

Physique

Présentation du sujet

Ce problème porte sur la production d'arcs électriques et sur l'exploration optique des plasmas froids ainsi créés. Il comporte quatre parties totalement indépendantes mais articulées autour de la même problématique. La première partie aborde la création de hautes tensions via un couplage inductif à travers l'étude d'une bobine de Ruhmkorff. Des électrons primaires accélérés dans le champ électrostatique initient l'apparition d'un phénomène d'avalanche qui rend l'air brièvement conducteur. La dynamique de l'étincelle peut être suivie par un capteur optique associé à un montage électronique de traitement pour enregistrer la déviation d'un faisceau laser traversant la zone conductrice. La dernière partie porte sur la validation de l'hypothèse de présence d'un plasma qui modifie légèrement la propagation de l'onde électromagnétique lors de la traversée de l'étincelle. Les thèmes retenus portent sur le programme des deux années de MPSI et MP en abordant des techniques variées relevant de l'induction, de la mécanique du point, de l'optique, de la thermodynamique, de l'électronique et des ondes électromagnétiques.

Analyse globale des résultats

Cette épreuve est globalement bien calibrée en durée et en difficulté. Comme les quatre parties sont abordées de manière très progressive, les très mauvaises copies ont été particulièrement rares. Sans difficulté technique majeure, ce sujet a permis à de nombreux candidats d'aborder des pans entiers du problème. L'amélioration de la qualité de la présentation des copies s'inscrit dans une progression continue depuis plusieurs années. La prise en compte de la précision des résultats numériques mérite d'être améliorée même si elle est globalement satisfaisante. Le barème était réparti de manière équilibrée sur les quatre parties : I (24 %), II(21 %), III(28 %) et IV (27 %). Une analyse en termes de pourcentage de réussite par partie dégage des performances similaires dans les quatre domaines. En moyenne, les candidats ont abordé avec succès les 50 % des parties I et II, et à 38 % les parties III et IV probablement par manque de temps même si le sujet était de longueur très raisonnable.

Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux candidats

Partie I – La bobine de Ruhmkorff

I.A – Établissement du courant dans un circuit inductif primaire

L'établissement du courant dans un circuit inductif à une maille ne présentait aucune difficulté. Ce qui n'empêche qu'il fallait la traiter avec rigueur en précisant l'origine physique de l'équation différentielle ainsi que la continuité de l'intensité dans une branche inductive.

I.B – Caractéristiques de l'enroulement secondaire

La justification de la relation donnant la longueur du fil demandait un raisonnement précis portant soit sur la considération du volume de cuivre disponible soit sur un découpage en couches ou en tranches. Dans tous les cas, la longueur du fil devait être exprimée uniquement en fonction des

paramètres connus. Une analyse dimensionnelle ne dispense pas d'une réflexion préalable sur les paramètres physiques pertinents. La prouesse technologique de cette bobine hors normes réside davantage dans la finesse du fil que dans sa longueur, même si celle-ci est impressionnante. La détermination de l'inductance L_2 de la bobine secondaire a été très rarement bien traitée du fait d'une lecture hâtive de l'énoncé. La quasi-totalité des candidats a purement et simplement omis la résistance du fil pourtant largement analysée dans la question précédente.

I.C – Couplage inductif entre les deux circuits

Les relations électrocinétiques traduisant la loi des mailles étaient trop souvent fantaisistes. Mais de très rares candidats (moins de 2 %) ont su les exploiter pour justifier l'apparition d'une haute tension au secondaire de la bobine. La cause réside clairement dans une lecture superficielle de l'énoncé qui précisait pourtant que « ... le circuit secondaire est alors ouvert ... ». Il suffisait de remarquer que l'intensité i_2 était alors nulle sans se lancer dans une résolution des équations vouée à l'échec en l'absence d'une réflexion physique préalable.

Partie II – Mécanisme de déclenchement de l'étincelle

II.A – Distribution de particules dans un gaz

La densité particulaire découlait directement de l'équation d'état des gaz parfaits. Beaucoup de candidats ont exprimé cette densité — définie comme le nombre de molécules au mètre cube — en quantité de matière par unité de volume. Dès lors, la distance moyenne intermoléculaire qui en résultait était dénuée de bon sens, ce qui aurait dû permettre de revenir sur cette erreur.

II.B – Effet d'avalanche

Le raisonnement pourtant élémentaire de début de partie a posé des problèmes à de nombreux candidats dès lors qu'il fallait calculer la distance parcourue $l(t)$. Dans de nombreuses copies, cette distance est définie comme le produit de la vitesse par la durée de parcours, ce qui constitue une erreur grossière pour un mouvement non uniforme. En conséquence, le jury a lourdement sanctionné cette erreur ainsi que les fautes de signe. Il faut respecter les notations de l'énoncé qui explicitaient le signe de la charge de l'électron ainsi que la définition des grandeurs demandés. $l(t)$ était définie comme une distance donc de valeur positive.

Les questions qualitatives qui terminaient cette partie ne devaient pas être traitées de manière superficielle. Il s'agissait de faire une synthèse des éléments établis précédemment pour dégager deux paramètres physiques majeurs influençant la valeur du champ disruptif : la pression du gaz *via* la densité particulaire et l'énergie d'ionisation moléculaire ou atomique.

Partie III – Étude expérimentale d'un plasma produit par une étincelle électrique

III.A – Premières observations

La comparaison de l'indice de réfraction du plasma par rapport à l'air devait se déduire d'une analyse de la figure 4 et non d'un résultat connu en électromagnétisme. À leur grande surprise, les correcteurs ont relevé très souvent une confusion entre la durée de traversée de la zone de l'étincelle et la durée d'établissement du plasma. L'appropriation de la signification des courbes expérimentales ne va donc pas de soi pour une fraction notable de candidats.

III.B – Obtention d’un faisceau laser très fin

L’étude du système optique afocal a été globalement assez bien menée, même s’il faut déplorer une confusion entre la périodicité et la précision du positionnement de l’axe du faisceau laser. La diffraction a été généralement mentionnée, mais l’ordre de grandeur de l’angle d’évasement a eu moins de succès bien qu’aucun calcul d’intégrale de Fresnel n’était nécessaire.

III.C – Détection électronique du déplacement du spot laser

L’établissement de la relation liant les puissances lumineuses au déplacement du centre du spot a constitué un obstacle infranchissable par la quasi-totalité des candidats (moins de 3 % de bonnes réponses). Il était judicieux d’exploiter d’emblée l’inégalité forte $\delta \ll R_{\text{spot}}$ au lieu de tenter d’établir un résultat exact. Les convertisseurs courant – tension construits autour de deux amplificateurs opérationnels ont trop souvent généré des erreurs de signe. Mais le montage soustracteur a été globalement convenablement traité.

Partie IV – Propriétés optiques d’un gaz partiellement ionisé

IV.A – Mouvements électroniques dans un plasma

Pour montrer que la force magnétique est négligeable devant la force électrique, les candidats comparaient trop souvent des grandeurs qui n’ont pas la même dimension comme le champ magnétique et le champ électrique. La considération d’électrons non relativistes impliquait directement l’inégalité forte entre l’amplitude du mouvement électronique et la longueur d’onde du laser qui garantissait la quasi uniformité du champ électrique. Pour déterminer le temps caractéristique d’un régime transitoire mécanique, il fallait s’appuyer sur l’équation différentielle homogène. Il ne suffisait pas de dire que ce temps ne peut être que τ_c vu que l’énoncé introduit cette notation.

Le traitement complexe pour déterminer la solution particulière sinusoïdale d’une équation différentielle linéaire du premier ordre en régime forcé a donné lieu à une véritable hécatombe. Vu le très faible taux de bonnes réponses (7 %), ce manque de maîtrise d’un outil mathématique de base est indéniable. Il faut impérativement s’attacher durant le temps de préparation à construire des outils transversaux solides. Pour les rares étudiants ayant déterminé correctement l’amplitude complexe, un second obstacle se profilait : la détermination de la phase, très souvent aléatoire.

La comparaison entre la vitesse électronique et la vitesse d’agitation thermique a correctement été abordée dans les bonnes copies. Certains étudiants ont même opposé le mouvement ordonné dû au champ électrique au mouvement aléatoire d’agitation thermique.

IV.B – Propagation d’une onde électromagnétique dans un plasma neutre

Cette dernière sous-partie a permis à de nombreux étudiants de montrer leur savoir faire en électromagnétisme des ondes dans un plasma collisionnel en particulier sur les concepts de vitesses de phase et de groupe. Néanmoins il n’est pas toujours clair que l’indice de réfraction du milieu est lié à la vitesse de phase et non de groupe.

Conseils aux candidats

Dans ce sujet de longueur raisonnable, il était impératif de lire très attentivement l’énoncé. Les explications données dans l’énoncé sont loin d’être inutiles : elles ont pour fonction de contextualiser

les phénomènes abordés. De manière générale, il faut indiquer avec soin l'argument physique utilisé. Le barème prend aussi en compte ces éléments que l'on peut très bien indiquer de manière précise et concise. Les applications numériques ne sont pas une fin en soi mais doivent déboucher sur une interprétation physique. Il faut rester critique à la fois sur les valeurs numériques (souvent fantaisistes) et sur les expressions littérales (trop souvent inhomogènes). Il n'est pas si rare que les réponses à deux questions consécutives se contredisent. Pour répondre aux questions qualitatives, il ne suffit pas de paraphraser l'énoncé.

Conclusions

Ce problème de difficulté très raisonnable a permis à la grande majorité des candidats de progresser dans le problème tout en maintenant une bonne dispersion des notes. Globalement les candidats ayant fourni des efforts réguliers durant leurs deux années de préparation ont récolté les fruits de leur assiduité. Le jury a vivement apprécié le grand nombre de copies qui ont traduit une bonne connaissance du cours dans des domaines très variés. Néanmoins il déplore un très sérieux manque de maîtrise d'outils mathématiques comme le traitement complexe des équations différentielles linéaires. Par ailleurs, ce sujet comportait des questions destinées à tester les capacités d'imagination et de réflexion chez les candidats. Ce type de questions requiert une rigueur dans l'analyse physique et une précision du vocabulaire tout à fait comparable aux situations plus calculatoires. Il ne faut donc pas les négliger.