

Epreuves écrite de Physique B, filière PC (XEULC)

Le problème de cette année de l'épreuve de Physique B filière PC portait sur l'étude de quelques propriétés mécaniques des cellules biologiques, en employant plusieurs approches complémentaires couvrant un large spectre du programme. Il était notamment fait appel à des notions autour du mouvement brownien (marches aléatoires, équation de Langevin), et de la mécanique des milieux continus (théorie de l'élasticité, rhéologie). Ces éléments mis en situation étaient introduits au fur et à mesure dans l'énoncé, et parfaitement explicités, mais sans qu'aucune connaissance a priori ne soit nécessaire. La difficulté de ce problème original, tant sur le fond que dans sa forme, ne résidait donc pas dans la virtuosité technique des calculs requis pour répondre aux questions posées, mais bien plutôt dans sa longueur (17 pages d'énoncé, 48 questions !), et dans la nouveauté des notions présentées, nécessitant une assimilation rapide, et des réponses courtes mais précises caractérisant un bon esprit de synthèse.

Ce très beau problème de biophysique moderne a été plutôt réussi par les candidats, qui se le sont bien approprié, au moins superficiellement. Ainsi, plus de la moitié des candidats a traité au moins les deux tiers du sujet, avec un taux de réponses justifiées correct, voire très satisfaisant, comme le prouve la répartition des notes dans le tableau suivant.

Intervalle Note	Copies	Pourcentage
$0 \leq N < 4$	25	2 %
$4 \leq N < 8$	319	25,1 %
$8 \leq N < 12$	625	49,2 %
$12 \leq N < 16$	262	20,7 %
$16 \leq N \leq 20$	38	3 %
Total :	1269	100%
Moyenne		9,93
Écart-type		3,0

Nous tenons à nuancer ce constat optimiste quant à leur réussite à cette épreuve car de notre point de vue, la réponse à environ la moitié du sujet aurait dû être presque immédiate et sans erreur, car toutes les questions correspondantes demandaient seulement que les candidats transcrivent en équation directement, avec des méthodes tout à fait classiques et sans presqu'aucun calcul algébrique intermédiaire source potentielle d'erreurs, la modélisation introduite dans l'énoncé. Même si effectivement la moitié des candidats a obtenu une note comprise entre 8 et 12, nous avons observé beaucoup de grappillage de réponses faciles dans chacune des quatre parties principales constituant l'épreuve, avec des candidats qui s'arrêttaient à la moindre difficulté. La construction même de ce sujet a probablement, et ce encore plus que les autres années, favorisé ces pratiques dans nombre de copies, de toute façon peu discriminées entre elles et d'un niveau global passable, et obérant au final l'admissibilité éventuelle des candidats correspondants.

Nous pensons néanmoins que l'expérience de ce genre de sujets, mettant en valeur l'adaptation et l'esprit de synthèse des candidats en les confrontant à des notions inconnues à assimiler rapidement, serait à renouveler dans le futur, car c'est précisément ce qu'ils ou elles rencontreront quotidiennement lors de leurs futures activités professionnelles, quelles qu'elles puissent être.

Avant de détailler plus précisément les différentes parties du sujet, nous souhaitons mentionner les lacunes habituelles présentes dans une fraction non négligeable de copies. Ce genre de constat structurel, et se renouvelant à l'identique depuis de trop nombreuses années, ne peut donc pas être imputable aux circonstances conjoncturelles malheureusement à l'œuvre depuis mars 2020 : il remonte à des connaissances ou des méthodes qui auraient dû être acquises par les candidats depuis longtemps, au niveau du secondaire, voire avant (en particulier pour la pratique du calcul mental favorisant les applications numériques).

- le tracé de graphes (même celui d'une droite!) est toujours aussi ap-

proximatif, voire aléatoire : savoir dessiner à la main par continuité une courbe connaissant un ou deux points en plaçant les tangentes, la ou les valeurs limites avec la position de la courbe vis-à-vis d'une asymptote éventuelle, n'appartient toujours pas au bagage maîtrisé par la majorité des préparationnaires.

- le moindre calcul algébrique de deux lignes donne lieu à beaucoup trop d'erreurs cf. commentaires détaillés plus bas, en particulier sur la question 27.
- Si tant est que les questions correspondantes aient été abordées, l'interprétation physique demandée de certains résultats expérimentaux au regard de la modélisation proposée provoque toujours autant de verbiage, les candidats se contentant trop souvent de reprendre sans aucun recul ou de paraphraser mollement les informations fournies par l'énoncé.
- les applications numériques — qui sont à effectuer sans calculatrice — sont mal traitées même en ordre de grandeur. Comme chaque année, nous avons donc accentué le barème sur ces questions, en récompensant les candidats qui avaient au moins essayé d'obtenir un nombre. Ceci devrait pourtant être le but ultime d'un problème de physique, c.-à-d. la compréhension quantitative après une modélisation mathématique adaptée d'un phénomène naturel reproductible !

Après ces remarques d'ordre général, rentrons plus en détail dans le sujet, et la façon dont il a été traité par les candidats.

Partie I. Questions préliminaires et ordres de grandeurs.

Comme il est de coutume, la première partie était consacrée à quelques questions préliminaires d'ordres de grandeurs et d'analyse dimensionnelle, ici via l'équation de Navier-Stokes en mécanique des fluides. Cette partie a été très bien traitée par l'immense majorité des candidats : la définition du nombre de Reynolds est correctement mise en situation, et la justification des termes à négliger aussi. Signalons tout de même que quelques candidats appellent à la question 3 équation de d'Alembert celle de diffusion, et s'évertuent donc à introduire une vitesse déterministe en lieu et place d'un coefficient de diffusion. Les copies correspondantes se sont généralement révélées dans la suite très faibles.

Partie II. Suivi de particules unique et viscosité du cytoplasme.

Cette partie était elle-même composée de quatre sous-parties, regroupant chacune de trois à cinq questions guidant pas à pas le candidat, et largement indépendantes.

Partie II.A. Approche microscopique de la diffusion dans un gaz, questions 4 à 7.

Cette sous-partie, dans l'esprit de la théorie cinétique des gaz, a été globalement bien traitée. Le libre parcours moyen a été bien calculé, en revanche les candidats ont eu plus de mal à comprendre que ce libre parcours moyen définissait aussi le volume dans lequel on trouve en moyenne une seule particule (Q4). Pour le bilan de particules (Q5), dans la mesure où le résultat était donné, il fallait porter un soin particulier à la démonstration et en particulier au développement limité. Les questions 6 et 7 qui suivaient ont été également bien traitées. Signalons néanmoins quelques erreurs sur le théorème d'équipartition de l'énergie (Q.7), dont les candidats se sont généralement rendus compte et qu'ils ont rattrapé par la suite à la fin de la partie II.C (avec la relation d'Einstein donnée explicitement).

Partie II.B. Mouvement brownien et modèle de marche de hasard.

Cette partie regroupait les cinq questions 8 à 12 et a été globalement bien réussie. La différence entre candidats s'est faite sur des détails de précision dans la rédaction : quand les questions sont des « montrer que », nous rappelons que toute réponse doit être justifiée, en invoquant une raison mathématique ou une hypothèse physique présente dans l'énoncé pour simplifier un calcul. En particulier sur la Q9, les hypothèses d'isotropie et d'indépendance devaient être explicitement évoquées pour justifier la simplification des valeurs moyennes et aboutir à la relation donnée dans l'énoncé. Signalons aussi que pour la Q10, une fraction non négligeable de candidats se compliquent la tâche en donnant une démonstration complètement indépendante de la Q9 de la relation demandée, alors qu'un « en déduire » aurait dû les inciter à se servir du résultat qu'ils venaient d'établir. En conclusion de cette sous-partie, la Q12 demandait une interprétation du résultat obtenu, et des commentaires par rapport à celui de la Q6. Les correcteurs auraient aimé voir plus souvent que les candidats remarquent la cohérence des résul-

tats malgré des modélisations très différentes, donc toutes deux pertinentes, plutôt qu'un simple calcul de rapport de coefficient numérique, et ce sans commentaire.

Partie II.C. Particule brownienne mésoscopique et modèle de Langevin.

Cette partie faisait appel à des notions fondamentales de mécanique pour décrire le mouvement d'une particule. La question préliminaire (Q13) a posé plus de problème que prévu : il fallait ici comprendre que sous les conditions de mouvement isotrope, on a $\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle$. Cette justification a manqué dans de nombreuses copies. Nous notons que l'application du principe fondamental de la dynamique est bien acquis (Q14) et la méthodologie de résolution des équations différentielles du premier ordre est aussi bien assimilée (Q15 et Q16).

Partie II.D Rhéologie passive du cytoplasme cellulaire par suivi de particule unique

Cette partie qui clôturait la partie II a clairement fait le tri entre les copies. Il s'agissait ici de prendre du recul par rapport aux points techniques abordés auparavant afin de comprendre les différents régimes de la dynamique du cytoplasme. Les questions Q17-Q20 n'étaient pas difficiles en soi mais il n'y avait ici plus de filet de sécurité pour se rattraper en cas d'erreur. Ainsi pour Q17 il ne fallait pas oublier que le mouvement était sur un plan (2 dimensions) alors que l'analyse de II.C avait été conduite pour une seule dimension. Beaucoup de candidats ne se sont pas aventurés à tracer une droite (même approximative). Mentionnons aussi que seule une poignée de copies ont explicitement compris que la relation ainsi obtenue correspondait à une moyenne statistique sur un grand nombre de trajectoires. L'application numérique qui suivait directement (Q18) nécessitait une certaine rigueur et un sens critique pour la justification du nombre obtenu (comparaison avec la valeur de l'énoncé). Notons tout de même que beaucoup de candidats qui trouvent des valeurs numériques aberrantes en font la remarque dans un petit commentaire. Peu de candidats ont traité correctement Q19 et Q20. Il fallait là encore prendre du recul sur le phénomène étudié pour formaliser une réponse. L'absence d'un guidage 'pas à pas' a permis aux candidats d'exprimer leur créativité et ce qui malheureusement ne correspondait pas toujours au résultat attendu.

Partie III Expériences d'indentation et d'élasticité de la cellule

Partie III.A Déformations d'un solide élastique

Cette partie faisait appel à des notions de mécanique des solides appliquées à des géométries moins académiques que celles vues en cours. Les questions Q21- Q26 ont été traitées par quasiment la totalité des candidats. Le point clef de ces questions nécessitait une bonne lecture du déplacement dans la géométrie cylindrique. On notera simplement sur ces questions que certaines copies sont plus agréables à lire que d'autres. Enfin Q27 nécessitait de calculer une intégrale. Ce point s'est révélé problématique pour de nombreux candidats. Nous avons ainsi obtenu beaucoup de résultats non homogènes à cette question.

Partie III.B Indentation par pointe AFM (Atomic Force Microscope)

Le bilan de cette partie qualitative est très mitigé. A la question Q28, il fallait faire un raisonnement qui faisait appel à de nombreux éléments du texte : position de la pointe, position du levier, calcul des forces, système à l'équilibre. Beaucoup de candidats se contentent de l'un ou l'autre de ces éléments et ont du mal à formuler un raisonnement logique et cohérent de bout en bout. La question Q30 nécessitait d'être un peu plus créatif même si le texte donnait l'indice d'une dissipation visqueuse. Là encore, trop peu d'élèves arrivent à formuler des propos cohérents. La question Q29 a été en revanche remarquablement bien traitée tant du point de vue de l'analyse des courbes que de l'application numérique.

III.C Oscillations de la pointe AFM et réponse harmonique

Q31 et Q32 étaient des questions calculatoires qui ont été bien traitées. Q33 était en revanche une question à tiroir et la fatigue de fin d'épreuve commence à se faire sentir à ce stade. Très peu de candidats proposent une interprétation physique pourtant explicitement demandée dans la question. Quant à la discussion sur les différents comportement à $\phi = 0$ et $\phi = \pi/2$, elle est complètement absente de quasiment toutes les copies. C'est dommage car ce point était la porte d'entrée à l'interprétation du graphe (Q34), question pour laquelle les candidats sont là aussi passés complètement à côté.

IV Modèles visco-élastiques du cytoplasme cellulaire

Hormis les premières questions (Q35-Q37) qui ont été correctement traitées, le reste des questions n'a été traité que par une poignée de candidats.

IV.A Cas élémentaires : solide de Hooke et fluide newtonien

Q35 et Q36 n'étaient pas des questions difficiles et les candidats les ont immédiatement identifiées comme telles.

IV.B Cas harmonique et aspects énergétiques

Q37 et Q39 étaient immédiates et n'ont pas non plus posé de problème à ceux qui les ont traitées. Q38 en revanche n'allait pas de soi puisqu'il était demandé un travail par unité de volume. Beaucoup de candidats n'ont malheureusement proposé aucune justification de l'expression de ce travail. Certains donnent aussi une formule non homogène.

Les questions Q40-Q42 nécessitaient de calculer correctement une intégrale puis de faire le lien entre ce calcul et l'énergie dissipée d'une part et l'énergie potentielle stockée dans le matériau d'autre part. Trop peu de candidats font ce lien (même si à ce stade l'échantillon des candidats qui traitent ces questions n'est peut être plus représentatif).

IV.C Modèles de Kelvin-Voigt d'un fluide visco-élastique

La question Q43 ouvrait la porte aux questions suivantes, cependant cette question a été globalement mal traitée. Beaucoup de candidats n'ont pas saisi l'analogie avec un circuit électrique et n'ont pas correctement associé la déformation et la contrainte des deux éléments. La suite visait à résoudre des équations différentielles et proposer des interprétations physiques des solutions. Enfin la dernière question sur l'interprétation générale n'a été que marginalement traitée.