

Physique

Présentation du sujet

Ce problème est consacré au Laser de forte puissance. Cette technique utilise des matériaux amplificateurs qui imposent des contraintes fortes sur la puissance des impulsions lumineuses. Il est alors nécessaire d'augmenter la durée de l'impulsion Laser dans un premier temps. Par ailleurs, l'énorme densité énergétique présente dans ces faisceaux lumineux impulsionnels risque d'endommager les surfaces métalliques lors des réflexions. Le problème se propose d'analyser ces deux aspects en deux parties totalement indépendantes.

La technique d'étirement temporel de l'impulsion lumineuse repose sur une paire de réseaux de diffraction par réflexion. L'étude de ces réseaux est au centre de la première partie du problème en allant progressivement de la diffraction par un miroir plan au réseau à échelottes qui concentre la lumière dans un ordre dispersif. L'étirement temporel est ensuite abordé en partant du cas simple d'une onde monochromatique vers un modèle plus réaliste d'impulsion analysée en termes de décomposition de Fourier.

La seconde partie aborde dans un premier temps l'étude de la conductivité dynamique d'un métal dans le cadre du modèle de Drude. Pour une pulsation nettement inférieure à la pulsation plasma du métal, une structure d'onde évanescence apparaît. Dans ce contexte, les électrons libres peuvent atteindre des vitesses élevées lors de la réflexion métallique. La fin de la seconde partie cherche à évaluer la possibilité de destruction du dépôt métallique par ionisation lors de l'interaction lumière-matière.

Analyse globale des résultats

La longueur raisonnable de cette épreuve a permis à de nombreux candidats d'aborder une partie significative du problème. La répartition des points sur les diverses sous parties montre que leurs performances se sont réparties de manière relativement uniforme.

- 38% des points des candidats ont été obtenus dans la partie I.A et I.B ;
- 19% ont été obtenus dans la partie I.C ;
- 34% ont été obtenus dans la partie II.A. Cette partie a été traitée dans sa quasi-intégralité dans un nombre significatif de copies. Sans difficulté majeure, les premières questions ont limité le nombre de très mauvaises copies ;
- 9% ont été obtenus dans la partie II.B et II.C. Ces dernières questions n'ont concerné que les meilleurs candidats.

Ce sujet a été sélectif car la moyenne des 25% meilleures copies était nettement supérieure au double de la moyenne des autres candidats.

L'amélioration de la qualité de la présentation des copies est manifeste. Ceci ne fait que confirmer une tendance amorcée depuis plusieurs années. Il n'en est malheureusement pas de même en ce qui concerne la qualité de l'expression française. L'orthographe reste toujours aussi fantaisiste dans de nombreuses copies.

Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux candidats

Partie I : Étirement temporel d'une impulsion Laser

I.A : Diffraction par un réseau plan

L'énoncé qualitatif du principe de Huygens-Fresnel n'a pas toujours été clairement exposé. Une relation mathématique traduisant la diffraction dans le cas simplifié de Fraunhofer ne remplace en aucun cas une présentation des hypothèses physiques sous-jacentes.

La compréhension qualitative de la diffraction pose problème. Pour justifier la limitation de l'étude dans le plan d'incidence du miroir, une bonne majorité de copies utilise des arguments d'optique géométrique. Souvent ces mêmes étudiants montrent par la suite qu'ils maîtrisent l'aspect analytique du calcul par intégration. Il suffisait pourtant de comparer la longueur de la facette à la longueur d'onde par une inégalité forte. La fréquence trop élevée de cette erreur doit amener les enseignants à renforcer l'aspect qualitatif en préalable d'une justification quantitative.

Pour le calcul de la diffraction par un miroir, deux types d'erreurs ont été largement observées.

Des erreurs de signe dans le calcul du déphasage ont largement pénalisé les candidats qui n'ont pas traité les angles algébriquement. Les figures 1 à 6 indiquaient pourtant clairement des angles orientés. En demandant de montrer que l'on retrouvait la loi de Snell Descartes pour la réflexion, l'énoncé proposait un test que nombre d'étudiants n'ont pas exploité.

Par ailleurs, la figure 1 imposait l'origine des abscisses et donc les bornes de l'intégrale de diffraction. De trop nombreuses copies ont reproduit un calcul classique vu en cours en centrant le miroir. Le facteur de phase attendu n'apparaissait donc pas.

La figure 3 présentait une figure de diffraction par un réseau en incidence normale. L'enveloppe de diffraction était clairement visible. Un tracé à main levée donnait accès à la largeur d'une facette. Le pas découlait directement de la position des pics. Notons que le choix de l'incidence normale ne handicapait pas les étudiants n'ayant pas reconnu un réseau par réflexion. Pour le tracé de la figure de diffraction éclairé en lumière bichromatique, il était pertinent de signaler que l'ordre zéro était commun aux deux radiations et que les pics s'écartaient progressivement avec l'ordre d'interférence, mais de manière symétrique.

I.B : Diffraction par un réseau à échelettes

La procédure retenue par l'énoncé consistait à réinvestir l'analyse précédente en y ajoutant l'angle d'inclinaison des facettes. Un traitement algébrique rigoureux des divers angles était nécessaire pour déterminer les valeurs demandées. Nous attirons une fois de plus l'attention sur la précision des calculs numériques en fonction des données, en l'occurrence trois chiffres significatifs pour cette question. L'intérêt du réseau à échelettes n'est pas de réduire l'encombrement, mais d'envoyer le maximum de lumière dans un ordre dispersif comme le suggérait clairement le texte de la question I.B.2.c.

I.C : Étirement temporel d'une impulsion Laser avec une paire de réseaux

Cette sous-partie était totalement indépendante des précédentes. La relation caractéristique des réseaux de diffraction par réflexion donnée à ce niveau de l'énoncé permettait de corriger le cas échéant les erreurs de signe dans le déphasage dans les parties I.A et B.

Le calcul de la différence de marche pour une onde monochromatique a souvent été couronné de succès par une analyse judicieuse de la figure 6. Le calcul était simple en prenant comme origine des abscisses le projeté orthogonal de B sur le rayon incident. Des relations trigonométriques de base suffisaient pour établir la relation donnant le décalage temporel à la question 1.C.2.b. Il fallait néanmoins prendre garde au nombre de chiffres significatifs des données dans le calcul numérique qui en découlait. L'ordre de grandeur obtenu était cohérent avec la valeur indiquée par l'énoncé quelques lignes plus loin.

Dans les copies ayant abordé cette fin de partie, le calcul de la décomposition de Fourier de l'impulsion en créneau était correct dans l'ensemble. Mais la représentation graphique du module était souvent fantaisiste : axes non indiqués, module négatif, fréquence négative... L'analyse physique de l'étirement temporel de l'impulsion par la paire de réseaux a été rarement totalement pertinente.

Partie II : Réflexion sur une surface métallique, ionisation, puissance limite

Cette seconde partie du problème s'articulait en deux blocs de difficulté très contrastée. La propagation d'une onde électromagnétique dans un métal ne présentait pas de difficulté particulière. Les bonnes copies ont traité la quasi-totalité des questions. Par contre l'analyse de la réflexion métallique et de l'ionisation susceptible de se produire se présentait sous la forme de questions beaucoup moins guidées nécessitant souvent une estimation même grossière des paramètres physiques pertinents. Comme on pouvait le prévoir, ces deux dernières sous-parties ont largement permis aux meilleurs candidats de montrer leur esprit d'initiative et leur bonne compréhension physique du phénomène abordé.

II.A : Propagation d'une onde électromagnétique dans le métal

Le poids a été spontanément négligé à juste titre dans l'inventaire des forces par l'ensemble des candidats. Les ions positifs sont liés au réseau cristallin. Leur contribution au vecteur densité de courant était donc négligeable. Vu l'analogie avec un plasma, on pouvait admettre l'argument d'un fort différentiel de masse ion/électron. Un nombre non négligeable de candidats a pourtant proposé une charge ionique très différente de celle de l'électron ou encore une grosse différence dans la concentration particulaire.

Les applications numériques avec le bon nombre de chiffres significatifs devaient être menées avec soin. Les simplifications proposées dans le texte devaient être justifiées quantitativement. La décroissance de l'amplitude de l'onde évanescence a été souvent bien abordée. On peut néanmoins regretter que l'application numérique finale (souvent correcte) de cette sous-partie n'ait pas été suffisamment exploitée. Il était pertinent de comparer la distance caractéristique à l'épaisseur d'un dépôt métallique de l'ordre du micron. Mais il était aussi judicieux de la relier à la taille d'un atome d'or. La décroissance de l'onde est sensible sur une distance de l'ordre de quelques centaines de couches atomiques. à cette échelle, les concepts de densité surfacique de charge ou de courant perdent leur sens. Pour bien aborder la sous-partie suivante, il fallait comprendre que le champ électromagnétique était continu à l'échelle où l'on se place.

II.B : Réflexion d'une onde électromagnétique et ionisation

La structure des ondes réfléchi et transmise découlait des relations de continuité des champs électriques et magnétiques à l'interface vide-métal. Ces relations ont souvent été mal écrites avec deux types d'erreurs récurrentes. La première revenait à annuler la somme des trois champs sur le

dioptre métallique. La seconde remplaçait un ordre spatial (de part et d'autre du dioptre) par une chronologie (avant et après l'arrivée sur le dioptre). L'onde incidente devenait alors la somme des ondes réfléchies et transmises. Ce constat doit interpellier les enseignants vu la fréquence élevée de ces erreurs.

II.C : Ionisation dans le métal, limite en puissance

Il s'agissait de déterminer les ordres de grandeur de la puissance transportée par l'impulsion Laser de forte intensité. En dépit du caractère ouvert des questions, le jury a eu la satisfaction de constater que les meilleurs candidats étaient capables de mobiliser les qualités requises pour aborder de telles situations.

Conseils aux candidats

Dans un contexte industriel ou de laboratoire, les paramètres physiques ne sont pas tous connus avec la même précision. Ainsi, l'énoncé précisait en préambule de prendre en compte le nombre de chiffres significatifs cohérent avec les valeurs numériques données dans le texte. Il fallait impérativement suivre cette consigne. Si dans une même application numérique certaines données sont fournies avec 3 chiffres significatifs et d'autres avec 2 chiffres, il faut au minimum s'aligner sur la donnée la moins précise.

De même, une exploitation quantitative d'un graphe comme celui de la figure 3 ne peut pas déboucher sur un résultat numérique à 3 chiffres pour les grandeurs a et b .

Il est toujours judicieux de passer un résultat final au crible d'un contrôle d'homogénéité dimensionnelle. Mais il est aussi important d'indiquer la bonne unité du système international. Par exemple, cela n'avait pas beaucoup de sens de donner la grandeur τ de la question II.A.1.d en $S \cdot C^{-2} \cdot kg \cdot m^2$ alors qu'il s'agit manifestement d'un temps caractéristique à exprimer en secondes.

Dans ce sujet de longueur raisonnable, les candidats avaient le temps de soigner la rédaction de leur copie. Les conseils habituels prennent d'autant plus leur sens. Ce sont autant de pistes pour améliorer significativement la qualité de votre prestation :

- rédiger de façon explicite (choix du système, loi physique mise en oeuvre) ;
- faire des schémas clairs et lisibles. Donner l'allure d'un graphe n'autorise pas à oublier de documenter les axes et de faire apparaître des points pertinents ;
- porter un jugement critique sur les ordres de grandeurs obtenus ;
- falsifier un raisonnement ou un calcul pour parvenir à un résultat donné dans l'énoncé fait courir le risque de placer le correcteur dans une attitude de suspicion portant sur l'ensemble de la copie.

Conclusions

En se limitant à deux problématiques clairement délimitées, la longueur de ce problème est restée très raisonnable. Ce sujet a permis une très bonne dispersion des notes en permettant aux meilleurs étudiants de pratiquement terminer l'épreuve dans le temps imparti. Le caractère très progressif de l'énoncé a néanmoins donné la possibilité aux candidats plus faibles d'aborder le début de chaque partie dans de bonnes conditions. Par ailleurs, ce problème mettait l'accent sur la précision plus

ou moins importante des données numériques pour s'approcher davantage des conditions présentes dans l'industrie ou dans la recherche. De nombreuses questions ouvertes demandaient aux candidats de mobiliser leur esprit d'initiative. En conclusion, le jury a vivement apprécié le grand nombre de bonnes copies, ce qui prouve que nos meilleurs étudiants savent largement dépasser le cadre strict du cours pour réaliser une synthèse pertinente d'une situation physique.