

**Banque PC inter-Éns – Session 2025**  
**Rapport du jury relatif à l'épreuve orale de physique LS**

- **Écoles partageant cette épreuve :**  
ÉNS PARIS-SACLAY et ÉNS DE LYON
  
- **Coefficients** (exprimés en pourcentage du total des coefficients, à l'admission, pour chaque concours et chaque option) :
  - ÉNS PARIS-SACLAY :
    - \* Option Physique : 19,05 %
    - \* Option Chimie : 9,52 %
  - ÉNS DE LYON : 10,53 %
  
- **Membres du jury :**  
Angel ALASTUEY, Jeanne BERNARD, Étienne BRION, Michel FRUCHART, Nicolas GARNIER, Hervé GAYVALLET, Charles GRENIER, Arnaud LE DIFFON, Pierre LIDON, Sébastien PAULIN, Baptiste PORTTELLI, Nicolas TABERLET, Pierre VILLAIN.

---

## 1 Organisation et déroulement de l'épreuve.

Les épreuves orales de la banque PC inter-ÉNS se sont tenues du lundi 16 juin au samedi 12 juillet 2025 (quatre semaines). L'épreuve de physique LS s'est déroulée sur le site de l'ÉNS PARIS-SACLAY (4 Avenue des Sciences, 91190 Gif sur Yvette).

5 Cette épreuve comprend un travail de réflexion centré sur un thème dont le contour est bien délimité et préparé avec l'appui d'ouvrages, suivi d'une étude de problème (non préparée). Pour un candidat, elle a une durée de deux heures et se déroule selon les trois étapes suivantes :

- Prise de connaissance du thème qui lui est remis à son arrivée (à l'heure de sa convocation). Préparation, en salle d'étude, pendant laquelle le candidat peut consulter les ouvrages qui sont mis à sa disposition<sup>1</sup>. Au bout d'une heure, un surveillant l'accompagne en salle d'interrogation.
- 10 • Présentation, par le candidat, de sa réflexion sur le thème préparé (pendant une quinzaine de minutes) suivie d'échanges avec le jury (pendant une dizaine de minutes). Notons que, selon la forme de la présentation ou la nature du thème, des séquences de présentation et d'échange peuvent s'alterner. C'est notamment le cas lorsque le jury demande des éclaircissements sur des points particuliers qu'il paraît préférable de discuter "à chaud". Vingt-cinq minutes sont consacrées, globalement, à cette partie.
- 15 • Analyse, sans préparation préalable, d'un problème. Le candidat est libre d'organiser ses phases de réflexion personnelle et d'échange avec le jury comme bon lui semble. Trente-cinq minutes sont dédiées à cet exercice.

20 Soulignons que cet oral se veut interactif. Les candidats ne doivent donc tirer aucune conclusion négative du fait que le jury est souvent intervenu.

Des calculatrices sont disponibles en salle de préparation. Les objectifs et modalités de l'épreuve sont précisés sur une fiche collée sur chacune des tables de préparation. Deux jurys interrogent, en parallèle, les candidats. Chaque jury est constitué de deux interrogateurs, chacun représentant l'une des deux écoles partenaires.

---

1. Autour d'une centaine d'ouvrages des grandes collections, de première et seconde années de CPGE, complétés d'ouvrages plus généraux.

## 2 Éléments statistiques.

Parmi les 336 candidats admissibles de la banques PC inter-Éns, 331 étaient attendus à cette épreuve et 299 (soit 90,33 %) s’y sont présentés. Nous nous réjouissons que la hausse du taux de présence constatée l’an dernier (87,18 %) se soit maintenue cette année. Parmi les candidats présents, 22,07 % sont des femmes et 77,93 % des hommes.

Les notes attribuées sont comprises entre 3,00 et 19,00, autour d’une moyenne de 12,07 et selon un écart-type de 3,28. La figure (1) représente leur répartition relative, en pourcentage, par tranche de quatre points. Les résultats sont globalement très bons.

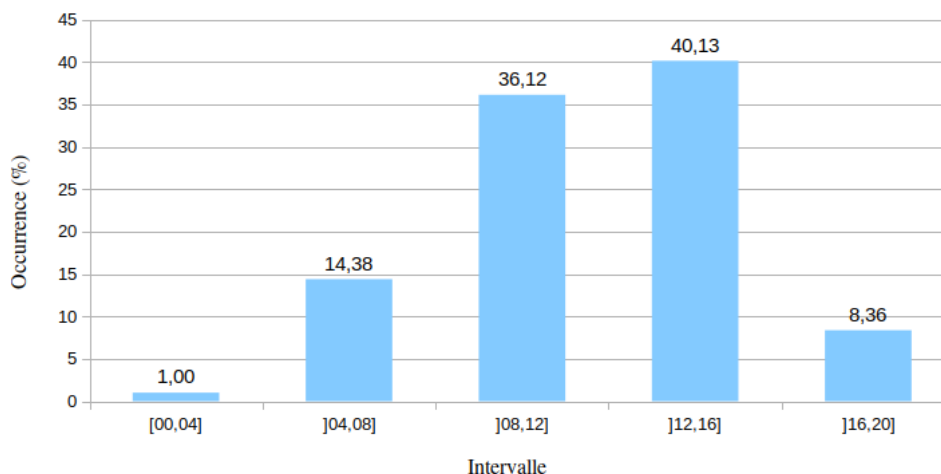


FIGURE 1 – Épreuve orale de physique du concours PC 2025 commune à l’ÉNS PARIS-SACLAY et l’ÉNS DE LYON : distribution relative des notes attribuées.

## 3 Remarques, attentes et critères d’évaluation du jury.

Les remarques et conseils formulés ici sont directement inspirés des constatations du jury au cours de cette session. Des erreurs et des points mal compris se retrouvent d’une session à la suivante. Nous encourageons donc les candidats à lire très attentivement les rapports d’épreuve mis à leur disposition. Ils ont pour seul but de les aider à préparer les oraux dans les meilleures conditions.

### 3.1 Le thème.

Il persiste encore, dans l’esprit de quelques candidats, une confusion entre “thème” et “leçon”. Pourtant, le passage de la leçon au thème remonte à la session 2005, année depuis laquelle cette épreuve est commune aux ÉNS de Cachan (à l’époque) et de Lyon. Il serait souhaitable que ce changement de format soit pris en compte par l’ensemble des enseignants des classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE) PCSI et PC, comme dans toutes les pages des sites faisant référence à cette épreuve. Un candidat y sera d’autant mieux préparé s’il en connaît les véritables modalités.

Soulignons toutefois que cette confusion n’est, en soi, pas dramatique si les candidats comprennent qu’il s’agit de présenter un travail de réflexion argumenté répondant à une question précise et que leur attention doit porter davantage sur le fond que sur la forme.

#### 3.1.1 Son cadre et ses objectifs.

Le thème repose sur les programmes en vigueur des deux années de classe préparatoire aux grandes écoles (CPGE). Le libellé de son sujet est généralement complété d’indications ou de questions orientant et délimitant son développement. Bien que les candidats disposent d’une base documentaire, il s’agit avant tout

d'un travail de réflexion. Un exemple illustratif, même s'il est extrait de l'un des ouvrages disponibles, doit avoir été analysé avant d'être présenté. Il est, en effet, difficile de tirer le meilleur parti d'un exemple mal compris ou considéré de façon trop superficielle. Enfin, une illustration ne devient véritablement éclairante que si elle est contextualisée et, si la situation s'y prête, étayée d'ordres de grandeur.

L'objectif de cette partie ne se limite donc pas à la collecte d'extraits d'ouvrages en vue de leur simple restitution lors de la présentation. Au contraire, il consiste à construire un développement rigoureux, répondant à la problématique sous-tendant le thème, inspiré en partie par la bibliographie disponible. Après avoir bien identifié cette problématique et considéré ses divers aspects, il convient d'en dégager les points essentiels. Ne pas omettre de répondre à chacune des questions posées et d'évoquer les éventuelles limites de la portée de l'étude présentée. Les exemples choisis, idéalement accompagnés d'ordres de grandeur, doivent permettre d'illustrer l'étude menée. Ils peuvent parfois servir de support à cette dernière.

Les libellés des sujets des thèmes précisent le nombre d'exemples à présenter. Il est généralement limité à un ou à deux. Retenons qu'un exemple bien choisi et bien exploité vaut mieux qu'une série d'exemples survolés donc insuffisamment exploités.

Concernant l'organisation pratique, il n'est pas indispensable de noter sur le tableau le plan de l'exposé. Le présenter oralement est suffisant, ce qui permet de gagner du temps. Toutefois, il est nécessaire d'avoir réfléchi préalablement au développement de sa présentation. Cela aide à structurer sa pensée et à identifier les points qui paraissent essentiels. Le temps consacré à l'exposé étant limité, le plan doit resté en lien direct avec le thème et ne doit pas avoir une visée trop ambitieuse. C'est aussi pour cette raison que le nombre d'exemples illustratifs doit être limité.

À travers cet exercice, le jury tente d'évaluer le niveau de compréhension des concepts, des modèles et des méthodes étudiés en CPGE. Il vérifie également que les techniques de calcul élémentaires sont convenablement maîtrisées. Soulignons que le jury demeure davantage sensible à une démarche construite sur une argumentation physique que sur un développement purement technique.

### 3.1.2 Remarques portant sur des points particuliers.

- Nous avons noté que les thèmes plus immédiatement en lien avec une partie du programme sont souvent moins bien réussis que les thèmes plus ouverts. Dans cette situation les candidats ressentent sans doute moins la nécessité de la réflexion.
- Concernant les applications, il faut éviter de choisir des exemples trop compliqués qui risquent d'être mal maîtrisés. Par exemple, pour illustrer le fonctionnement selon un cycle thermodynamique d'une machine, le moteur de STIRLING peut être un choix maladroit. Un exemple est bien choisi s'il concentre l'éclairage sur le phénomène ou la propriété que l'on souhaite illustrer. Naturellement, cette recherche nécessite de la réflexion. Les exemples trouvés dans les ouvrages proposés ne doivent être exemptés d'une analyse critique. Il ne sont pas toujours traités dans l'esprit du thème (la modélisation, point important, n'est pas toujours suffisamment argumentée), un travail d'adaptation devient alors nécessaire. Cette étape est d'ailleurs particulièrement instructive.
- Lors de l'étude d'un phénomène ou la présentation d'un exemple, il est essentiel de bien définir et caractériser le système qui va servir de support à cette étude. Il est également essentiel d'argumenter le choix de la modélisation adoptée. Par exemple, pour illustrer le phénomène de dispersion dans un câble coaxial, se contenter de "donner" son modèle électrocinétique local est insuffisant. Il convient de justifier sa construction à partir de l'objet physique lui-même. La mise en équation est ici l'étape présentant sans doute le moins d'intérêt.

De la même manière, modéliser un plasma en postulant d'emblée sa neutralité électrique (mésoscopique) est une initiative surprenante. Ce n'est, en tout cas, pas la première propriété que l'on attribuerait, *a priori*, à un système ionique. Cette propriété est l'un des aspects de la réponse du milieu à une onde électromagnétique *plane transverse*, ce n'est donc pas une hypothèse. Ainsi, dans le cas d'une onde longitudinale (onde de densité de charge), le plasma ne reste pas mésoscopiquement neutre. Par ailleurs, le modèle de réponse de la densité de courant au champ électrique adopté pour décrire

- 100 phénoménologiquement le comportement du plasma doit être commenté (notamment en comparaison à la loi d’OHM locale habituellement utilisée).
- Quand la situation s’y prête, réfléchir aux aspects expérimentaux connexes à l’étude à conduire peut permettre de la mieux cerner. Par exemple, cette réflexion peut conduire à s’interroger sur la réalisation pratique d’un cycle thermodynamique, sur ce que sont les grandeurs d’entrée et ce qui constitue la réponse du système étudié (se reporter à la remarque précédente concernant le plasma), sur les contraintes que font porter les hypothèses choisies sur le dispositif expérimental (effort de tension supposé constant, dans le cas d’une corde de MELDE, condition d’adiabaticité,...),...
  - Lorsqu’il s’agit de s’intéresser à la *réalisation pratique* d’un cycle thermodynamique (par exemple, dans le cas d’une pompe à chaleur), on ne se contentera pas de représenter les différents éléments qui participent à sa réalisation par des cercles portant la mention de leur fonction. On ne peut espérer identifier puis analyser les sources d’irréversibilité (par exemple) qu’au prix d’une connaissance suffisante de la réalisation pratique de chacune de ces fonctions.
  - Lorsque l’on réalise un dessin, ou un tracé, dans le but d’illustrer une certaine propriété, ne pas omettre de préciser clairement comment elle se traduit sur cette représentation. Il est essentiel que l’idée à transmettre soit bien comprise par le jury.
  - Dans certaines situations, une estimation des ordres de grandeur permet d’établir une hiérarchie entre les différents phénomènes recensés comme étant susceptibles d’intervenir dans une étude. Le plus souvent, dans le but de ne considérer que celui qui est dominant, dans un certain cadre (c’est le cas, par exemple, du rapport de REYNOLDS, en hydrodynamique). Parallèlement, ils permettent de délimiter le domaine de validité d’un modèle développé dans le cadre restreint choisi. Dans tous les cas, il ne s’agit pas de donner quelques valeurs “en l’air”, il est essentiel de les contextualiser.
  - En complément de la remarque précédente, dans ce travail de hiérarchisation, il est indispensable de porter toute son attention sur la façon de choisir les grandeurs caractéristiques à faire intervenir dans telle ou telle relation. Pour reprendre l’exemple du rapport de REYNOLDS, la vitesse comprend généralement trois composantes et le nombre de longueurs caractéristiques est rarement limité à l’unité. Que souhaite-t-on alors comparer ? Sur quelle base peut-on effectuer cette comparaison ? Au vu des équations et de la nature du problème, peut-on différencier les statuts des différentes grandeurs caractéristiques ? Cette opération ne relève donc pas d’un simple automatisme mais doit faire appel à la réflexion, étape féconde qui peut d’ailleurs constituer une entrée en matière. Naturellement, le problème du choix des “bonnes” grandeurs caractéristiques à considérer est très général, dépassant le cadre de l’hydrodynamique. Les candidats ne semblent pas très bien sensibilisés à cette difficulté (ou richesse!).
  - L’aspect microscopique de la diffusion apparaît souvent mal compris. On constate parfois une confusion entre l’échelle mésoscopique et l’échelle microscopique. En revanche, les candidats semblent particulièrement sensibilisés par le fait que les modèles phénoménologiques utilisés trouvent une limite à “fort gradient”. Naturellement, l’annonce de ce fait ne revêt tout son intérêt que si elle est l’occasion d’une réflexion sur une origine envisageable de cette limite.
  - En complément de la remarque précédente, très généralement, les candidats ne savent pas définir le critère permettant d’attribuer une “taille” à l’échelle mésoscopique, ou à celle d’une particule fluide (dans un cadre donné). Pour la plupart d’entre-eux, cette échelle se situe entre celle microscopique et celle macroscopique (le choix étant donc assez large !). Il faut songer que les grandeurs (concentration, vitesse, masse volumique,...) affectées à ces “mésoparticules” doivent être de valeur moyenne spatiale bien définie, c’est-à-dire peu affectée par des fluctuations (agitation thermique).
  - Les mécanismes d’émission et les caractéristiques des différentes sources lumineuses paraissent assez mal connus. En particulier, il convient de distinguer la contribution de l’émission stimulée et celle de la cavité optique dans l’émergence des propriétés particulières de cohérence spatio-temporelle et de directivité d’une source LASER. Il faut encore savoir distinguer les processus d’émission en jeu dans une lampe spectrale et dans une lampe à filament.

145

- Les éléments caractérisant un détecteur optique (utilisés en interférométrie) sont assez mal connus. Si le temps de réponse est généralement évoqué (moyenne sur le temps), il faut également penser que la surface du détecteur joue un rôle important (moyenne sur l'espace). Plus elle est étendue, plus le détecteur est sensible mais, naturellement, moins il est spatialement "résolvant". Il faut encore savoir qu'un détecteur possède une réponse spectrale. Connaître le principe de fonctionnement (dans les grandes lignes) d'une photodiode peut permettre de mieux cerner la problématique de la détection photonique.
- Concernant la mécanique quantique, les candidats définissent un état stationnaire par la propriété de "stationnarité" (sens à définir d'ailleurs) de la fonction d'onde qui le décrit. La plupart oublie de préciser que, plus fondamentalement, l'énergie d'un tel état est *fixée*. Son spectre est alors réduit à une unique pulsation ( $\omega = E/\hbar$ ). Une situation réelle est, quant à elle, décrite par un paquet d'ondes caractérisé par sa distribution spectrale.

## 3.2 L'analyse de problème.

### 3.2.1 Son cadre et ses objectifs.

Après avoir soumis le problème au candidat, le jury lui laisse quelques minutes de réflexion. Il l'invite ensuite à lui faire part de ses premières réactions puis à définir une démarche qui semble envisageable. Cette étape permet au jury de s'assurer que le candidat a compris le problème qui lui est soumis et qu'il l'aborde sur des bases exploitables. Naturellement, les candidats ne doivent pas hésiter à demander des précisions si des points leur semblent encore obscurs.

L'exercice proposé n'est généralement pas d'un abord immédiat. Il s'agit donc d'abord d'identifier et de recenser les phénomènes susceptibles d'être mis en jeu. Une étude qualitative, éventuellement accompagnée d'une estimation d'ordres de grandeur, est parfois nécessaire pour établir ce recensement et identifier les phénomènes déterminants. Cette étape d'analyse permet de définir le cadre (ou un cadre, si des options sont envisageables) de l'étude. Elle est fondamentale et est d'ailleurs déjà l'occasion d'échanges avec le jury.

Les discussions portant sur les hypothèses, la modélisation, les ordres de grandeur et les situations limites sont toujours encouragées. Elles constituent autant de repères permettant de guider l'étude.

Lorsque cela devient nécessaire, le jury donne quelques indications (de façon plus ou moins directe) aux candidats afin de leur permettre de surmonter une difficulté, de les aider à aborder une nouvelle étape ou à reconsidérer leur approche. La nature et la précision de ces indications dépendent, au cas par cas, de la situation et de la réactivité du candidat concerné.

L'évaluation des candidats porte sur leur esprit d'analyse, leur sens physique, leur rigueur et leur réactivité aux indications données. Le jury les encourage donc toujours à faire preuve d'initiative et à "se lancer", même si les étapes ultérieures ne sont encore qu'entrevues. Retenons qu'une erreur peut devenir féconde si elle conduit à envisager un changement de cap. Elle devient ainsi une étape du processus de construction de la démarche scientifique. Au contraire, une attitude trop frileuse, voire "muette", en attente systématique des indications du jury pour oser un nouveau pas, ne correspond pas du tout à l'esprit de cette épreuve. À l'autre extrême, lancer des idées, voire même seulement évoquer quelques mots-clefs, sans réelle base de réflexion, en guettant une éventuelle réaction approbative du jury, n'est pas davantage dans le ton.

Soulignons que les études proposées ne permettent généralement pas d'obtenir un résultat totalement abouti, tout au moins dans le temps imparti. L'accès au résultat ne doit donc pas être considéré, ici, comme une fin en soi.

### 190 3.3 Quelques remarques et conseils.

Nous reprenons et complétons les éléments déjà exposés dans les précédents rapports et qui restent d'actualité.

#### 3.3.1 Remarques générales.

- 195 • Il faut garder à l'esprit que cet exercice (thème et problème) n'est pas une épreuve de vitesse mais de réflexion. L'objectif n'est donc pas de "placer" une série de résultats connus mais plutôt de progresser dans sa réflexion avec méthode, rigueur et esprit critique. Il faut prendre le temps de bien définir les tenants et aboutissants de l'étude et d'identifier ses particularités.
- Le raisonnement physique doit toujours précéder tout développement mathématique. Un calcul ne doit être abordé qu'après avoir bien défini sa visée et son cadre.
- 200 • Lorsque l'on s'appuie sur une relation ou un résultat connu, ou pré-établi, il faut s'assurer que son champ d'application entre dans le cadre de l'étude conduite. Par exemple, l'expression de la force électromotrice auto-induite  $L di/dt$ , qui provient de l'équation fondamentale de MAXWELL-FARADAY, n'est utilisable que dans le cadre restreint d'un circuit (filiforme) *indéformable*.
- 205 • Un schéma permet de rassembler de façon immédiatement accessible les données se rapportant à l'étude à conduire. Il aide à paramétrer convenablement un problème (variables, repères, interactions avec l'environnement,...). Il constitue souvent la toute première étape. Notons encore que, pour en tirer un véritable profit, il doit rester clair. On évitera donc les dessins en perspective lorsque cela ne s'impose pas et l'on choisira la vue qui rend compte au mieux de la situation à illustrer. Ce dernier point présuppose donc déjà une réflexion sur les propriétés de symétrie du système étudié.
- 210 • Le paramétrage d'un problème risque fort d'être maladroit s'il n'est pas appuyé sur les particularités du système étudié. Cette étape est cruciale, elle conditionne la plus ou moins grande facilité avec laquelle les calculs pourront être conduits.
- La représentation graphique de la dépendance d'une grandeur par rapport à une autre permet de mettre en évidence ses particularités et facilite ainsi son interprétation. Cet outil n'est pourtant que rarement utilisé spontanément par les candidats.
- 215 • Lorsque l'étude fait intervenir un champ, scalaire ou vectoriel, les candidats ont généralement le bon réflexe d'étudier ses symétries et ses invariances sur la base de celles de ses sources. Par contre, tous ne tirent pas profit de ces propriétés pour accéder à ce champ par une équation intégrale plutôt que par une équation locale.
- 220 • L'esquisse des lignes de champ ou des lignes isopotentielles du champ électrique, hors des géométries de système très élémentaires, devient parfois, pour certains candidats, un problème à part entière. Il est difficile d'analyser, dans des conditions favorables, un problème d'électrostatique (en particulier) si l'on n'a pas en tête l'allure de ces cartographies.
- 225 • Dans la phase préliminaire de paramétrage et de modélisation, un bilan des inconnues et des équations qui les lient peut être utile. Il oriente la réflexion sur les équations *a priori* disponibles, sur leur statut (équation fondamentale, équation d'évolution, relation phénoménologique,...) et leur propriétés mathématiques (linéarité ou non, ordre(s) des équations différentielles,...), et donc également sur le cadre d'hypothèses qui peut être adopté. Il est exceptionnel qu'un candidat ait ce réflexe.
- 230 • Il est indispensable de définir clairement le système sur lequel est appliqué un théorème général. Il faut ensuite caractériser, puis modéliser, ses interactions avec son environnement et, éventuellement, définir les conditions de son évolution (en particulier en thermodynamique). Il est utile de ne pas perdre de vue les aspects expérimentaux afin que la modélisation reste réaliste, dans le cadre adopté (par exemple, penser que, dans l'absolu, une évolution adiabatique est irréalisable...).

- 235 • En particulier, en mécanique, prendre le temps de réfléchir au choix du système, ou sous système, à considérer et au théorème général à mettre en œuvre, au vu de l'objectif à atteindre, peut éviter bien des errements. Ce problème se pose, notamment, lorsqu'il s'agit d'accéder à des inconnues de liaison.  
De la même manière, il faut choisir le repère de projection qui paraît le plus adapté à la situation. Le référentiel galiléen peut ne pas être le meilleur choix.
- 240 • Il faut garder à l'esprit que le domaine de validité d'un résultat est limité par l'ensemble des hypothèses sur lequel la modélisation repose. Ce résultat ne doit donc être analysé dans le cadre restreint correspondant.
- En restant dans le domaine des hypothèses, commencer une étude en déclarant, avant toute considération préliminaire, "On peut supposer que..." ne relève pas de la démarche scientifique. Une hypothèse n'a pas un caractère d'absolu.
- 245 • Les ordres de grandeur et les applications numériques donnent un sens concret à un résultat et permettent de le situer par rapport à la réalité. Notons toutefois que beaucoup d'ordres de grandeur ne revêtent aucun caractère universel et que certains peuvent varier sur une très large gamme (c'est notamment le cas de la viscosité). Il est alors indispensable de préciser dans quel contexte l'illustration numérique est proposée et de choisir alors avec discernement les valeurs adoptées.
- 250 • Une bonne maîtrise des outils mathématiques élémentaires est indispensable pour conduire sereinement la résolution d'un problème. Certains candidats sont visiblement handicapés par leur manque d'aisance en mathématiques. Cela apparaît notamment lors du tracé de fonctions, de la manipulation de relations trigonométriques ou du calcul de fonctions dérivées. Les équations différentielles linéaires du premier et du deuxième ordres ne sont pas toujours immédiatement identifiées par les candidats.
- 255 • Même lorsque le contexte s'y prête, et parfois de façon assez évidente, les approches énergétiques, ou intégrales, ne sont que rarement envisagées spontanément par les candidats.
- Les connaissances des candidats dans les domaines de l'optique ondulatoire et de la thermodynamique sont devenues relativement fragiles. Elles ne possèdent plus d'ancrage fort. Nous sommes bien conscients que cet appauvrissement est une conséquence directe de l'évolution des programmes depuis  
260 les deux dernières réformes. Nous le regrettons.

### 3.3.2 Remarques portant sur des points particuliers.

- 265 • À propos de l'équation de d'ALEMBERT : On ne peut décider, *a priori*, si sa solution est de nature propagative ou stationnaire. La relation de dispersion, quadratique, indique qu'à la pulsation  $\omega$  (considérée comme paramètre d'entrée) correspond  $\pm k(\omega) = \pm\omega/c$  (en situation unidimensionnelle). La solution générale correspondant à la pulsation  $\omega$  imposée est ainsi la superposition de deux ondes ( $A^+; +k(\omega)$ ) et ( $A^-; -k(\omega)$ ). C'est l'interaction entre le champ et les frontières (dont la source) du milieu propagatif qui sélectionne la solution<sup>2</sup> et fixe le taux de stationnarité de l'onde. Les conditions aux limites (et initiales, pour certaines situations, en particulier pour l'étude du régime transitoire) doivent donc être systématiquement associées à l'équation de d'ALEMBERT.
- 270 • En ce qui concerne les approximations acoustiques, si les candidats ne manquent pas d'évoquer la condition d'adiabaticité de l'évolution induite par la perturbation, peu savent décrire comment les éventuels échanges de chaleur s'établissent. Très souvent, cette condition est appuyée sur des grandeurs caractéristiques mais sans avoir préalablement précisé pourquoi, ni comment, elles intervenaient. Tout raisonnement portant sur des grandeurs caractéristiques ne devient envisageable qu'à l'issue d'une  
275 analyse physique détaillée. Cette méthode ne se réduit pas en un moyen d'obtenir un résultat en faisant l'économie de la réflexion.

---

2. En situation unidimensionnelle, les conditions aux limites en  $x = 0$  et  $x = L$  permettent de déterminer les amplitudes complexes  $A^+$  et  $A^-$  de chacune des ondes.

- Toujours dans le domaine de l'acoustique, le passage des équations générales aux équations linéarisées est généralement mal maîtrisé. Chacune des approximations acoustiques doit être justifiée, à partir des équations générales. Annoncer d'emblée que  $X = X_0 + x$  où  $X = P, \rho, \dots$  et  $|x| \ll |X_0|$  n'est donc pas le bon point de départ. En particulier, si le terme convectif est négligé devant le terme instationnaire, dans l'équation d'EULER, ce n'est pas parce que "c'est un ordre deux" mais parce que l'on se place dans le cas où le module de la vitesse de la perturbation est très inférieur à la célérité du son dans le milieu.
- Encore dans le domaine de l'acoustique, dans la grande majorité des cas les candidats se "débarrassent" indûment de la force volumique de pesanteur intervenant dans l'équation d'EULER. Si l'on procède avec rigueur, dans le cadre de l'approximation acoustique, on obtient l'équation suivante :

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_s^2 \Delta \rho' + \vec{g} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \rho' = 0 \quad (1)$$

où  $\rho' = \rho'(\vec{r}, t)$  représente la composante acoustique de la masse volumique du milieu propagatif (supposé immobile, dans le référentiel galiléen d'étude).

Elle conduit à l'équation de dispersion suivante :

$$\omega^2 = c_s^2 k^2 - i \vec{g} \cdot \vec{k} \quad (2)$$

- On retrouve l'équation de D'ALEMBERT dans le cas où l'onde se propage selon une direction horizontale. Dans le cas d'une onde se propageant selon la direction verticale, on s'en approche dans la limite suivante :

$$|k| \gg g/c_s^2 \quad (3)$$

Ainsi, dans l'air "standard", pour des longueurs d'onde très inférieures à la dizaine de kilomètres, il devient légitime de ne pas tenir compte de  $\vec{g}$ , mais pas pour la raison généralement avancée (terme compensé par le champ de pression statique).

Concernant les approximations acoustiques précédemment évoquées, on pourra consulter la première partie du sujet des concours PC 2024 X-ESPCI-ÉNS accessible depuis le lien suivant :

[https://banques-ecoles.fr/cms/wp-content/uploads/2024/07/24\\_pc\\_sujet\\_phyb.pdf](https://banques-ecoles.fr/cms/wp-content/uploads/2024/07/24_pc_sujet_phyb.pdf)

- La notion de chaleur latente de changement d'état n'est pas toujours bien assimilée. En particulier, son interprétation en termes d'une manifestation, à l'échelle macroscopique, de l'existence d'une interaction atomique (ou moléculaire) attractive est parfois méconnue. Par ailleurs, il n'est pas rare que des candidats fassent intervenir une chaleur latente, ou une chaleur de réaction (lors de l'étude d'une machine thermique à combustion interne), dans le membre regroupant les termes d'échange du premier principe. Il s'agit là d'une grave erreur de fond.
- Dans certaines situations il peut être opportun de s'appuyer sur des notions relevant du programme de chimie.
- Dans le domaine des interférences, en optique, où il apparaît des valeurs moyennes (sur le temps), peu de candidats pensent à préciser, d'abord qu'il s'agit d'une moyenne temporelle et ensuite que cette opération traduit une contrainte d'ordre pratique. L'indication de la véritable base de temps à considérer n'est que rarement donnée (fondamentalement, ce n'est pas la période temporelle du signal optique mais le temps de réponse du détecteur). Ce point ne relève pourtant pas du détail, il se situe dans le champ direct de l'analyse physique de l'interaction du phénomène ondulatoire avec le système de détection. Remarquons qu'en acoustique, où l'on se trouve alors techniquement en mesure de suivre le signal temporel (et où, par ailleurs, le problème de cohérence ne se pose pas), la problématique revêt des aspects différents, bien que l'on reste dans le domaine des ondes.
- Encore dans le domaine des interférences, il arrive que des candidats ne sachent pas indiquer ce que représentent, physiquement, les "signaux  $s_1$  et  $s_2$ " qui interfèrent. C'est sans doute une conséquence fâcheuse du cloisonnement des disciplines de l'électromagnétisme et de l'optique physique.



- Le rôle de la lame compensatrice d'un interféromètre de MICHELSON est parfois mal connu. Elle permet que chacun des deux chemins optiques subisse le même effet de dispersion chromatique (en particulier, dans le cas d'une source non monochromatique).
- Lorsque l'on représente les forces agissant sur un solide, il faut veiller à placer correctement<sup>3</sup> la droite d'action portant chacune d'elles (ou de préciser leur "point d'application"). Cette donnée est indispensable pour être en mesure d'exprimer leur moment résultant. L'exemple d'un parallélépipède reposant sur un plan horizontal, à l'équilibre sous l'action de son poids, de la force qu'exerce sur lui le plan et d'une force horizontale imposée (dont on connaît donc le module et le point d'application) illustre cette remarque. C'est la condition d'équilibre en rotation du parallélépipède qui fixe la situation de la droite d'action de la force qu'exerce sur lui le plan. La fermeture du polygone des forces n'est pas une condition suffisante d'équilibre. Dans le cas d'un système soumis à trois forces, leurs droites d'action doivent être, de plus, concourantes en un même point. À ce propos, on pourra consulter la partie introductive du sujet du concours PC 2024 Éns de Lyon accessible depuis le lien suivant : [https://banques-ecoles.fr/cms/wp-content/uploads/2024/07/24\\_pc\\_sujet\\_phychi.pdf](https://banques-ecoles.fr/cms/wp-content/uploads/2024/07/24_pc_sujet_phychi.pdf)
- Concernant l'équation de NAVIER-STOKES, son écriture adimensionnée et l'apparition du rapport de REYNOLDS : l'étape la plus importante est l'association, de façon pertinente, d'une grandeur caractéristique à certaines variables intervenant dans l'équation de NAVIER-STOKES. Elle ne peut être conduite dans l'absolu et doit se rapporter à une situation précise qu'il s'agit préalablement de caractériser (description du système, propriétés du fluide, celles de l'écoulement,...). Rappelons encore que la détermination des grandeurs caractéristiques découle d'une analyse physique, d'ailleurs pas toujours simple<sup>4</sup>, et ne se limite pas à trouver des paramètres ayant la bonne dimension. Par exemple, on notera que la longueur caractéristique de variation de la vitesse, pour un écoulement de POISEUILLE, est le rayon du tube alors que celle de la pression est sa longueur. Ce n'est en rien une évidence, de prime abord.

Le terme  $\rho \partial \vec{v} / \partial t$  est un terme d'inertie, il n'est donc pas question de le représenter par la grandeur  $\rho U / (L/U)$  (en supposant que  $U$  représente la norme de la vitesse de l'écoulement loin en amont d'un objet de taille caractéristique  $L$ ), comme cela est proposé dans certains ouvrages. L'inertie est une caractéristique à part entière de l'écoulement. Elle peut avoir pour origine un forçage (écoulement pulsé contrôlé par l'extérieur, par exemple, comme ce serait le cas dans un rhéomètre à écoulement oscillant) ou résulter de la dynamique propre de l'écoulement (vidange d'un réservoir ou oscillation d'un fluide dans un tube en U). Elle peut encore être induite par la turbulence (analogie avec un oscillateur qui fixe alors son temps propre). Quoi qu'il en soit, elle sera caractérisée par un temps  $\tau$  qui permettra de construire la grandeur  $\rho U / \tau$ . Par exemple, dans le cas de la vidange d'un réservoir à travers un orifice, le temps  $\tau$  serait le temps de vidange (connu d'ailleurs qu'à l'issue du calcul, ou de l'expérience...). Naturellement, il apparaîtra deux rapports sans dimension permettant, chacun, de comparer les conséquences dynamiques relatives de deux phénomènes : convection/diffusion et inertie/diffusion.

Il est souvent préférable de ne pas adimensionner *a priori* la pression. Cette dernière peut être considérée comme la réponse du système au champ de vitesse (si l'on fait abstraction de sa composante statique qui, elle, est la réponse du milieu au champ gravitationnel). Ainsi, selon que l'on se situe dans les domaines contrôlés par la viscosité ou par l'inertie, la pression apparaîtra naturellement mise à l'échelle de  $\rho U^2$  ou de  $\eta U / L$  (cette dernière conduisant à la force de STOKES caractéristique).

Cette dernière remarque offre l'occasion de souligner que si le coefficient de traînée ( $C_x$ ) diverge dans la limite  $\mathcal{R}_e \rightarrow 0$  ce n'est en rien révélateur d'un comportement hydrodynamique singulier mais plutôt l'indication que la mise à l'échelle de la force de traînée par la grandeur  $\rho L^2 U^2$  n'est pas adaptée à ce régime. Dans cette limite, la grandeur d'échelle appropriée devient  $\eta U / L \times L^2 = \eta L U$ . On construit ainsi la grandeur caractéristique associée à la force de STOKES (cadre de l'approximation linéaire de

3. Notons que dans certains ouvrages, ce n'est malheureusement pas le cas !

4. Dans le cas général, le problème est tridimensionnel, on doit donc rechercher, ou construire, trois vitesses et trois longueurs caractéristiques...

l'équation de NAVIER-STOKES → force dépendant linéairement de  $U$ ).

- Dans le cas de l'écoulement de POISEUILLE, le choix très particulier de la forme du champ de vitesse  $\vec{v} = v(r) \vec{e}_x$  (laminaire) est l'hypothèse la plus forte adoptée dans cette étude. Cette forme est choisie *a priori* et n'est aucunement la conséquence de la symétrie géométrique particulière du système (contrairement à ce qu'annoncent de nombreux candidats). Les parois ne sont pas des "sources" qui génèrent le champ de vitesse en lui transmettant leurs symétries! Avec ce champ de vitesse, la valeur du rapport de REYNOLDS, construit comme le rapport des grandeurs caractéristiques représentant les termes de convection et de diffusion, est rigoureusement nulle. On fait alors intervenir un autre rapport  $(UD/\nu)^5$ , que l'on appelle souvent également rapport de REYNOLDS mais qui n'a pas la même signification que précédemment (conserver la même appellation est source de confusion). Si la valeur de ce rapport est inférieure à (environ) 2 000, le champ de vitesse adopté *a priori* est effectivement stable (critère expérimental) et le choix de la forme adoptée du champ de vitesse devient susceptible de représenter le véritable champ de vitesse.
- Les calculs présentés par les candidats en vue d'établir l'expression de la puissance volumique dissipée par effet visqueux ( $p_\eta$ ) sont le plus souvent faux (en se restreignant, bien sûr, aux écoulements classiques incompressibles "simples").

Dans le cas d'un écoulement de COUETTE (entre deux plans  $(x, y)$ ) et pour un champ de vitesse tel que  $\vec{v} = v(z, t) \vec{e}_x$ , en exprimant la puissance développée par les forces de cisaillement s'appliquant sur les surfaces d'une particule fluide ( $dm; dx, dy, dz$ ), ils obtiennent la relation suivante, qu'ils identifient à  $p_\eta$  :

$$p_{\text{cis}} = \eta \frac{\partial}{\partial z} \left( v \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \eta \left\{ \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right\} \quad (4)$$

On notera que cette relation ne garantit pas que, quelle que soit la forme de la fonction  $v = v(z, t)$ , la condition  $p_{\text{cis}} \geq 0$  se trouve satisfaite. Elle ne peut donc pas représenter la grandeur recherchée. Bien sûr, dans le cas particulier où  $v(z) = Az + B$  (écoulement de COUETTE en régime stationnaire), cette grandeur est effectivement positive ( $p_{\text{cis}} = \eta A^2$ ), ce qui n'aide pas les candidats à déceler leur erreur.

On peut accéder à l'expression de  $p_\eta$  en établissant un bilan de puissance (premier principe de la thermodynamique) sur une particule fluide :

$$\frac{d}{dt} \left\{ \left( u + \frac{v^2}{2} \right) dm \right\} = dydz [pv]_{x+dx}^x + dx dy dz p_{\text{cis}} + dx dy [J_Q]_{z+dz}^z \quad (5)$$

où  $u$  désigne l'énergie interne massique du fluide,  $J_Q$  la densité surfacique de flux thermique ( $\vec{J}_Q = J_Q(z) \vec{e}_z$ ) et où  $dm = \rho dx dy dz = \text{Cste}$  (masse de la particule fluide).

Par ailleurs, pour la forme du champ de vitesse adoptée, l'équation de NAVIER-STOKES, en projection selon  $\vec{e}_x$  (et en faisant abstraction de  $\vec{g}$ ) est la suivante :

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (6)$$

Il apparaît que des termes se simplifient dans l'équation (5) qui prend alors la forme suivante :

$$\rho \frac{du}{dt} = -p \underbrace{\frac{\partial v}{\partial x}}_0 + \eta \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \frac{\partial J_Q}{\partial z} \quad (7)$$

Cette équation est l'équation de la chaleur comportant un terme de source  $p_\eta$  (conversion mécanique → thermique).

5.  $D$  représente la diamètre du tube,  $U$  la vitesse caractéristique de l'écoulement,  $\nu$  la viscosité cinématique du fluide.

La grandeur recherchée s'exprime ainsi selon la relation suivante :

$$p_\eta = \eta \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \quad (8)$$

400 Cette grandeur est toujours positive (voire nulle), comme il se doit.

Remarque : Le cheminement adopté pour obtenir cette expression est un peu tortueux mais il présente l'avantage de mettre en relation les aspects mécanique et thermodynamique (en pratique, on cherche le plus souvent à accéder au champ de température réponse à l'échauffement visqueux, voire à étudier son rétro-effet sur l'écoulement dans le cas où la dépendance de la viscosité vis-à-vis de la température est prise en compte). Une approche purement mécanique est toutefois envisageable. Notons préalablement que  $p_{\text{cis}}$  est la somme de  $p_\eta$  et d'une autre puissance volumique qui, elle, n'est pas "dissipée" mais participe à la dynamique de l'écoulement.

Exprimons alors la puissance développée par les forces de cisaillement, mais cette fois dans un repère attaché à la particule fluide<sup>6</sup> (dont le centre se situe à la cote  $z$ , et ayant pour épaisseur  $dz$ ) :

$$dP_{\text{cis}}' = \{(v(z + dz/2) - v(z)) \tau(z + dz/2) + (v(z - dz/2) - v(z)) (-1) \tau(z - dz/2)\} dx dy \quad (9)$$

410 Cette relation conduit à la suivante :

$$p_{\text{cis}}' = \frac{\partial v}{\partial z} \tau = p_\eta \quad (\tau = \eta \frac{\partial v}{\partial z}) \quad (10)$$

- Enfin, ne pas confondre une *grandeur caractéristique*, qui représente une grandeur physique et est formée à partir de variables et de paramètres, et un *ordre de grandeur* qui est un nombre (affecté d'une unité).

#### 4 Conclusion.

415 Comme lors des sessions passées, nous avons eu le plaisir d'interagir avec des candidats très bien préparés et avec lesquels, dans la grande majorité des cas, les échanges se sont établis très aisément et constructivement.

#### 5 Perspectives pour la session 2026

Cette épreuve orale conservera, la session prochaine, la même forme et le même esprit que ceux décrits dans la partie introductive (1) de ce rapport. Elle comprendra donc les deux parties suivantes :

- 420 • Une présentation d'un thème préparé, pendant une durée de vingt-cinq minutes ;
- Une analyse de problème, pendant une durée de trente-cinq minutes.

Les attentes et les critères d'évaluation du jury demeureront ceux exposés dans ce présent rapport.

\* \*  
\*

---

6. La dynamique est alors gommée.