

## Rapport de MM. T. MELIN et B. MOSSER, correcteurs.

Le sujet proposé cette année traitait du principe de fonctionnement d'un microscope à force électrostatique, dispositif dérivé du microscope à force atomique et permettant de réaliser des cartographies des gradients de forces coulombiennes à la surface d'échantillons, avec une résolution spatiale de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres.

Le principe de la mesure de gradients de forces à l'aide d'un oscillateur mécanique faisait l'objet de la première partie du problème, les deuxième et troisième parties de l'énoncé s'attachant à la détection de forces capacitives ou liées à la présence de charges au voisinage de la surface d'un matériau conducteur. Enfin, la quatrième partie proposait l'analyse de résultats expérimentaux.

Les questions du problème étaient souvent liées, mais le nombre important de résultats intermédiaires donnés par l'énoncé permettait d'éviter tout blocage, et ainsi de pouvoir traiter le sujet dans son ensemble.

Les notes des candidats français du concours (moyenne 8.3, écart-type 4.2) se répartissent selon le tableau suivant :

$0 \leq N < 4$	16%
$4 \leq N < 8$	34%
$8 \leq N < 12$	31%
$12 \leq N < 16$	13%
$16 \leq N \leq 20$	6%

L'écart-type élevé dénote une très grande diversité de niveaux de compréhension des phénomènes d'électrostatique, allant du candidat incapable de déterminer convenablement le champ électrique entre les armatures d'un condensateur plan, à celui ayant compris dans son ensemble le principe de l'instrument décrit dans ce problème.

Parmi les points notables de cette année, on remarque :

- des notions mathématiques de base mal maîtrisées (différenciations, développements limités, trigonométrie simple, tracé de courbes...);
- la sempiternelle confusion entre les qualificatifs « constant » et « uniforme »;
- un nombre beaucoup trop élevé de copies se permettant une présentation bâclée, sale, illisible, ou les trois à la fois;
- une trop faible attention accordée aux applications numériques : les candidats se satisfont d'une expression mathématique pour répondre aux questions, alors que bien souvent l'application numérique et les commentaires - tout aussi importants en terme de raisonnement physique mais non traités - pourraient rapporter de précieux points supplémentaires. Il est enfin assez déroutant de constater que les applications numériques de formules simples peuvent rester des exercices périlleux, même pour des candidats de bonne volonté.

## Partie I

**1a)** Une première question donne souvent le ton de la copie. Au pire, un bilan de forces bâclé, des signes distribués au hasard, l'absence de schéma pour préciser les différents termes... se sont conjugués pour aboutir à un résultat incorrect. Également, de nombreuses copies se rapportent à des exercices classiques vus en cours, et font intervenir des termes de forces d'inertie, absents du problème posé. Enfin, que penser de ces quelques copies qui exhibent en une ligne une formule (juste ou fausse) sans autre forme de justification ?

**1b,c)** Pour les candidats ayant laissé des termes constants dans la réponse à la première question, une dérivée peu scrupuleuse de l'équation différentielle a permis un calcul de  $\mathcal{H}(\omega)$ . Le tracé du module de la fonction de transfert a souvent été imprécis, et ne tenait pas compte de l'hypothèse faite sur le facteur de qualité.

**1d)** Comme à la question précédente, une étude asymptotique aux fréquences très petites ou très grandes devant la fréquence de résonance permettait de tracer un graphe précis. La plage de pulsations propres correspondant à l'essentiel des variations de  $\varphi$  dépend évidemment du facteur de qualité de l'oscillateur : les trop nombreuses réponses comme  $[\omega_0/10, 10\omega_0]$  ou  $[0, 10\omega_0]$  ne sont donc pas satisfaisantes. Le calcul demandé de la pente à la pulsation de résonance s'est avéré décevant : calculs au signe près malgré un schéma correct, problèmes d'homogénéité, alors qu'une simple vérification dimensionnelle aurait permis d'éviter plus de 2/3 des erreurs commises sur le calcul de pente.

**2a)** Cette question n'a pas été bien traitée, par manque d'intuition physique d'une part - à savoir que c'est le déphasage entre les deux signaux qui importe et non leur amplitude - et par une maîtrise insuffisante d'un outil mathématique de base (passer d'un produit à une somme de fonctions cosinus). Par ailleurs, le montage électrique demandé a révélé une grande confusion entre les notions de *filtrage* et de *redressement* d'un signal électrique. Dans le cas présent, redresser la composante alternative était tout à fait inadéquat.

**2b)** La transformation de  $\cos(\pi/2 - \varphi)$  en une forme plus simple n'a pas été immédiate pour bon nombre de copies.

**2c,d)** Une incertitude relative n'a pas à être signée. Pour le calcul de variation de fréquence propre, trop de copies ont présenté une valeur numérique juste mais une unité fautive, par confusion entre pulsation ( $\text{rad.s}^{-1}$ ) et fréquence (Hz).

**3a)** La majorité des copies a cherché à établir une nouvelle équation différentielle, alors que nul n'était besoin de faire appel au principe fondamental de la dynamique pour répondre à cette question. Également, la maîtrise insuffisante de l'outil mathématique - un développement au 1<sup>er</sup> ordre - a empêché une bonne approche physique, pour relier la variation apparente de la constante de raideur au gradient de la force exercée.

**3b)** Pour beaucoup de copies, les détours effectués lors de la différentiation de  $\omega_0$  font que le résultat n'est pas exprimé en fonction de  $\omega_0$ ,  $\delta k$  et  $k$ .

**3c)** Les commentaires demandés à une question ne doivent pas être négligés. Et les

exprimer de manière simple et concise reste très apprécié lors de la correction, car cela permet de juger de la qualité d'expression de futurs ingénieurs. Traduire : il y a là des points précieux à engranger.

## Partie II

**1a,b,c)** Ces trois questions relèvent de l'exercice de cours. Non seulement savoir déterminer le champ électrique dans un condensateur plan sans effet de bord doit être acquis, mais de plus le faire avec une argumentation ordonnée, sérieuse et concise est indispensable pour un candidat qui souhaite une réussite à ce concours. Ceci implique que la notation est stricte en ce qui concerne les justifications (symétries des distributions de charges et conséquences, signes des expressions obtenues) ainsi que les raisonnements (superposition des distributions de charges). Enfin, des copies, trop nombreuses, utilisent un jargon cryptique, comme cet argument observé à plusieurs reprises : « le plan II est  $\Pi^+$ , donc ... », sans même une définition du plan II, et encore moins de l'appellation  $\Pi^+$ .

**1d)** Le résultat demandé ici doit être signé, au contraire de la question **I 3b)**.

**2a)** L'énoncé présentait une simplification ( $h \ll l$ ). Des candidats trop scrupuleux et pas assez physiciens se sont compliqué la tâche en estimant que l'on ne peut pas admettre au sens strict l'inégalité  $10 \text{ nm} \ll 80 \text{ nm}$ . Ce raffinement est-il nécessaire au vu des autres hypothèses simplificatrices du modèle (hypothèse de condensateur plan, à comparer au cliché de la figure 6). Notons que le développement limité a été souvent malmené.

**2b)** Même avec une réponse correcte au **1a)**, cette question fut très sélective...

**2c)** Commentaire identique à celui de la question **2a)**. En outre, au regard de la question **1c)**, il était plutôt malheureux de se tromper ici sur le signe de  $F_{\text{capa}}(2) - F_{\text{capa}}(1)$ .

**2d)** Avec une puissance troisième au dénominateur, la valeur de cette application numérique a oscillé dans un intervalle compris entre  $10^{-2} \text{ m}$  et  $10^{-22} \text{ m}$ . Il n'est pas interdit de reprendre un calcul qui aboutit à un résultat si différent des dimensions nanométriques en jeu. Enfin, pour les copies aboutissant à la bonne valeur (picométrique), le commentaire attendu se devait de dépasser le constat « c'est petit ». Petit, certes, mais... par rapport à quoi ?

## Partie III

**1a)** Trop d'erreurs dans l'énoncé de l'équation de Poisson...

**1b)** ... et beaucoup plus encore lors de son intégration. Cette question contenait le seul calcul un peu technique du problème, mais la difficulté a beaucoup plus résidé dans la formulation de la continuité du champ et du potentiel.

**1c)** Les conditions aux limites (continuité du potentiel et du champ) doivent se retrouver sur le schéma. À verser au dossier des outils mathématiques non maîtrisés : un calcul juste d'une composante parabolique avec un signe négatif aboutit dans la moitié des copies à une allure parabolique avec la concavité tournée vers le haut.

**2a,b)** De nombreux candidats présentent l'utilisation du théorème de superposition ou de l'unicité des solutions de l'équation de Poisson étant données les conditions aux limites, mais ne le formulent pas rigoureusement.

**3a)** On arrive dans le domaine des questions abordées par les bons candidats, ou les candidats ayant su bénéficier des résultats intermédiaires donnés par l'énoncé. Les candidats rigoureux ont bien dérivé le champ électrique du potentiel. L'emploi des relations de passage pour le champ électrique fut bien réalisé sur environ 1/3 des copies abordant la question.

**3b)** Malgré les indications de l'énoncé, et l'apprentissage proposé dans un cas plus simple dans la partie II, de nombreux candidats ont voulu considérer les charges indépendamment du champ électrique. Cette question fut donc propice à bien discriminer le candidat moyen du bon candidat.

**3c)** Beaucoup d'erreurs auraient pu être identifiées par de simples comparaisons de signes ou d'analyse dimensionnelle.

**3d)** La moitié des candidats a commenté cette question en analysant comment le résultat théorique varie avec des paramètres... peu connus ou peu variables lors des expériences. Ici, c'est a priori la différence de potentiel appliquée que l'expérimentateur maîtrise en temps réel, et non la quantité de charges, que l'on cherche à mesurer. Quelques copies fournissent des arguments qualitatifs très pertinents sur les signes des décalages  $\Delta\omega_q$  et  $\Delta\omega_h$  en fonction du signe de  $U$ .

**4a,b)** Questions faciles, assez fréquemment abordées, mais mal traitées dans l'ensemble, car étroitement liées aux résultats souvent erronés aux questions précédentes.

## Partie IV

**1)** Un rapide sondage montre 80% de résultats faux. Un déficit d'électrons est-il sur-naturel? Il va sans dire que seuls ont été valorisés les raisonnements - même qualitatifs - justifiant entièrement du résultat.

**2)** Même remarque qu'au **III-4a**). Cette application numérique a été convenablement traitée en pratique par moins d'un vingtième des copies.