l'écoulement était compressible, bien que l'énoncé indique que la masse volumique est une fonction de x .

Q40 : Quelques très bons candidats ont su croiser à bon escient les informations nécessaires pour conclure, même lorsque leur expression de $G(x)$ était fausse.

Q41/Q42 : Questions parfois traitées, plus par intuition du calcul à partir des indications des questions que par réelle compréhension de la physique du problème.

Q43 : Les candidats se souvenant de l'expression de c_p en fonction de γ ont su répondre à la première partie de la question. L'identification à la célérité du son n'a par contre jamais été traitée correctement.

Q44 : Presque jamais traitée.

Q45 : Presque jamais traitée. Certains ont la notion d'une tuyère convergente-divergente mais bien peu.

3/ CONCLUSION

Le sujet était d'une difficulté tout à fait raisonnable, avec des questions très proches du cours, et faisait appel au bon sens des candidats. Il abordait plusieurs parties du programme des deux années. Il a permis de bien distinguer les candidats avec des copies de bon niveau où le cours de CPGE est compris dans sa majorité et des candidats au niveau plus fragile qui ne maîtrisent pas toujours les bases de raisonnement. Un peu plus de réflexion et de bon sens aurait permis aux candidats d'obtenir de meilleures notes. Il est à noter que les démonstrations de cours ne sont pas suffisamment maîtrisées. Nous invitons les candidats à travailler dans leur ensemble avec plus de rigueur les cas classiques de cours afin d'avoir les outils de raisonnement adéquats à l'analyse de questions plus ardues. La question perpétuelle qu'ils devraient être amenés à se poser **n'est pas** « **comment** on fait ? », ce qui induit souvent un apprentissage fait de recettes de cuisine, **mais** « **pourquoi** fait-on cela ? », ce qui implique alors forcément la compréhension des phénomènes abordés et leur traitement rigoureux.