

**Composition de Physique A, Filière PC  
(XE)**

Le sujet traitait de l'interaction d'un atome avec une surface diélectrique en présence d'ondes évanescentes.

Il se composait d'un texte de 4 pages, intitulé *L'atome devant son miroir*, extrait et adapté d'un article publié en 1998 dans la revue *Images de la Physique* et de trois figures. Les candidat(e)s devaient s'appuyer sur ces documents pour répondre à une série de 35 questions d'analyse et de compréhension, regroupées en quatre parties distinctes et indépendantes. Les données numériques utiles pour traiter le problème dans sa globalité étaient fournies aux candidat(e)s en tout début d'énoncé dans une section intitulée, *Données utiles pour l'analyse du texte*.

La première partie du problème (*Réfléchir un atome sur un miroir de lumière*) consistait en la description d'une onde évanescente et de ses conditions expérimentales d'obtention.

La seconde partie (*Rebond des atomes*) visait à décrire l'interaction de cette onde avec un atome en chute libre.

La troisième partie (*Interaction d'un atome avec une surface diélectrique*) explicitait cette interaction en étudiant les termes de van der Waals et d'interaction dipolaire.

La quatrième et dernière partie (*Mesure des rugosités de surface*), présentait une application des phénomènes étudiés dans les parties précédentes.

Les quatre parties étaient relativement indépendantes les unes des autres de façon à permettre aux candidat(e)s de traiter le sujet dans son ensemble en abordant par exemple les diverses parties de l'énoncé séparément. En procédant ainsi, de nombreux candidat(e)s ont pu avancer assez loin dans la résolution du problème. Ce sujet permettait de tester les connaissances des candidats sur une grande partie du programme de physique des classes préparatoires. Il nécessitait une mise en pratique des notions acquises en première et deuxième années des classes préparatoires, balayant plusieurs chapitres : mécanique du point, optique géométrique et ondulatoire et thermodynamique.

La répartition des notes est résumée dans le tableau suivant (pour les candidats français) :

$0 \leq N < 4$	62	4,61 %
$4 \leq N < 8$	558	41,52 %
$8 \leq N < 12$	530	39,43 %
$12 \leq N < 16$	172	12,80 %
$16 \leq N \leq 20$	22	1,64 %
Total	1344	100 %
Nombre de copies : 1344		
Note moyenne : 8,56		
Écart-type : 3,13		

### Remarques générales :

Rappelons comme chaque année quelques règles générales, qui bien qu'évidentes restent peu respectées par de nombreux(ses) candidat(e)s :

- De nombreuses copies sont rédigées dans un langage très approximatif. Elles présentent de multiples erreurs grammaticales et orthographiques qui rendent souvent difficiles et pénibles la lecture et la compréhension des explications données pour justifier un raisonnement ou un résultat.
- Il est toujours affligeant pour les correcteurs de constater que des expressions littérales sont dimensionnellement incorrectes. Nous encourageons donc les candidat(e)s à vérifier systématiquement l'homogénéité de leurs résultats.
- Un résultat numérique est en général considéré faux s'il est présenté sans unités. Nous notons avec plaisir que de plus en plus de candidat(e)s en ont conscience. Les candidat(e)s doivent également veiller à ce que le nombre de décimales significatives données soit en adéquation avec les données numériques fournies par l'énoncé.
- Des résultats donnés sans aucune explication ne peuvent pas être considérés comme valides. Il est essentiel de justifier les hypothèses faites et d'invoquer les principes appliqués lors d'un raisonnement. Il convient également de penser à définir de manière très explicite les variables introduites pour mener à bien un calcul. Nous encourageons les candidat(e)s à s'aider parfois de schémas explicatifs.
- Les applications numériques demandées ne doivent pas être négligées. Elles constituent une part importante de l'évaluation et de la note finale des étudiants.

Nous insistons sur le fait que l'exercice n'est pas un commentaire de texte et encore moins une paraphrase de celui-ci. Pour chaque question, on attend une réponse argumentée, souvent quantitative et s'appuyant toujours sur un raisonnement physique rigoureux.

## Remarque spécifique :

Quelques candidat(e)s excellent(e)s ont remarqué, à juste titre, l'absence d'unités pour la valeur du nombre d'Avogadro fournie dans la section « *Données utiles pour l'analyse du texte* ».

## Commentaire sur le caractère particulier de l'épreuve :

Pour la deuxième année consécutive, la composition de Physique A (XE) du concours d'admission (CA) 2016 se différencie des épreuves de physique traditionnellement données aux CA des grandes écoles scientifiques. L'originalité de cette épreuve réside dans la lecture d'un article scientifique et le commentaire de celui-ci à travers diverses questions posées. Ces questions visent à tester la capacité des candidat(e)s à appréhender un article scientifique en utilisant les connaissances scientifiques acquises en cours. En ce sens, la réponse aux questions nécessite une démarche scientifique rigoureuse basée sur l'énonciation de principes physiques et de démonstrations faites en utilisant au maximum les informations trouvées dans le texte et les figures de l'article. Il ne s'agit donc nullement de commenter le texte en paraphrasant celui-ci. Le rapport ci-dessous vise à donner une idée du type de réponses attendues et de leur notation.

## Commentaires par question

### Partie I : Onde évanescente

**1** Il convenait d'énoncer que la réflexion totale ne peut s'obtenir que lorsque le faisceau incident se réfléchit sur un milieu moins réfringent que celui dans lequel elle se propage initialement et que l'angle d'incidence est supérieur à une valeur limite dont l'expression devait être donnée et explicitée. Un schéma explicatif était absolument nécessaire à la compréhension du phénomène. Sur celui-ci le sens de propagation du faisceau lumineux était attendu, les indices optiques devaient être indiqués et les angles d'incidence, de réflexion et de réfraction explicités. Des points ont été enlevés lorsque les schémas présentaient l'angle de réfraction inférieur à l'angle d'incidence alors que le faisceau se propage, rappelons-le, d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent. L'immense majorité des candidat(e)s a pris, à juste titre, la valeur numérique 1 pour l'indice de l'air. En revanche, l'application numérique  $\arcsin \frac{1}{2}$  a souvent conduit à une valeur erronée de l'angle limite,  $i_{\text{lim}}$ , ( $\frac{\pi}{3}$  au lieu de  $\frac{\pi}{6}$ ).

**2** Question très mal traitée dans l'ensemble. L'immense majorité des candidat(e)s ayant répondu cette question s'est limitée à indiquer que cette égalité résultait de la continuité du champ électrique à l'interface, ce qui était indiqué dans l'énoncé, sans expliciter la raison physique de la continuité du champ et sans démonstration du résultat final. Quelques candidats ont répondu à la question en utilisant la loi de réfraction de Snell-Descartes et la relation existant entre la norme du vecteur d'onde, l'indice du milieu et la pulsation de l'onde qui reste inchangée lors de la traversée de l'interface.

**3** Peu de candidat(e)s parviennent à déterminer la relation existant entre les paramètres cités dans la question.

**4** Cette question nécessitait d'avoir répondu avec succès à la question 3. Un nombre significatif de candidat(e)s ayant abordé cette question n'a pas compris que la condition de réflexion totale correspondait à  $k'_z \cdot k'_z \leq 0$  et non pas à  $k'_z = 0$ . Certain(e)s candidat(e)s n'ayant pas établi l'expression correcte de  $k'_z$  en fonction de l'angle d'incidence  $i$  et de l'indice optique du prisme,  $n$ , ont néanmoins pu obtenir une partie des points attribués à la question en répondant que la longueur caractéristique de décroissance de l'onde évanescente valait  $\ell = \frac{1}{\|k'_z\|}$ .

**5** Il convenait de remarquer que le domaine d'existence de la fonction  $\ell(i)$  était  $[i_{\text{lim}}, \frac{\pi}{2}]$  et de noter que la fonction décroissante divergeait en  $i = i_{\text{lim}}$  vers  $+\infty$ . La valeur numérique de la fonction en  $i_{\text{lim}} = \frac{\pi}{2}$  était également attendue.

## Partie II : Rebond des atomes

**6** La réponse à cette question nécessitait d'appliquer le principe fondamental de la dynamique dans le référentiel Galiléen du noyau, supposé fixe, de projeter la relation obtenue dans la direction du champ électrique appliqué, puis de résoudre l'équation du mouvement de l'électron ainsi déterminée en régime forcé. Un nombre important de candidat(e)s a confondu, du fait de la notation utilisée,  $p$ , la valeur du dipole  $\vec{p} = -e\vec{r}$  avec la quantité de mouvement  $m\frac{d\vec{r}}{dt}$  de l'électron. Il convenait d'établir, par une analyse dimensionnelle complète, l'unité de la polarisabilité et de ne pas se contenter de la donner sans aucune démonstration. Une lecture attentive du texte (lignes 237 – 240 du texte) permettait d'éviter une possible erreur de signe dans l'expression de la polarisabilité.

**7** Pour répondre correctement à cette question il fallait utiliser le fait que l'énergie d'un dipôle  $\vec{p}$ , placé dans un champ électrique  $\vec{E}$ , s'écrit  $W = -\vec{p} \cdot \vec{E}$  et utiliser le résultat  $\langle \cos^2(\omega t) \rangle = \frac{1}{2}$ .

**8** Un nombre très important de copies répond à cette question en paraphrasant simplement le texte et n'obtient par conséquent aucun point puisqu'une démonstration est explicitement demandée. Les éléments essentiels de celle-ci étaient : le champ électrique croît exponentiellement à l'approche de la surface, la polarisabilité est négative et donc l'énergie,  $U$ , est positive et décroissante lorsque l'on s'éloigne de la paroi, une situation correspondant à une force répulsive ( $\vec{F} = -\vec{\nabla}U$ ). Peu de candidat(e)s ont discuté correctement l'importance du signe de la polarisabilité sur la nature (répulsive ou attractive de la force).

**9** Cette question a aussi donné lieu à des paraphrases du texte. Nous attendions une expression analytique du potentiel en fonction de la distance à la surface et à une justification de son signe à la surface.

**10** Bien que la question soit simple, peu de candidat(e)s expliquent pourquoi l'atome rebrousse chemin lorsqu'il atteint la position pour laquelle son énergie potentielle,  $U$ , devient égale à son énergie cinétique initiale.

**11** Question bien traitée dans son ensemble cependant beaucoup obtiennent un résultat numérique erroné pour la vitesse des atomes car il(elle)s ne convertissent pas en  $\text{kg.Mol}^{-1}$  la masse molaire donnée dans le texte en  $\text{g.Mol}^{-1}$ .

**12** Ici encore, nombreux sont ceux qui se contentent de paraphraser le texte et n'utilisent pas la relation liant l'énergie cinétique d'un atome de gaz parfait à  $k_B T$  pour estimer numériquement l'ordre de grandeur de la vitesse d'un atome.

**13** Un schéma explicatif permettait de répondre à la question simplement, en définissant de manière explicite l'angle d'incidence avec lequel le jet d'atomes arrive sur la surface du prisme. L'ordre de grandeur de cet angle d'incidence devait être calculé, à partir des informations fournies par le texte, puis discuté. Dans beaucoup de copies, l'incidence rasante du jet d'atomes correspond à la situation pour laquelle l'angle d'incidence du jet d'atomes égale l'angle limite de réflexion totale de l'onde lumineuse,  $i_{\text{lim}}$ , pour certaines autres enfin, il correspond à la situation où le jet d'atomes est normal à la paroi du prisme.

**14 et 15** Les valeurs de la densité volumique d'atomes dans le piège et de la densité de molécules dans l'air ambiant devaient être calculées, puis comparées l'une à l'autre. Certain(e)s ont confondu densité volumique et masse volumique. De nombreux résultats numériques sont aberrants du fait de l'expression de la pression en bars et non pas en pascals pour les applications numériques, ou du fait que  $R$ , la valeur de la constante des gaz parfaits, n'est pas prise égale à  $N_A k_B T$ .

**16** Question bien traitée dans son ensemble par ceux l'ayant abordée. Notons cependant que quelqu'un(e)s ne font pas intervenir  $g$  dans l'expression de la vitesse de chute !

### Partie III : Interaction d'un atome avec une surface diélectrique

**17** Bien que l'équation des lignes de champs n'était pas explicitement demandée dans la réponse à la question, d'excellent(e)s candidat(e)s l'ont établie et ont obtenu des points de bonus. La totalité des points à la question était acquise avec un schéma précis indiquant la position des charges électriques ou la direction de  $\vec{p}$ , la forme des lignes de champs (courbes fermées, tangentes sur chacune des charges, à l'axe du dipôle) et le sens de parcours des lignes de champ. De manière assez surprenante et incompréhensible, beaucoup de copies font allusion à un pôle sud et nord alors que le texte ne fait à aucun moment allusion à un dipôle magnétique.

**18** Question mal traitée par l'immense majorité des candidat(e)s. Relativement peu de candidat(e)s parviennent à positionner correctement les deux dipôles par rapport à la surface du prisme. Lorsque le schéma est correct, l'immense majorité des réponses se contente de souligner que les charges opposées sont en vis-à-vis et s'attirent donc. Le

calcul de l'énergie du dipôle placé dans le champ électrique,  $\vec{E}$ , créée par son dipôle opposé image devait être mené avec notamment une discussion sur le signe du produit scalaire  $\vec{p} \cdot \vec{E}$  et la nature répulsive ou attractive de la force qui en résulte. La décroissance de l'énergie avec la distance à la surface du prisme devait être discutée également. Pour cela il convenait donc d'utiliser l'expression connue du champ électrique créé par un dipôle en tout point de l'espace, loin de celui-ci.

**19 et 20** Questions bien traitées en général pour ceux les ayant abordées. Il convenait de comparer numériquement l'ordre de grandeur du temps de propagation du champ électrique sur la distance  $z$  à l'inverse de la fréquence du champ électrique.

**21** Question relativement bien abordée dans son ensemble. Notons cependant que beaucoup notent de manière fautive qu'asymptotiquement en  $+\infty$ , le potentiel dipolaire  $U \simeq U_0 \exp(-2z/\ell)$ . Seules quelques rares copies discutent correctement du signe de la fonction en  $+\infty$ .

**22** Beaucoup se limitent à donner l'expression de  $\delta$  sans aucune justification dimensionnelle.

**23** Bien que la question demande explicitement de tracer l'allure du potentiel dans les deux cas limites  $\delta \gg 1$  et  $\delta \ll 1$ , de nombreuses copies discutent de l'allure des courbes en omettant de donner une représentation graphique schématique de celles-ci. Nous insistons sur la nécessité de bien lire les questions avant d'y répondre. Notons que la représentation schématique du potentiel dipolaire (correspondant à une situation  $\delta \ll 1$ ) donnée dans la figure 2 du texte est trompeuse puisque le potentiel tend en  $+\infty$  vers 0 par valeurs positives alors que  $A$  est positive. Seul(e)s quelques très rares candidat(e)s l'ont remarqué.

**24** Très peu de bonnes réponses à cette question.

**25** Question bien traitée par une grande majorité de candidat(e)s.

**26** Un schéma représentant l'allure du potentiel dipolaire, l'énergie cinétique de l'atome et la barrière rectangulaire approchant le potentiel de l'atome permettait de répondre très simplement et rapidement à la question. Il convenait de discuter de la hauteur et de la largeur de la barrière rectangulaire. Nous avons lu peu de bonnes réponses concernant la largeur.

**27** Bien qu'abordée par une immense majorité de candidat(e)s, cette question a été très mal traitée et a conduit à des réponses fantaisistes sans justification pour l'expression littérale de la probabilité de transmission avec  $E_c$ . Seul(e)s quelques très rares copies pensent à utiliser un développement limité d'ordre 2 du potentiel total autour de son maximum,  $V_{\max}$  pour estimer la largeur de la barrière rectangulaire lorsque l'énergie cinétique est juste inférieure à  $V_{\max}$ , et parmi elles très peu encore mènent le calcul à son terme.

## Partie IV : Mesure des rugosités de surface

**28** Question mal traitée.

**29** Répondre correctement à cette question nécessitait d'avoir établi au préalable à la question précédente les expressions correctes des amplitudes des deux ondes évanescentes résultant respectivement du faisceau laser incident et du faisceau réfléchi. Lorsque cela a été le cas, très peu sont les candidat(e)s qui ont pensé à justifier le fait que l'intensité de l'onde évanescente totale est le carré du module de la somme des amplitudes des deux ondes car celles-ci sont cohérentes entre elles.

**30** Bien que ne présentant pas de difficultés majeures, les candidat(e)s dans leur ensemble ont mal répondu à cette question. Beaucoup ont utilisé un développement limité à l'ordre zéro du potentiel en  $\epsilon$  et obtiennent donc pour équipotentiels des surfaces horizontales ne présentant aucune modulation spatiale. Parmi ceux qui obtiennent une expression correcte des équipotentiels, la plupart les représente pourtant schématiquement sans souci de précision.

**31** Question facile et évidente pour ceux ayant répondu correctement à la question précédente.

**32** Réponses satisfaisantes par beaucoup de candidat(e)s. Notons cependant qu'un nombre relativement important de copies donne comme expression de la longueur d'onde de de Broglie  $\lambda = \hbar/p$  au lieu de  $\lambda = h/p$ .

**33** Pour répondre correctement à cette question, il fallait tout d'abord remarquer que les lignes 35–37 du texte et la légende de la figure 3 donnent respectivement  $\ell \simeq 100$  nm, et  $\epsilon = 0.023$ . En utilisant le résultat de la question **31**, il devenait ainsi possible d'estimer l'ordre de grandeur de la profondeur des équipotentiels et de le comparer alors à  $\lambda_B$  pour vérifier si la condition de diffraction énoncée dans la légende de la figure 3 était respectée.

**34** Pour répondre efficacement et rapidement à cette question, il convenait d'estimer  $R$  à partir de la valeur de  $\epsilon$  fournie par l'énoncé, en utilisant un développement limité en prenant  $\epsilon \simeq 2(R)^{1/2}$  soit au contraire de prendre la valeur de  $R$  donnée à la ligne 187 du texte et d'estimer alors l'ordre de grandeur de  $\epsilon$  (et donc de  $\lambda_B$ ) en utilisant l'expression globale  $\epsilon = \frac{2R^{1/2}}{1+R}$ .

**35** Question non traitée à de très rares exceptions.