

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE
Direction des personnels enseignants

AGREGATION
SCIENCES PHYSIQUES OPTION PHYSIQUE

Concours externe

Rapport présenté par : Monsieur Gilbert PIETRYK
Inspecteur Général de l'Education Nationale
Président du jury

2004

CENTRE NATIONAL DE DOCUMENTATION PEDAGOGIQUE

SOMMAIRE

1. Composition du jury
2. Avant-propos du président
3. Informations statistiques et réglementation
4. Distributions des notes aux épreuves écrites et orales
 - Distribution des notes de l'ensemble des candidats aux épreuves écrites
 - Distribution des notes des candidats admissibles aux épreuves écrites
 - Distribution des notes des candidats admissibles aux épreuves orales
5. Enoncé de la composition de physique
6. Rapport relatif à la composition de physique
7. Enoncé de la composition de chimie
8. Rapport relatif à la composition de chimie
9. Enoncé du problème de physique
10. Rapport relatif au problème de physique
11. Déroulement des épreuves orales
12. Enoncé des sujets des épreuves orales de la session 2004
13. Rapport sur la leçon de physique
14. Rapport sur la leçon de chimie
15. Rapport sur le montage de physique
16. Enoncé des sujets des épreuves orales de la session 2005

1 COMPOSITION DU JURY

PIETRYK Gilbert	<i>Inspecteur Général de l'Education Nationale Président du Jury</i>
GULDNER Yves	<i>Professeur à l'Université Paris VI Vice-Président du Jury</i>
LE BOURHIS Jean-François	<i>Inspecteur Pédagogique Régional de l'académie de Caen Vice-Président du Jury , Secrétaire général</i>
BARBET-MASSIN Rémi	<i>Professeur au Lycée Henri IV à Paris</i>
BAUMBERGER Tristan	<i>Professeur à l'Université Paris VII</i>
BERROIR Jean-Marc	<i>Professeur à l'Ecole Normale Supérieure de Paris</i>
BILANGE Céline	<i>Professeur au Lycée Marcelin Berthelot à Saint Maur</i>
BILLY Nicolas	<i>Professeur à l'Université Evry - Val d'Essonne</i>
BRIFFAUT Jean-Noël	<i>Professeur au Lycée Brizeux à Quimper</i>
CAMELIO Béatrice	<i>Professeur au Lycée Clémenceau à Nantes</i>
DESBIOLLES Pierre	<i>Maître de conférences à l'Université Paris VI</i>
HOLDSWORTH Peter	<i>Professeur à l' Ecole Normale Supérieure de Lyon</i>
HOUSSIN Marie	<i>Maître de conférences à l'Université de Provence</i>
JULIEN Lucile	<i>Professeur à l'Université ParisVI</i>
LAFOND Alain	<i>Maître de conférences à l'Université de Nantes</i>
LAIGROZ Paulette	<i>Professeur au Lycée du Parc à Lyon</i>
MANASSES CAVELIER Josiane	<i>Professeur au Lycée Chateaubriand à Rennes</i>
MANGILI Daniel	<i>Professeur au Lycée Saint Louis à Paris</i>
OBERT Dominique	<i>Professeur au Lycée Victor Hugo à Besançon</i>
PARISI Jean-Marie	<i>Professeur au Lycée Loritz à Nancy</i>
POLICAR Clotilde	<i>Maître de conférences à l' Université Paris XI</i>
SIMON Daniel	<i>Professeur à l'Université de Lyon 1</i>
SZYMCZAK Anne	<i>Professeur au Lycée Wallon à Valenciennes</i>
TRAIN Cyrille	<i>Maître de conférences à l'Université Paris VI</i>

2. AVANT-PROPOS

La session 2004 de l'agrégation externe de sciences physiques est caractérisée par une diminution significative du nombre de postes ouverts au concours (162 à comparer aux 185 postes de la session 2003) et par une augmentation sensible du nombre de candidats inscrits (+6%). Ces deux facteurs conjugués ont non seulement permis au jury de pourvoir tous les postes mais ont également conduit à une augmentation de près d'un point de la barre d'admission (8,69/20 en 2004 à comparer à 7,82/20 en 2003), signe du bon niveau de recrutement du concours. Comme par le passé, les candidats admissibles sont en majorité jeunes (entre 23 et 25 ans), ce qui traduit bien le dynamisme de notre discipline.

Comme à l'accoutumée, ce rapport commente les épreuves écrites et orales du concours, et cherche à donner des conseils utiles tant aux candidats qu'aux centres de préparation. Mais avant tout, il convient d'attirer l'attention des candidats sur le fait qu'en se présentant à un concours, ils se trouvent en compétition les uns avec les autres, et qu'il en résulte obligatoirement une comparaison de leurs prestations individuelles. Toute auto-évaluation à la fin d'une épreuve (ou toute évaluation formulée par un observateur extérieur au jury) est ainsi vaine, car non fondée sur une vue globale des prestations de l'ensemble des candidats. Cette remarque doit en particulier inciter ceux d'entre eux qui sont persuadés d'avoir échoué à une épreuve, à ne pas baisser les bras et à terminer le concours.

Le jury insiste à nouveau sur les compétences attendues d'un enseignant de haut niveau, compétences qu'il s'attache à évaluer : maîtrise des connaissances disciplinaires, pratique expérimentale rigoureuse et aisée, clarté et logique des exposés, qualités de présence et de conviction devant l'auditoire. Ces attendus sont déclinés de manière spécifique dans chacun des rapports concernant les trois épreuves orales (rubriques 13, 14 et 15).

Pour la première fois cette année, les candidats n'ont pas été autorisés à utiliser les **documents polycopiés** élaborés par les centres de préparation pour les aider à se préparer durant l'année scolaire à l'épreuve de montage (mesure annoncée dans le rapport 2003). Cette décision a eu des conséquences très positives puisqu'elle a permis au jury de constater que les candidats ont fait des choix de manipulations plus variés, plus originaux et personnalisés, et ont fait preuve d'une réflexion souvent plus approfondie sur les expériences présentées, que par le passé. Preuve de cette évolution positive : la moyenne générale de cette épreuve est cette année en hausse sensible par rapport aux années précédentes.

Toutes ces constatations conduisent le jury à ne plus autoriser à l'avenir les documents polycopiés (ou leur équivalent numérique).

Le rapport 2003 annonçait par ailleurs la mise à la disposition des candidats d'une banque de « **transparents** » **numérisés** à l'intérieur de laquelle ils pourraient sélectionner les documents leur permettant d'illustrer au mieux leurs leçons, dans le strict respect de l'équité de tous. Cette mesure a été mise en oeuvre, toutes les salles de présentation de leçons et de montages ayant été équipées d'un vidéo-projecteur. Les candidats ont bien compris tout l'intérêt qu'il y avait à utiliser cet outil tant pour leur recherche documentaire que pour projeter des tableaux de mesure. Le jury s'est félicité de l'efficacité de cette mesure et rappelle que l'utilisation de transparents numérisés, judicieusement choisis et intelligemment intégrés à la présentation constitue à l'évidence une plus-value.

A la session 2005, les transparents pour rétroprojecteur ne seront plus admis. La banque de transparents numérisés pourra s'enrichir des nouvelles productions des centres de préparation, après validation par le président.

Réussir aux concours nécessite une préparation active, durant toute l'année scolaire. Le jury invite les candidats à travailler à la fois en vue des épreuves écrites et de celles orales, car il est illusoire de penser que l'on peut réussir à l'oral en s'y préparant à la « veille » des épreuves. La diffusion en début d'année scolaire des listes de montages et de leçons devrait être de nature à inviter les candidats à travailler dans ce sens. Rappelons par ailleurs que l'année de préparation au concours est l'une des rares occasions permettant au cours de la formation universitaire de faire la synthèse des connaissances acquises année après année dans les différents domaines de la physique et de la chimie. Elle permet également d'acquérir une véritable autonomie tant en matière de recherche bibliographique que de pratique expérimentale, autonomie nécessaire au futur professeur dans la construction de son enseignement tant au niveau pré- que post-baccalauréat.

En conclusion, les perspectives de recrutement, conséquences des départs massifs d'enseignants en retraite dans les années à venir, doivent inciter les futurs candidats, et notamment ceux qui n'ont pas été reçus au concours cette année, à affronter celui-ci avec sérénité, car au bout de leurs efforts se dessine une large possibilité de réussite. A la notion d'échec se substitue ainsi celle de réussite différée pour ceux et celles qui sauront montrer avec détermination leur engagement à embrasser le métier de professeur.

Le Président du jury

3 INFORMATIONS STATISTIQUES

162 places ont été mises au concours.

Le tableau ci-dessous donne des informations générales relatives à la sélection progressive des candidats au cours des épreuves, les valeurs de 2002 et 2003 étant éventuellement rappelées à titre de comparaison.

	2004	2003	2002
Inscrits	1378	1162	1203
Présents aux trois épreuves	732	690	735
Admissibles	323	324	315
Barre d'admissibilité	43/120	42/120	43/120
Moyenne générale du candidat classé premier	18,54/20	17,43/20	17.32/20
Moyenne générale du dernier candidat reçu	8,69/20	7,82/20	8.55/20
ADMIS	162	175	166

EPREUVES ECRITES

Les épreuves écrites se sont déroulées les 14, 15 et 16 avril 2004.

Moyenne des candidats aux épreuves écrites :

Nature de l'épreuve	Moyenne des candidats ayant composé	Moyenne des candidats admissibles
Composition de physique	8.21	12.47
Composition de chimie	7.27	9.95
Problème de physique	5.60	9.23

Les distributions des notes aux 3 épreuves écrites des candidats ayant composé et des candidats admissibles figurent en document annexe.

EPREUVES ORALES

Les épreuves orales se sont déroulées du 18 juin au 22 juillet 2004.

Moyenne des candidats aux épreuves orales :

Nature de l'épreuve	Moyenne des candidats présents aux épreuves orales	Ecart-type
Leçon de physique	8,59	4,25
Leçon de chimie	9,26	4,41
Montage de physique	8,94	4,49

Les distributions des notes des candidats présents aux 3 épreuves orales figurent en document annexe.

Répartition par date de naissance des candidats

Année de naissance	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
1982	10	9
1981	66	48
1980	67	44
1979	50	18
1978	29	11
1977	18	5
1976	15	2
1975	9	4
1974	11	5
1973	7	0
1972	9	2
1968 à 1971	19	8
1956 à 1967	13	6

Répartition par titres et diplômes

Titre ou diplôme	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
Doctorat	26	12
DEA	43	18
Ingénieur	32	14
Maîtrise ou équivalent	197	113
CAPES, PLP	25	5

Répartition par profession

Profession	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
Etudiant	149	74
Elèves d'une ENS	51	49
Elève IUFM 1 ^{ère} année	25	10
Certifiés et PLP stagiaires	22	5
Enseignant MEN	53	12
Autres ministères	2	0
Hors fonct publique/sans emploi	21	12

Répartition par sexe

	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
Homme	227	108
Femme	96	54

REGLEMENTATION

Programme :

Le programme des épreuves écrites et orales de la session 2004 est décrit dans le BO spécial n°3 du 22 mai 2003.

Le programme de la session 2005 est publié au BO spécial n° 7 du 1^{er} juillet 2004.

Epreuves :

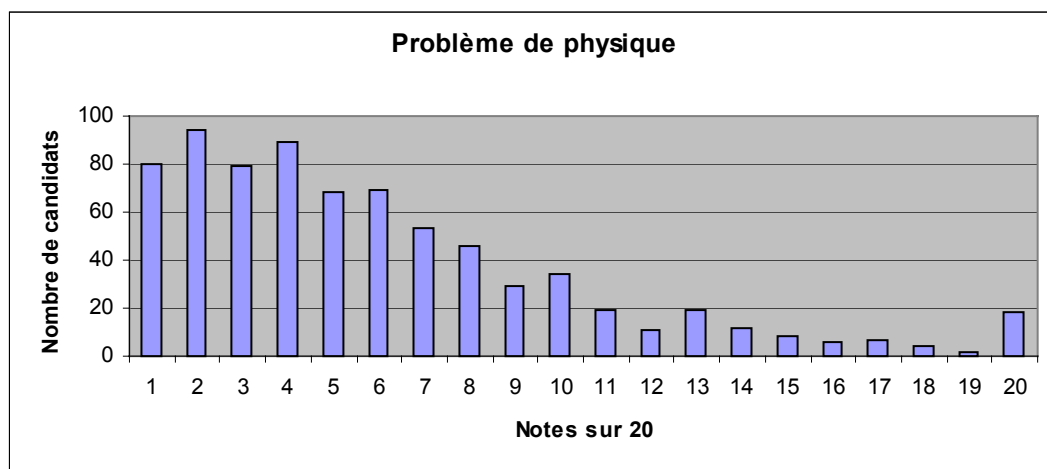
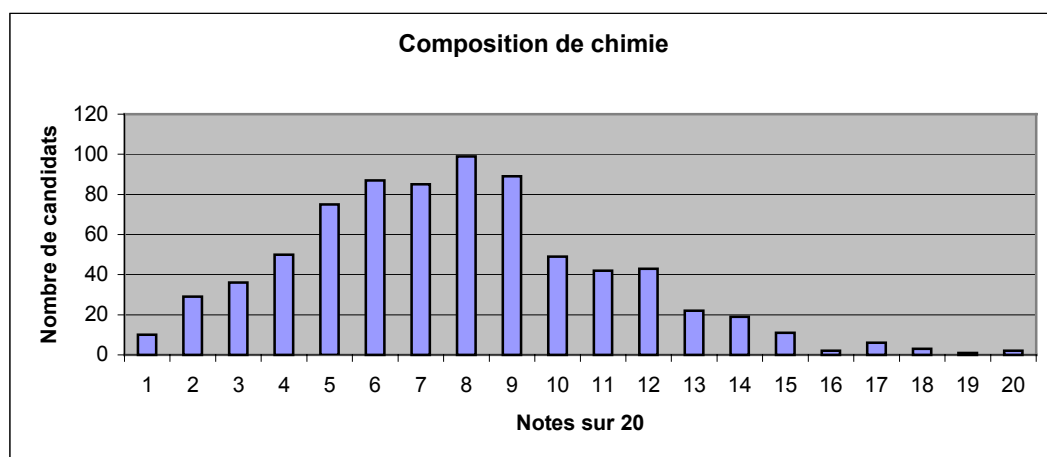
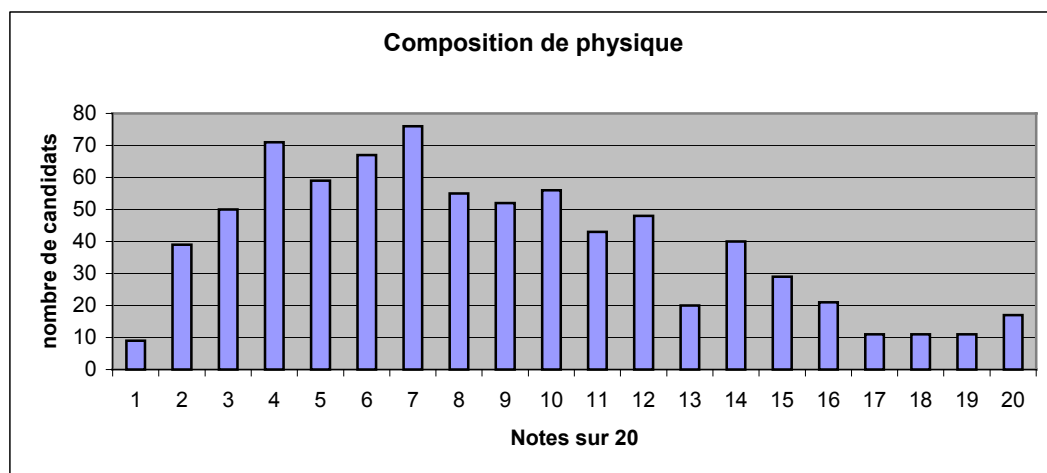
Les épreuves écrites comportent :

- Une composition de physique de durée 5 h (coefficient 2)
- Une composition de chimie de durée 5 h (coefficient 2)
- Un problème de physique de durée 6 h (coefficient 2)

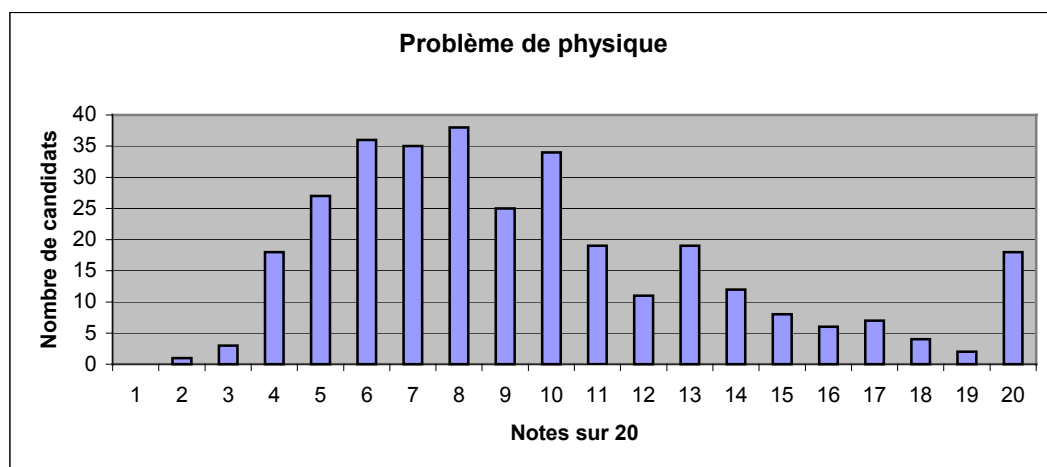
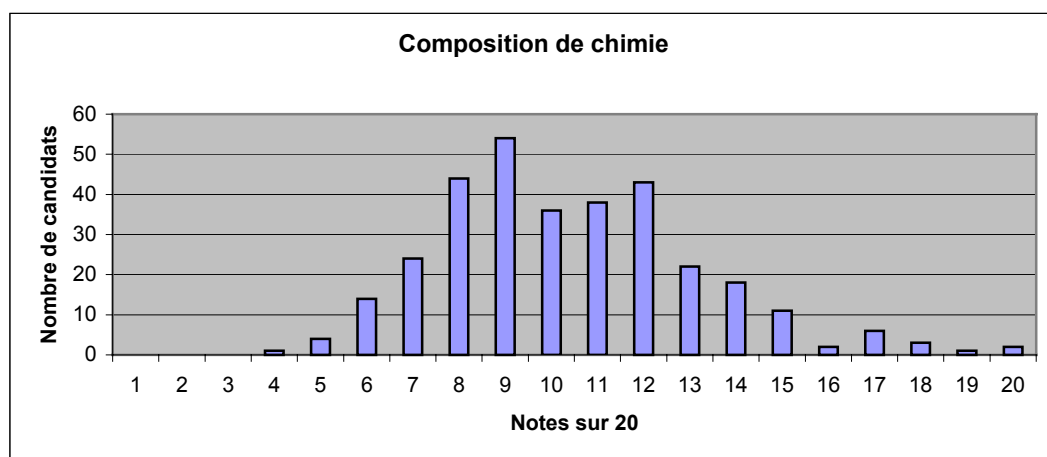
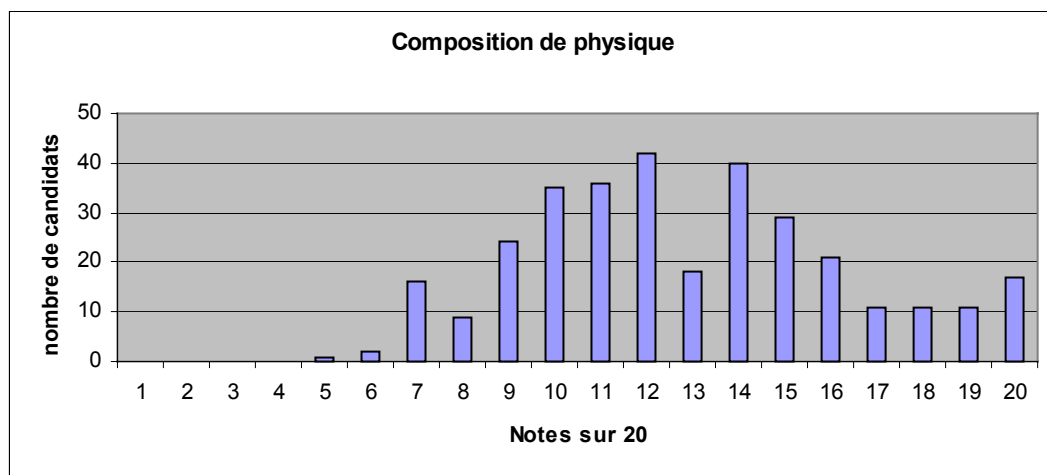
Les épreuves orales comportent :

- Une leçon de physique (coefficient 4)
- Une leçon de chimie (coefficient 3)
- Un montage de physique (coefficient 3)

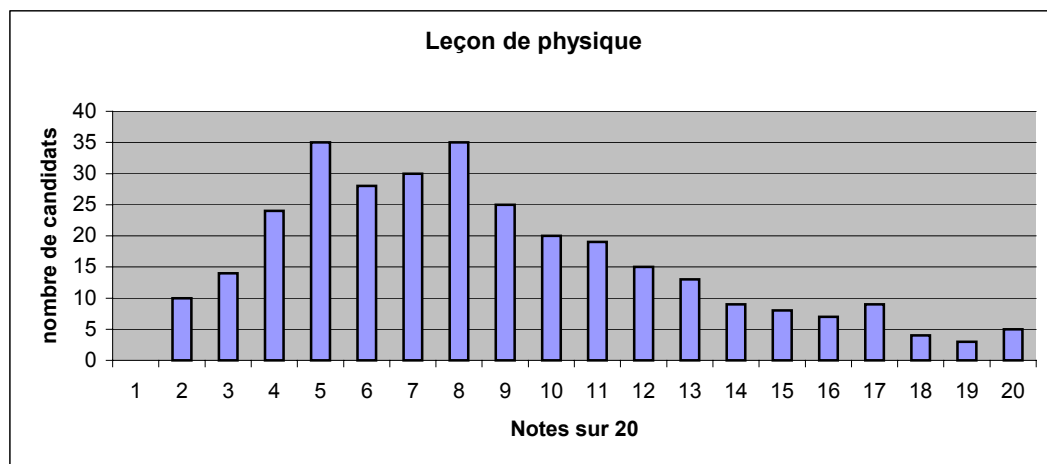
4a Distribution des notes sur 20 aux épreuves écrites des candidats



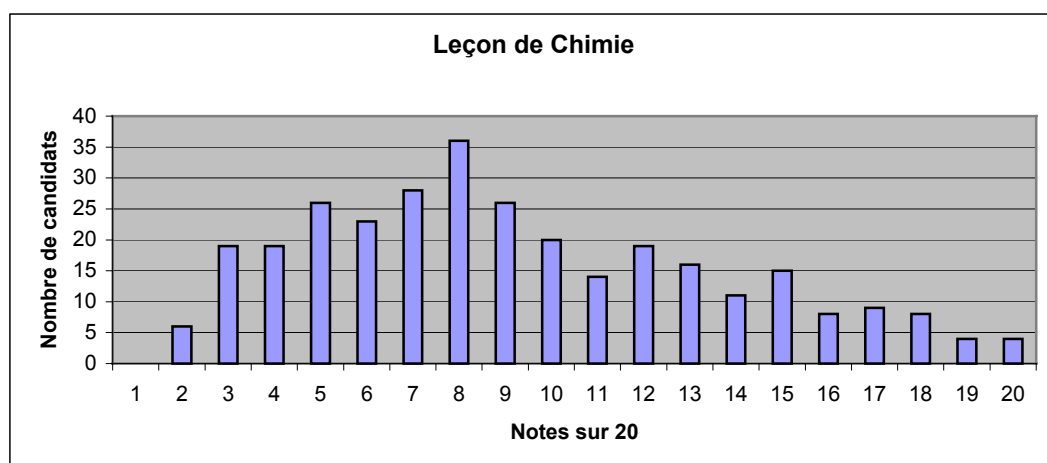
4b Distribution des notes sur 20 aux épreuves écrites des candidats admissibles



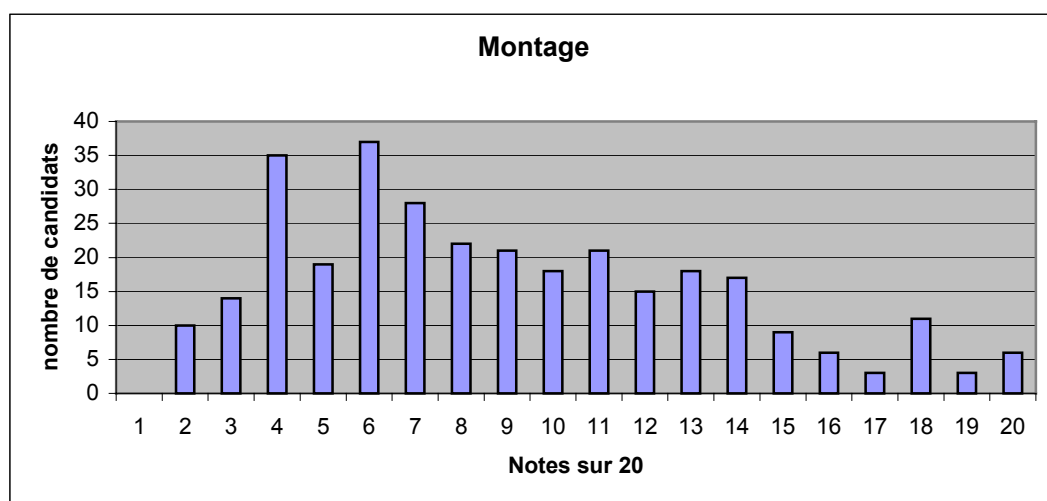
4c Distribution des notes sur 20 aux épreuves orales



Moyenne : 8,59
Ecart-type : 4,25



Moyenne : 9,26
Ecart-type : 4,41



Moyenne : 8,94
Ecart-type : 4,49

SESSION DE 2004

**concours externe
de recrutement de professeurs agrégés**

section : sciences physiques

option : physique

composition de physique

Durée : 5 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris programmable, alphanumérique ou à écran graphique - à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

Tout document et tout autre matériel électronique sont interdits.

PROPAGATION DANS LES FLUIDES

PREAMBULE

Le sujet traite de quelques aspects des phénomènes de propagation dans les fluides. La partie A privilégie l'étude des caractéristiques générales des phénomènes ondulatoires en faisant appel à différents domaines de la physique. La partie B aborde les équations fondamentales de la dynamique des fluides. Les parties C et D enfin s'intéressent à différents types d'ondes rencontrées dans les fluides : ondes acoustiques en partie C, ondes capillaires, ondes de gravité, solitons en partie D.

Pour l'ensemble du sujet, la plus grande importance sera accordée à la qualité de la rédaction et de la présentation.

Si un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit son travail en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

REMARQUE IMPORTANTE

Tout au long des différentes parties, l'épreuve comporte de nombreuses questions qualitatives auxquelles il est attendu une brève réponse de quelques lignes, claire, argumentée, pouvant s'appuyer sur un ou plusieurs exemples.

PARTIE A - ONDES ET PROPAGATION

Dans un référentiel R d'origine O , un point M de l'espace est défini par ses coordonnées cartésiennes (x, y, z) . On pose en outre $\vec{r} = \vec{OM}$.

1. Célérité

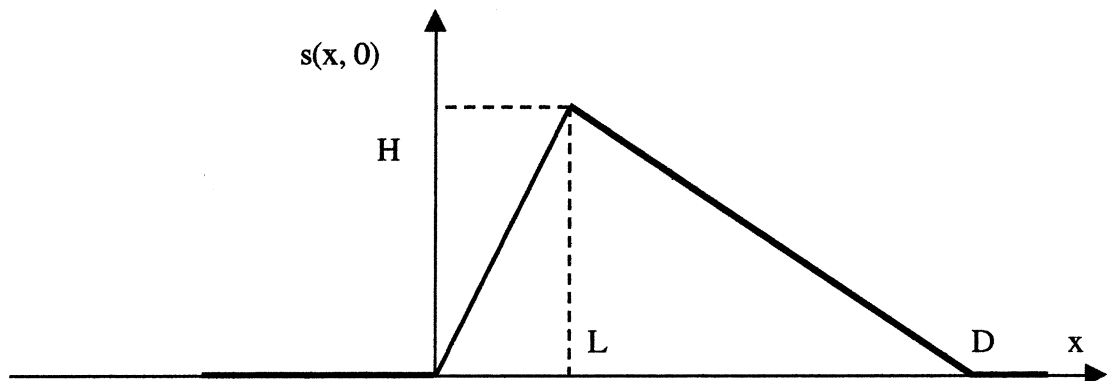
- Définir le phénomène de propagation d'une grandeur physique ondulatoire, scalaire $s(M, t)$, ou vectorielle $\vec{s}(M, t)$, de façon purement qualitative et en s'appuyant sur des exemples.
- Écrire l'équation de propagation sans amortissement (équation de d'Alembert) satisfaite par une grandeur physique ondulatoire.
- Cette équation fait intervenir une constante c caractéristique du milieu de propagation. Quelle en est la signification physique ? Citer des exemples d'expression de cette grandeur et les ordres de grandeur numériques associés.

2. Propagation, diffusion, convection

Définir les phénomènes de diffusion et convection en comparant leurs principales caractéristiques à celles du phénomène de propagation.

3. Ondes planes harmoniques - Impédance

- a) Dans le cas d'un problème unidimensionnel où la grandeur $s(x, t)$ ne dépend spatialement que d'une coordonnée cartésienne, pourquoi parle-t-on d'onde plane ? Quelle est alors la forme générale de cette grandeur solution de l'équation de d'Alembert ? Commenter.
- b) Une onde plane progressive $s(x, t)$ se déplaçant à la célérité c dans le sens des x positifs, représentée à la date $t = 0$ en fonction de x , a la forme suivante :



Représenter la fonction $s(x, t_0)$ en fonction de x à la date t_0 , et la fonction $s(x_0, t)$ en fonction de t à l'abscisse $x_0 = ct_0$.

- c) Dans le cas d'un problème à symétrie sphérique où la distance à l'origine est notée r , la grandeur $s(M, t)$, qui peut s'écrire $s(r, t)$, est appelée onde sphérique. La dépendance en r de cette fonction se distingue du cas précédent par l'existence d'un facteur décroissant en fonction de r . Quelle est l'origine physique de ce facteur ? Justifier sans réel calcul et par un argument physique que ce facteur est en $1/r$. Pourquoi et dans quelles conditions une onde sphérique peut-elle être qualifiée de "localement plane" ?
- d) Les solutions sinusoïdales de l'équation de propagation jouent un rôle essentiel. Pourquoi ?
- e) Une onde plane $s(M, t)$ peut alors, en notation complexe, s'écrire :

$$s(M, t) = s_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$$

Comment est appelé le vecteur $\vec{k}$? Préciser sa direction, son sens et son lien avec la pulsation ω . Quelle est la définition de la longueur d'onde λ associée ?

- f) En relation avec l'onde plane progressive, on associe au milieu de propagation une autre grandeur appelée impédance caractéristique. Quelle en est la définition et l'interprétation physique ? Donner des exemples.
- g) Ainsi, pour les ondes électromagnétiques, l'impédance caractéristique du vide est

$$Z_c = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}. \text{ Justifier cette expression.}$$

Qu'est-ce qu'un conducteur parfait ? Quelle est l'impédance associée ?

4. Ondes et conditions aux limites

- a) Dans la plupart des situations physiques, le milieu ne peut pas être considéré comme infini : l'onde rencontre une limite. Que se passe-t-il quand une onde plane rencontre cette limite ?
- b) Qu'appelle-t-on onde stationnaire, par opposition avec l'onde progressive ? Caractériser brièvement les différences entre ces deux types d'onde. Qu'appelle-t-on nœud ou ventre d'une onde stationnaire ?
- c) Donner des exemples physiques aboutissant à la création d'une onde stationnaire.
- d) Quelle relation doit satisfaire la longueur d'onde dans un milieu doublement limité orthogonalement à la direction de propagation, les deux limites, distantes de D , imposant chacune un nœud pour une grandeur ondulatoire associée ? Quelle est la dénomination d'un tel milieu ? Justifier celle-ci et donner un exemple simple correspondant.

5. Dispersion et absorption

- a) Le milieu de propagation peut aussi être dispersif et absorbant. Définir et décrire qualitativement les deux phénomènes associés.
- b) Qu'est-ce qu'un paquet d'ondes ? Comment un milieu dispersif agit-il sur un paquet d'ondes ?
- c) Qu'appelle-t-on relation de dispersion, vitesse de phase, vitesse de groupe ?
- d) Dans l'exemple des ondes électromagnétiques dans un conducteur ohmique de conductivité γ , écrire l'équation d'évolution du champ électrique et comparer les ordres de grandeur des différents termes. A quelle condition sur la fréquence peut-on parler de diffusion plutôt que de propagation ? Ecrire dans ce cas l'équation satisfaite par le champ électrique.
- e) Pour un champ électrique de la forme $\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(kx - \omega t)}$, résoudre l'équation précédente en faisant apparaître une distance caractéristique δ . Quelles en sont la dénomination et la signification physique ? Comment varie-t-elle avec la conductivité ? Avec la fréquence de l'onde ? Quelle est la valeur de δ pour le fer ($\gamma = 10^7 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$) à 50 Hz et pour le cuivre ($\gamma = 5,9 \cdot 10^7 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$) à 1kHz ? Citer des phénomènes analogues dans d'autres domaines de la physique.
- f) Dans l'exemple des ondes électromagnétiques dans un plasma comme l'ionosphère, la modélisation aboutit à la relation :

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\omega_p^2}{c^2} \quad \text{où } \omega_p \text{ est une pulsation caractéristique du plasma.}$$

Montrer alors que le plasma est dispersif mais non absorbant dans un certain domaine de fréquences. Que valent alors la vitesse de phase et la vitesse de groupe ? Quelle relation lie ces deux grandeurs ?

Quel type d'onde (nom, forme mathématique) observe-t-on en dehors de ce domaine ? En utilisant la notion de filtrage, comment qualifier le plasma vis-à-vis des ondes électromagnétiques qui peuvent le traverser ?

Que se passe-t-il alors quand une onde venant de la basse atmosphère arrive à la limite de l'ionosphère ? Donner une application possible de ce phénomène.

6. Guides d'onde

- Qu'est-ce qu'un guide d'ondes ? Quel en est l'intérêt ? En quoi un guide d'onde peut-il influencer sur la structure de l'onde ? Donnez des exemples de guide d'ondes.
- Une onde électromagnétique de fréquence $f = 30 \text{ GHz}$ se propage dans le vide limité par deux plans conducteurs parfaits, infinis, parallèles à la direction de propagation, distants de $L = 1 \text{ m}$. S'agit-il a priori d'une propagation libre ou guidée ?

PARTIE B – ELEMENTS DE DYNAMIQUE DES FLUIDES

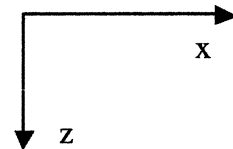
1. Description d'un fluide en mouvement

À un fluide en mouvement est associé, au point M et à la date t , le champ des vitesses $\vec{v}(M, t)$.

- Comment s'écrit l'accélération d'une particule de fluide à partir du champ $\vec{v}(M, t)$? Donner la signification de chacun des termes de cette accélération. Citer des exemples d'écoulements où l'accélération se réduit à l'un ou l'autre de ces deux termes.
- On peut « visualiser » le mouvement d'un fluide par les trajectoires ou les lignes de courant : donner la définition de ces deux termes. Comment déterminer leur équation ? Peut-il y avoir identité entre elles ? Comment peut-on visualiser expérimentalement le mouvement d'un fluide ?
- Le mouvement de houle, en forte profondeur, peut être approché par un champ des vitesses de la forme :

$$\vec{v}(z, t) = V_0 \cdot e^{-\frac{z}{a}} (\cos \omega t \vec{e}_x + \sin \omega t \vec{e}_z)$$

où V_0 , a et ω sont des constantes.



Déterminer les lignes de courant et la trajectoire d'une particule en admettant qu'elle reste au voisinage d'un point de profondeur z_0 .

Représenter lignes de courant et trajectoires sur un même graphique.

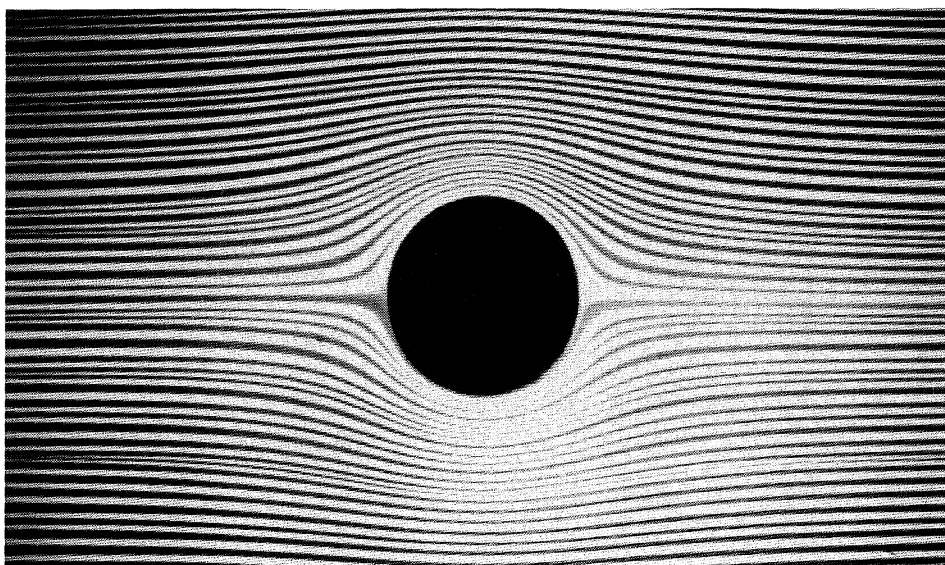
2. Les forces de pression

- Quelle est l'origine physique de la pression au sein d'un fluide ? Comment définir une force de pression ?
- Donner des ordres de grandeur de pression. Quelles sont notamment les valeurs des pressions extrêmes évaluées ou mesurées ?
- Donner l'expression de la densité volumique des forces de pression.

- d) Quelle relation traduit l'équilibre d'un fluide, de masse volumique constante et uniforme ρ_0 , soumis aux seules forces de pression et au champ de pesanteur terrestre $\vec{g}$, le référentiel terrestre étant supposé galiléen ?
- e) Cette relation est-elle modifiée si on prend en compte le caractère non galiléen du référentiel terrestre ? Que se passe-t-il si le fluide est en mouvement ? Commenter.
- f) Énoncer le théorème d'Archimède. Celui-ci est-il valide au sein d'un fluide en mouvement ?

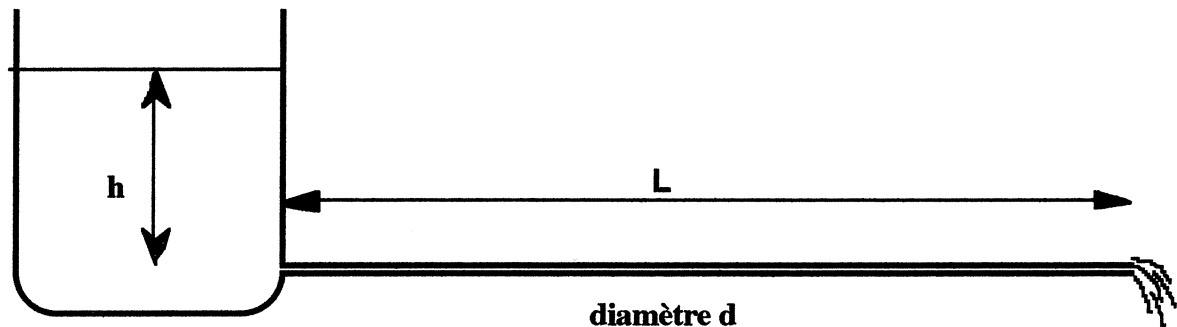
3. La viscosité

- a) Quelle est l'origine physique de la viscosité au sein d'un fluide ? Comment définit-on une force de viscosité ?
- b) Donner les ordres de grandeur de la viscosité dynamique de quelques fluides.
- c) Décrire succinctement une ou plusieurs expériences simples permettant de déterminer la viscosité d'un fluide.
- d) Quelle est la densité volumique des forces de viscosité pour un fluide newtonien en écoulement incompressible ? Qu'est ce que la viscosité cinématique ?
- e) Pour un écoulement de fluide de viscosité cinématique ν (dont l'unité est le $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$), de vitesse V et dimension L caractéristiques, retrouver par simple analyse dimensionnelle l'expression du nombre sans dimension de Reynolds.
- f) Donner deux interprétations équivalentes de ce nombre faisant intervenir des grandeurs caractéristiques de l'écoulement. Quel en est l'intérêt pratique ?
- g) La photo ci-dessous montre un écoulement autour d'un obstacle circulaire, à très faible nombre de Reynolds, dans une cellule de Hele-Shaw : l'écoulement est bidimensionnel, le système étant enserré entre deux plaques transparentes parallèles au plan de l'écoulement, distantes de 1 mm environ.



Cet écoulement est bien représenté par le modèle mathématique d'un écoulement potentiel d'un fluide parfait autour du même obstacle. En quoi est-ce paradoxal ?

Un viscosimètre à écoulement, destiné à mesurer la viscosité d'un liquide, peut être schématiquement représenté sur la figure ci-dessous :



où h désigne la hauteur de liquide dans le réservoir, d le diamètre du tube capillaire d'écoulement et L sa longueur.

h) L'écoulement dans le tube suit le modèle de Poiseuille. Quelles sont les caractéristiques principales de ce modèle ?

i) L'évaluation du nombre de Reynolds est-elle ici judicieuse ?

Dans le modèle de Poiseuille, le débit volumique Q dans le tube est donné par la formule :

$$Q = \frac{1}{128} \frac{\pi \rho g h d^4}{\eta L} \quad \text{où } \rho \text{ est la masse volumique du liquide et } \eta \text{ sa viscosité dynamique.}$$

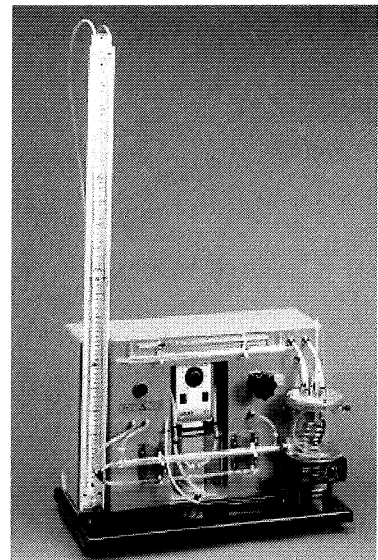
j) La viscosité ne peut maîtriser l'écoulement dès l'entrée du tube. Évaluer alors, en fonction des mêmes grandeurs, une longueur ℓ nécessaire à l'établissement du régime de Poiseuille.

Le constructeur propose deux diamètres possibles pour l'écoulement avec les données :

$$d_1 = 0,2 \text{ mm ou } d_2 = 0,4 \text{ mm et } L = 400 \text{ mm.}$$

Pour l'eau, et avec $h = 20 \text{ cm}$, on recueille une masse $m_1 = 350 \text{ mg}$ pendant 30 min d'écoulement dans le tube de diamètre d_1 et $m_2 = 5,6 \text{ g}$ pour la même durée dans le tube de diamètre d_2 . (La hauteur h est supposée maintenue constante grâce à un dispositif approprié).

k) D'après les expressions précédentes, en déduire la viscosité dynamique de l'eau ainsi que la valeur numérique de la longueur ℓ pour les écoulements dans les tubes 1 et 2. Commenter les résultats obtenus.



Un viscosimètre à écoulement

4. Capillarité

a) Qu'est-ce que le phénomène de capillarité ? Quelle en est l'origine physique ? Comment définit-on une force de tension superficielle ?

- b) Exprimer le travail élémentaire des forces de capillarité. Citer des expériences simples le mettant en évidence.
- c) Décrire succinctement une ou plusieurs expériences simples permettant de déterminer le coefficient de tension superficielle A d'un fluide.
- d) Pour un fluide de masse volumique ρ_0 , de constante de tension superficielle A (dont l'unité est le $N.m^{-1}$), soumis au champ de pesanteur g , déterminer, par simple analyse dimensionnelle, la longueur capillaire l_c . Évaluer l_c pour l'eau dont $A = 70 \text{ mN.m}^{-1}$. Quel est l'intérêt de cette grandeur ? Peut-on la « visualiser » expérimentalement ?
- e) Quelle est la différence de pression ΔP_1 entre l'intérieur et l'extérieur d'une goutte sphérique de rayon R de ce fluide ?
- f) Quelle est la différence de pression ΔP_2 entre le haut et le bas de la même goutte soumise au champ de pesanteur g ?
- g) On définit le nombre de Bond B_o comme le rapport $\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}$. Quel est l'intérêt de ce nombre ?
Montrer qu'il permet de retrouver l'expression de l_c .

5. Équations fondamentales de la dynamique des fluides

On associe au fluide en mouvement les champs de vitesse, de pression et de masse volumique respectivement notés $\vec{v}(M, t)$, $P(M, t)$ et $\rho(M, t)$.

- a) Écrire l'équation dite de continuité liant les grandeurs $\rho(M, t)$ et $\vec{v}(M, t)$. Quelle est l'interprétation physique de cette équation ?
- b) Définir un écoulement incompressible et déduire de l'équation précédente une propriété caractéristique de son champ des vitesses.
- c) Dans le cas général, appliquer la relation fondamentale de la dynamique à une particule de fluide et en déduire l'équation d'Euler.
- d) Les deux équations écrites en a) et c) suffisent-elles a priori à la détermination de ρ , P et $\vec{v}$? Quel type d'hypothèse(s) supplémentaire(s) peut-on suggérer ? Une hypothèse retenue dans certains cas est celle d'écoulements isentropiques : comment discuter de la pertinence de ce modèle ?

Au fluide est alors associé son coefficient de compressibilité isentropique χ_s , supposé en être une constante caractéristique, donné par la relation :

$$\chi_s = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_s$$

- e) En adoptant pour le fluide le modèle d'un gaz parfait diatomique, donner l'expression de χ_s en fonction de la pression du gaz. Calculer χ_s dans le cas de l'air à $P_0 = 10^5 \text{ Pa}$.

PARTIE C - ONDES ACOUSTIQUES

1. Équations des ondes acoustiques

Le fluide, supposé parfait et soumis aux seules forces de pression, est à l'équilibre caractérisé par des valeurs uniformes P_0 de la pression et ρ_0 de la masse volumique. Du point de vue thermodynamique, ses évolutions seront considérées comme isentropiques, auxquelles correspond le coefficient de compressibilité χ_s .

On étudie ici des mouvements du fluide au sein duquel pression et masse volumique sont écrites sous la forme :

$$P(M, t) = P_0 + \delta P(M, t) \quad \rho(M, t) = \rho_0 + \delta \rho(M, t)$$

- a) Qu'appelle-t-on approximation acoustique ? Quel est l'ordre de grandeur de δP pour des ondes acoustiques dans l'air ?
- b) À partir des équations de la dynamique des fluides linéarisées au 1^{er} ordre, établir l'équation de propagation des ondes acoustiques relative à la surpression δP . Quelle est la célérité de ces ondes ? Dans le modèle du gaz parfait, établir la loi de variation de la célérité avec la température. Comparer les ordres de grandeur de c dans les gaz et dans les liquides.
- c) Quels phénomènes, dont on n'a pas ici tenu compte, pourraient rendre le fluide absorbant et dispersif ?
- d) À partir des mêmes relations établir l'équation :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho_0 v^2 + \frac{1}{2} \chi_s \delta P^2 \right) + \text{div}(\delta P \vec{v}) = 0.$$

Quelle est la signification physique de cette équation ? Identifier et interpréter chacun de ses termes. Citer une équation analogue dans un autre domaine de la physique.

- e) On définit l'impédance acoustique liée à une onde plane progressive comme le quotient $Z = \frac{\delta P}{v}$ où v est la valeur algébrique de la vitesse dans la direction de propagation. Dans un fluide illimité, montrer que cette impédance ne dépend que des caractéristiques du fluide et l'exprimer en fonction de la masse volumique ρ_0 et de la célérité c .
- f) L'onde acoustique est caractérisée par une vitesse du fluide de la forme $\vec{v} = v_0 e^{i(kx - \omega t)} \vec{e}_x$. Définir et exprimer l'intensité moyenne associée à cette onde.
- g) Le seuil minimal d'audition correspond à l'intensité $I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$. La célérité du son dans l'air étant $c \approx 340 \text{ m.s}^{-1}$, quelle serait alors dans ce modèle l'amplitude de déplacement du tympan au seuil d'audition pour une fréquence de 440 Hz ?
- h) Quelle est l'expression I_{dB} de l'intensité sonore en décibels ? À quelle valeur, en décibels, l'intensité du seuil de douleur $I_s = 1 \text{ W.m}^{-2}$ correspond-elle ?
- i) Le prix d'un appareil ménager peut varier du simple au triple quand, entre autres caractéristiques, le niveau sonore annoncé passe de 55 à 44 dB. Cela paraît-il justifié ?

2. Onde acoustique et conditions aux limites

Un tuyau cylindrique est rempli d'air. Une onde acoustique plane harmonique, de fréquence $f = 440 \text{ Hz}$ se propage dans la direction de l'axe du tuyau.

- a) Comment " fermer " le tuyau à l'une de ses extrémités sur une impédance nulle, infinie ou égale à l'impédance caractéristique du fluide ? Quels sont, dans chacun de ces cas, les coefficients de réflexion pour les grandeurs associées à l'onde ?

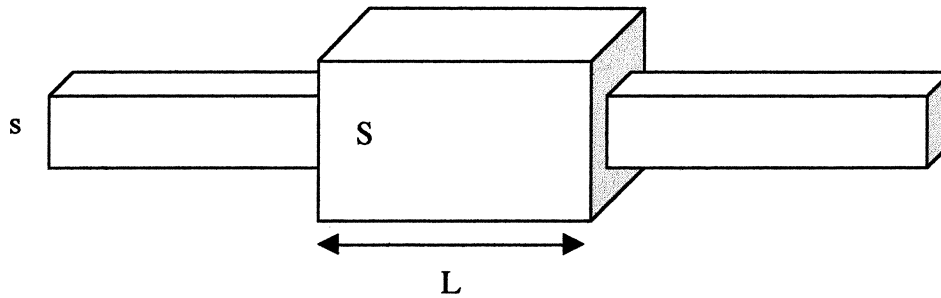
Un plan infini sépare l'espace en deux régions occupées par deux fluides parfaits dont les impédances caractéristiques seront indicées 1 (pour le fluide s'étendant de $-\infty$ à $x = 0$) et 2 (pour le fluide s'étendant de $x = 0$ à $+\infty$).

- b) Quelles relations les grandeurs liées à une onde acoustique doivent-elles vérifier à la traversée de l'interface ?
- c) Déterminer les coefficients de réflexion r et de transmission t pour la suppression d'une onde acoustique plane progressive se propageant dans le sens des x positifs et provenant de $-\infty$.
- d) Calculer R et T , coefficients de réflexion et de transmission relatifs à l'intensité sonore I . Quelle relation les lie ? Pourquoi ?
- e) L'impédance caractéristique de l'air à 20°C est $Z_{\text{air}} = 450 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Les impédances caractéristiques des constituants du corps humain (eau, graisse, muscle, os) sont toutes du même ordre de grandeur $Z_{\text{corps}} \approx 10^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Calculer T dans ce cas et en déduire le rôle du stéthoscope du médecin.
- f) Par quel procédé pourrait-on diminuer r ? Quelles en sont les applications, dans le domaine des ondes acoustiques, dans un autre domaine ?
- g) Pourquoi entend-on bien mieux le son d'un diapason si celui-ci est placé sur une boîte associée ? Quelle devrait être la plus grande dimension de la boîte pour un diapason donnant le La de fréquence 440 Hz ? La dimension réelle est $L = 17,5 \text{ cm}$. Comment interpréter la différence avec le résultat estimé précédemment ?
- h) En utilisant le modèle précédent pour le conduit externe de l'oreille, de longueur $2,5 \text{ cm}$, calculer la fréquence à laquelle elle est la plus sensible.
- i) Une salle a la forme d'un parallélépipède rectangle de dimensions L_x, L_y, L_z . Qu'appelle-t-on fréquences propres de la salle ? Calculer ces fréquences propres en fonction de la célérité du son c et des dimensions de la salle. Quelle différence y a-t-il alors entre une cathédrale et une petite pièce ?

3. Filtre acoustique

Dans une conduite d'air de section s , un système de ventilation engendre des ondes acoustiques de fréquences élevées indésirables pour l'oreille humaine.

On dispose alors un filtre acoustique constitué d'une cellule de longueur L et de section S ($S > s$) intercalé dans la conduite :



- a) En s'inspirant de la méthode de résolution utilisée à la question 2c, établir l'expression des coefficients de réflexion et transmission r et t de la suppression d'une onde acoustique incidente de fréquence f à l'interface s - S , de même que celle des coefficients r' et t' , à l'interface S - s .
- b) En déduire que le coefficient de transmission en énergie T du filtre est donné par :

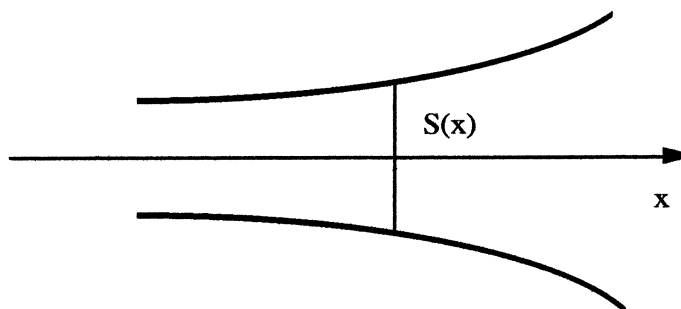
$$T = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{S}{s} - \frac{s}{S} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi f}{f_0} \right)}$$

où f_0 est une fréquence caractéristique qui s'exprime en fonction de L et de la célérité c de l'onde acoustique.

- c) Tracer l'allure de la fonction $T(f)$ en précisant en particulier les valeurs des maxima et minima et des fréquences correspondantes. Examiner le cas où $S \gg s$.
Citer un système analogue dans un autre domaine de la physique ?
- d) Comment définir le facteur de qualité (ou finesse) de ce filtre ? Donner son expression en fonction du rapport $\frac{S}{s}$.
- e) Sur quels paramètres du filtre faut-il agir pour atténuer effectivement les fréquences indésirables ?

4. Propagation d'une onde acoustique dans un pavillon

On s'intéresse ici à la propagation d'une onde acoustique dans un pavillon à symétrie de révolution, de section variable $S(x)$:



On suppose le problème unidimensionnel, avec une vitesse de la forme :

$$\vec{v} = v_0 \cdot e^{i(kx - \omega t)} \vec{e}_x$$

- a) Pourquoi cette solution ne peut-elle être qu'approchée ?
- b) La section du pavillon est de la forme $S = S_0 e^{\frac{x}{a}}$. Quelle condition la longueur d'onde $\lambda_0 = \frac{2\pi c}{\omega}$ (où c est la célérité de l'onde dans l'espace illimité) doit-elle respecter pour que la solution précédente reste approximativement valide ?
- c) Quelle équation, parmi celles qui sont écrites dans la question C1b, n'est plus vérifiée par la vitesse ainsi modélisée ? À partir d'un bilan de masse portant sur une « tranche élémentaire » de fluide, établir une nouvelle équation la remplaçant.
- d) En déduire la relation liant k et ω :

$$k^2 - \frac{ik}{a} = \frac{\omega^2}{c^2}$$

- e) Montrer alors que le pavillon ne laisse se propager que des ondes de fréquences supérieures à une fréquence de coupure qu'on exprimera en fonction de a et de c .
- f) Le pavillon modélise un porte-voix de longueur L . Que se passe-t-il quand l'onde, émise à l'embouchure, parvient à l'extrémité du porte-voix ? Quel est l'intérêt d'un tel dispositif ?
- g) Le porte-voix est-il absorbant, dispersif ? (justifier votre réponse).
- h) Que peut-on dire de la voix transmise par l'appareil ?

5. Effet Doppler

- a) Qu'est-ce que l'effet Doppler ?
- b) Une source S en mouvement de vitesse instantanée $\vec{v}$ émet, à deux instants séparés de δt , un « bip » sonore qui se propage à la célérité c dans le milieu considéré. Montrer que l'intervalle de temps de réception pour un observateur fixe O est :

$$\delta t' = \delta t \left(1 - \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{c} \right)$$

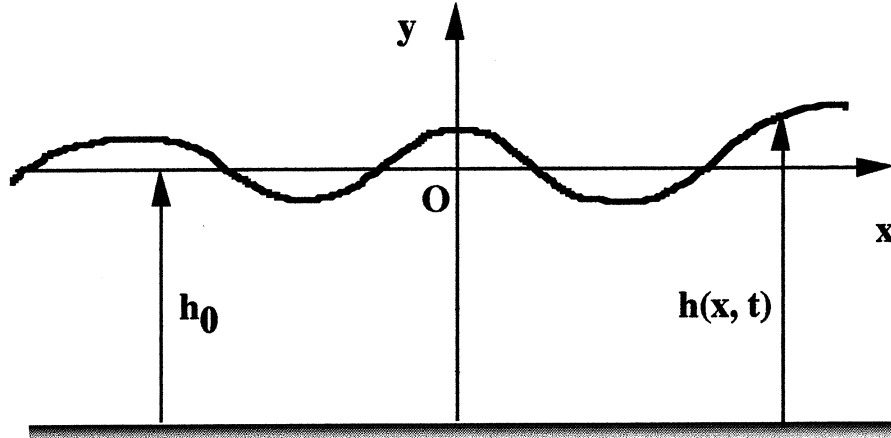
où $\vec{u}$ est le vecteur unitaire de la direction SO , dirigé de S vers O . À quelle condition ce résultat est-il valable ?

- c) La source émet à présent un son continu de fréquence f . Quelle est la fréquence f' perçue par l'observateur ? Commenter ce résultat en le confrontant à une situation de la vie courante. Citer une application de l'effet Doppler dans le cadre des ondes acoustiques.
- d) Montrer que les calculs précédents permettent d'approcher le phénomène de « bang » perçu lors d'un vol supersonique.
- e) Décrire une manifestation de l'effet Doppler dans un autre domaine de la physique.

PARTIE D

ONDES DE GRAVITE, ONDES CAPILLAIRES, SOLITONS

On étudie dans cette partie les ondes de surface à l'interface de l'air et d'un fluide liquide tel que l'eau. L'espace est rapporté au repère $R(O, x, y, z)$ et le problème est invariant par translation suivant z . L'axe Ox est confondu avec la trace de la surface du fluide au repos. L'épaisseur de la couche de fluide au repos est h_0 . La trace de la surface libre du fluide en mouvement est représentée par $h(x, t)$:



Les hypothèses d'étude sont les suivantes :

- ◆ Le fluide est parfait incompressible de masse volumique ρ_0 .
- ◆ Il est soumis aux forces de pression, de pesanteur et de tension superficielle.
- ◆ Les mouvements sont suffisamment petits pour permettre une linéarisation au premier ordre des équations.
- ◆ L'écoulement est supposé potentiel, de potentiel des vitesses $\Phi(x, y, t)$.
- ◆ La pression à la surface du fluide est donnée par $P = P_0 - \frac{A}{R}$ où P_0 est la pression atmosphérique uniforme, A est la constante de tension superficielle du fluide et R le rayon de courbure local instantané de la surface, lui-même tel que :

$$\frac{1}{R} = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$$

1. Équations des ondes de surface

- a) Qu'est-ce qu'un écoulement potentiel ? Quelle équation la fonction Φ doit-elle ici vérifier ?
- b) Montrer que l'intégration de l'équation d'Euler permet d'établir, pour ces ondes de surface, la relation :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho_0} + gy = F(t) \quad (1)$$

où $F(t)$ est une fonction du temps

- c) Montrer que le champ des vitesses $\vec{v}$ n'est pas modifié si on remplace la fonction $F(t)$ par une constante, ce qu'on fera dans la suite.
- d) Dédurre alors de la relation (1) une équation satisfaite par Φ en $y = h - h_0$.

2. Célérité

- a) La fonction $\Phi(x, y, t)$ de cet écoulement potentiel est cherchée sous la forme :

$$\Phi(x, y, t) = f(x - ct) \cdot g(y)$$

où f est une fonction périodique de la variable $x - ct$. Interpréter physiquement cette solution et déterminer la forme générale des fonctions f et g (on remarquera que le cas h_0 infiniment grand correspond à une situation physique réelle).

- b) Montrer que l'existence du fond à la profondeur $y = -h_0$ permet d'écrire finalement la fonction Φ sous la forme :

$$\Phi(x, y, t) = \Phi_0 \cdot \cosh[k(y+h_0)] \cdot e^{i(kx-\omega t)} \quad \text{avec } k = \frac{\omega}{c}$$

- c) Déterminer $h(x, t)$ et en déduire la forme de la surface libre.
- d) En utilisant l'équation trouvée au 1d et en remplaçant h par sa valeur moyenne h_0 , montrer que la célérité des ondes de surface s'écrit :

$$c^2 = gh_0 \frac{\tanh(kh_0)}{kh_0} (1 + k^2 l_c^2)$$

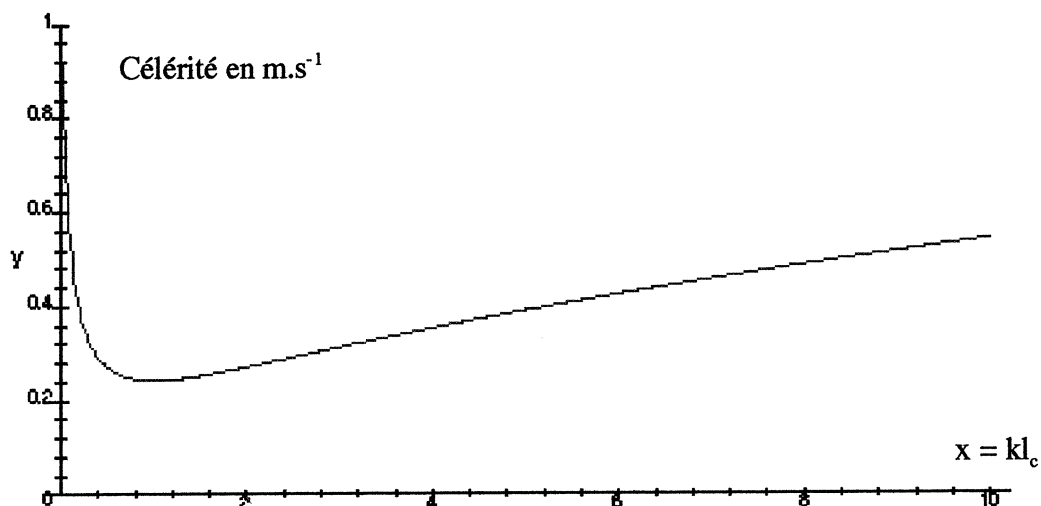
où l_c est la longueur capillaire caractéristique du fluide fonction de A , ρ_0 , g , déjà définie au B4d.

3. Des ronds dans l'eau...

Trois longueurs caractéristiques interviennent dans les ondes de surface : la longueur d'onde λ de l'onde, la profondeur h_0 et la longueur capillaire l_c .

Au bord d'une mare de faible profondeur, les valeurs numériques de h_0 et l_c sont $h_0 = 10$ cm et $l_c = 3$ mm (longueur capillaire de l'eau). Les variations de la célérité c en fonction de la variable réduite $x = kl_c$ sont représentées sur la figure en haut de page suivante dans l'intervalle $x = [0, 10]$, en prenant $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$.

- a) En utilisant l'expression de la célérité trouvée au D2d, montrer que cette courbe fait apparaître deux domaines où domine soit la gravité, soit la capillarité. Calculer la valeur λ_m de la longueur d'onde séparant ces deux domaines.



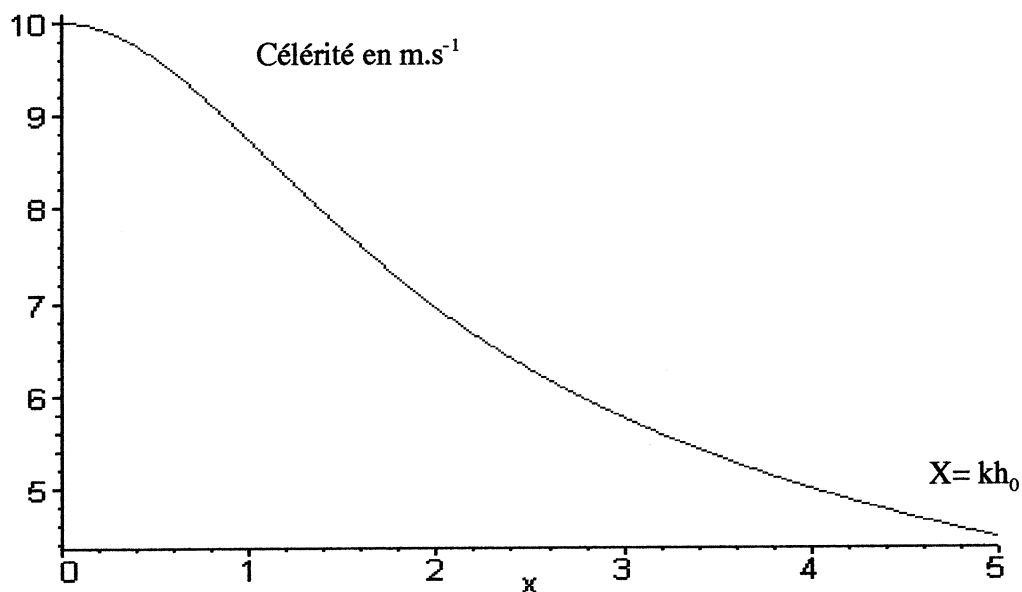
- b) Déterminer dans chacun des domaines l'expression approchée de la célérité en fonction de la longueur d'onde.
- c) Quand on jette un petit caillou dans une mare, on voit tout d'abord se propager des rides fines et serrées, distantes d'environ 2 mm, puis des ondes de plus grande amplitude et longueur d'onde, distantes de 5 cm environ.

Montrer que les résultats de la question précédente sont compatibles avec ces observations et calculer les célérités des deux types d'onde.

4. La houle

On étudie à présent des ondes de surface en mer, où on garde la même valeur de l_c , mais avec $h_0 = 10$ m.

On représente alors ci-dessous les variations de la célérité en fonction de $X = kh_0$ dans l'intervalle $X = [0, 5]$:



- Montrer que dans cet intervalle, les phénomènes de capillarité peuvent être négligés.
- Montrer que la courbe présente à nouveau deux domaines dits « en eau profonde » ou « en eau peu profonde ».
- Déterminer la forme simplifiée prise par la célérité c en eau profonde. Calculer cette célérité pour une houle dont les vagues sont espacées de 5 m.
- Montrer que le milieu est dispersif et établir la relation simple liant vitesse de phase et vitesse de groupe.

5. Solitons

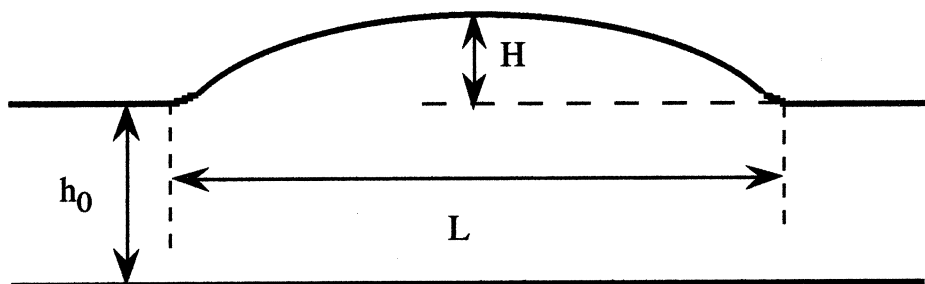
On se place à présent dans le domaine des eaux peu profondes.

- Montrer qu'à faible profondeur, l'expression de la célérité des ondes de surface devient :

$$c = \sqrt{gh_0}.$$

Commenter ce résultat. En quoi permet-il de mieux comprendre le déferlement des vagues sur le rivage ?

On considère alors une onde solitaire dont la forme est donnée par la figure suivante :



- Donner un ordre de grandeur de la différence de célérité δc_1 entre le sommet et la base de la vague. Comment cet effet déforme-t-il la vague au cours de sa propagation ?
- Un développement limité plus poussé permet d'obtenir une expression corrigée de c sous la forme :

$$c = \sqrt{gh_0} \left(1 - \frac{k^2 h_0^2}{6} \right)$$

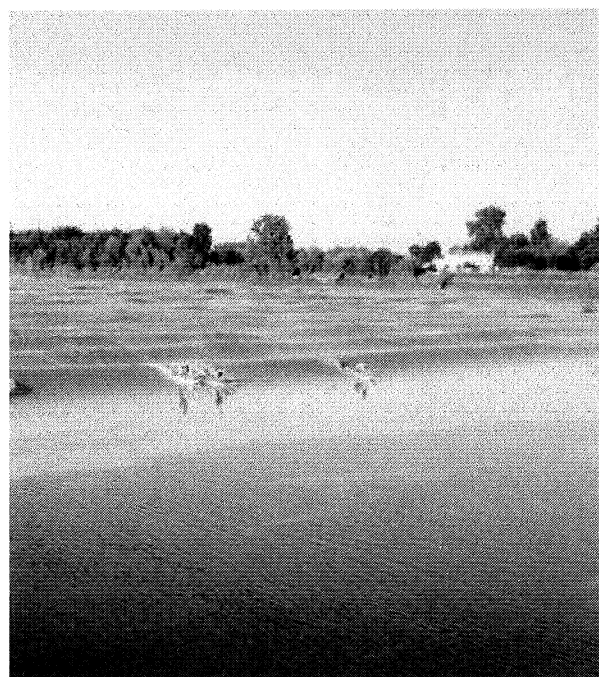
Comment la dispersion ainsi mise en évidence déforme-t-elle la vague ? Plus précisément évaluer l'intervalle de variation de k et en déduire un ordre de grandeur de la variation extrême de célérité δc_2 .

- Déduire des calculs précédents que la vague pourra se propager sans déformations si les ordres de grandeur de H , L et h_0 sont liés par une relation que l'on déterminera.

- e) Ce modèle de soliton peut représenter le phénomène réel d'un mascaret non turbulent, vague unique (ou série limitée de 5 à 10 vagues) remontant le cours de certains estuaires peu profonds à l'occasion de fortes marées.

Pour des profondeurs typiques de 2 à 4 m, ces mascarets, dont la hauteur peut atteindre jusqu'à 2 m, remontent les estuaires à des vitesses de 15 à 30 km/h.

En prenant $h_0 = 3$ m et $L = 5$ m, et en estimant d'après les questions précédentes les valeurs de H et c correspondantes, vérifier que le modèle est compatible avec les observations faites sur les mascarets.



Photos du mascaret de la Gironde

6. Rapport relatif à la composition de physique

Remarques générales

Dans la continuité des années précédentes, l'épreuve de composition permet d'évaluer le niveau général des candidats en physique. Elle présente des aspects « question de cours » où la future enseignante ou le futur enseignant doit montrer ses connaissances et ses qualités d'exposition, avec concision et en employant les mots justes.

C'est pourquoi le sujet met délibérément l'accent sur des questions « qualitatives » où doivent être mis en lumière ou commentés des concepts fondamentaux rencontrés dans de larges domaines de la physique : propagation, diffusion, dispersion, ondes planes (progressives ou stationnaires), résonance, guidage, filtrage, notions de pression, de viscosité, etc.

L'aspect expérimental est tout aussi important : plusieurs questions concernant des grandeurs physiques demandent des valeurs numériques ou des ordres de grandeur (célérité, pression...) voire des protocoles expérimentaux simples permettant de les mesurer (expériences souvent rencontrées dans l'épreuve orale du montage...).

La partie A, qui a pour sujet le phénomène de propagation (envisagé dans une large mesure en s'appuyant sur l'électromagnétisme), est traitée, au moins partiellement, par la très grande majorité des candidats.

La partie B aborde la physique des fluides, les différentes notions qui interviennent (pression, viscosité, capillarité) et les équations élémentaires qui régissent l'écoulement d'un fluide.

La partie C privilégie l'étude des ondes acoustiques et propose quelques exemples d'application (filtre acoustique, pavillon exponentiel, ...). Ces deux parties sont le plus souvent assez partiellement étudiées, même si quelques bonnes copies traitent l'une ou l'autre de façon quasi exhaustive.

La partie D qui s'intéresse aux ondes de surface et compare les effets de gravité et de capillarité n'est que très rarement abordée.

Les correcteurs constatent qu'un grand nombre de candidats, face à des questions qualitatives, demandant des idées claires et un certain esprit de synthèse, semblent paralysés et plus lents que lorsqu'il s'agit d'écrire des équations. Il est vrai que les correcteurs ont pu apprécier de très bonnes copies, où il est fait montre d'une grande connaissance des phénomènes et surtout d'une excellente capacité à les exposer avec simplicité et précision. Mais trop de candidats, au mieux, n'ont pas les qualités d'expression leur permettant de montrer qu'ils ont compris ce qu'ils exposent, et, au pire, ont des idées si confuses qu'ils peuvent dire quelque chose et son contraire en réponse à une même question.

En réponse à des questions « qualitatives », deux écueils importants doivent être évités :

- La paraphrase pure et simple :
 - « un guide d'onde est un guide qui sert à guider les ondes électromagnétiques »
 - « les forces de pression sont à l'origine de la pression ».
- L'à-peu-près présent dans tant de copies et dont voici une forme extrême : « une onde plane est une onde qui se propage dans un plan »

On trouve là l'exemple typique d'un candidat dont on n'est pas tout à fait sûr qu'il « pense » un contresens, mais qui en tout cas ne possède pas « les mots pour le dire ».

Remarques portant sur des points particuliers

Les remarques qui suivent correspondent à des situations fréquemment rencontrées et ont pour but d'aider les candidats.

A3f Les réponses à cette question sont de nature et de qualité très diverses. Donner une définition simple, claire et unique, de l'impédance d'un milieu vis-à-vis d'une onde n'est certes pas chose facile. De nombreux candidats évoquent un quotient de 2 grandeurs « cause » et « effet » ; d'autres se limitent plus prudemment à l'idée d'un quotient de grandeurs couplées ; d'autres, enfin, moins nombreux, envisagent surtout la notion d'impédance en rapport avec une éventuelle limite du milieu. Le jury a favorablement accueilli et noté toutes les informations justes et intéressantes.

L'étude des régimes électriques sinusoïdaux associe souvent les notions de résistance (électrique) et d'impédance. De là vient probablement la confusion qui conduit à définir malencontreusement l'impédance comme « la résistance opposée par le milieu à la propagation de l'onde ».

A3g Il n'est donc pas surprenant, dans ces conditions, de lire : « un conducteur parfait n'oppose aucune résistance au passage d'une onde : son impédance est donc nulle »...

A4b Une onde stationnaire n'est pas « une onde indépendante du temps ». Elle ne peut non plus être réduite à « une onde qui ne se propage pas ». Ce qui « ne se propage pas », c'est évidemment l'énergie ; en électromagnétisme, pour une onde stationnaire, la valeur moyenne du vecteur de Poynting est nulle.

A4c-d La création d'une onde stationnaire ne nécessite que la réflexion totale d'une onde sur une limite, indépendamment de sa fréquence. En revanche, un milieu doublement limité ne permet que la création d'ondes stationnaires résonnantes dont il impose les fréquences. Une telle différence justifiait l'existence des 2 questions c et d.

A5a Le prisme est un instrument dispersif. Mais il n'est pas correct de conclure que la dispersion entraîne « l'éparpillement de l'onde dans différentes directions ». La définition de l'absorption doit dépasser la mention d'une simple « atténuation » de l'onde (qu'on trouve également dans l'onde sphérique se propageant dans un milieu non absorbant) : un argument énergétique s'impose.

A5b La notion de paquet d'ondes est souvent introduite à partir de la superposition de deux ondes de fréquences voisines. Mais on ne peut pas se limiter à cet exemple, instructif mais trop élémentaire. Un recours à l'analyse de Fourier est judicieux.

A6b Pour déterminer le caractère guidé ou non d'une onde, il ne suffit pas de regarder la direction moyenne du vecteur d'onde par rapport aux limites, une comparaison des dimensions caractéristiques du guide et de l'onde est nécessaire. En outre, le gigahertz (GHz) vaut de 10^6 à 10^{12} Hz, suivant les copies.

B1a Evoquer les termes d'accélération locale et convective est insuffisant. La question suggère de les expliciter et d'en donner une interprétation physique. Une fois encore, affirmer qu'« on utilise un colorant pour visualiser le mouvement d'un fluide » ne constitue pas non plus une réponse satisfaisante. De même, les lignes de courant ne sont pas des courbes à module de vitesse constant.

B2b Cette question met en lumière les différences entre des candidats « physiciens » qui citent souvent de nombreux et divers ordres de grandeur de pression, pertinents et parfois originaux, et d'autres qui ne connaissent que la pression atmosphérique (souvent présentée comme valant 1bar) et la pression nulle !

B2e La question est parfois mal comprise : il s'agit de discuter de la prise en compte du caractère non galiléen du référentiel terrestre et non des propriétés d'un référentiel non galiléen en général.

Par ailleurs, la force d'inertie d'entraînement est incluse dans la définition du champ de pesanteur, et la force d'inertie de Coriolis est nulle quand le fluide est au repos dans ce référentiel.

B3f La construction même du nombre de Reynolds, par comparaison des termes de convection et diffusion dans l'équation de Navier-Stokes, ou des temps caractéristiques correspondants, indique bien l'intérêt qu'il présente pour l'évaluation de l'importance relative des deux phénomènes dans la maîtrise de l'écoulement du fluide. Son utilisation pour la distinction des écoulements laminaires et turbulents peut être pertinente pourvu qu'on définisse ces notions et l'origine de la valeur numérique frontière séparant les 2 types d'écoulements.

B3i La question est à relier à la précédente : l'écoulement est ici structurellement laminaire (imposé par la symétrie) et maîtrisé par la viscosité. L'évaluation du nombre de Reynolds peut d'ailleurs renseigner sur l'éventuelle instabilité de ce régime.

B4a Le bel exemple de paraphrase : « les forces de tension superficielle sont à l'origine du phénomène de capillarité » ne peut pas constituer à lui seul une réponse à cette question.

B5b Il faut distinguer fluide incompressible (où la dérivée partielle par rapport au temps de la masse volumique est identiquement nulle) et écoulement incompressible (où c'est la dérivée particulaire de la même grandeur qui est identiquement nulle).

C1a Toute valeur numérique de la surpression comprise dans l'intervalle d'audition de l'oreille humaine a été retenue comme bonne par le jury.

C1g Il n'est pas raisonnable de donner une amplitude de déplacement du tympan de 75 cm

C1i Le jury attend simplement une réponse argumentée sur la signification de l'échelle logarithmique et /ou sur la courbe de réponse de l'oreille humaine.

C2g On retrouve ici à l'écrit, les confusions aussi rencontrées à l'oral entre les notions d'adaptation d'impédance, de résonance et d'amplification ...

C4g Pour certains candidats, affirmer que le porte-voix amplifie la voix est un argument permettant de justifier qu'il est non absorbant ! En réalité, un porte-voix n'est pas un amplificateur. Une démonstration complète de la « transparence » de l'appareil n'est que très rarement effectuée.

Conclusion

L'épreuve a été construite de façon à aborder des sujets très variés. Elle a été correctement réussie par l'ensemble des candidats admissibles et a permis une évaluation graduelle des candidats, atteignant ainsi l'objectif visé.

SESSION DE 2004**concours externe
de recrutement de professeurs agrégés****section : sciences physiques****option : physique**

composition de chimie

Durée : 5 heures

Calculatrice électronique de poche – y compris programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

Tout document et tout autre matériel électronique sont interdits.

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

Les solides en chimie

Ce problème étudie certains aspects de la chimie où interviennent des espèces à l'état solide. Les quatre parties sont totalement indépendantes. Les données sont regroupées ci-dessous.

Données numériques

Charge élémentaire : $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$

$1/4\pi\epsilon_0 = 8,987 \times 10^9 \text{ J.C}^{-2}.\text{m}$

Constante d'Avogadro : $N = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

Données sur les éléments

$Z(\text{Cu}) = 29$

$Z(\text{Zn}) = 30$

Masse molaire : $\text{Zn} : 65,4 \times 10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$

Electronégativités : $\text{H} : 2,2$; $\text{Ni} : 1,8$

Données géométriques

Rayons ioniques : $\text{Na}^+ : 0,102 \text{ nm}$; $\text{Cl}^- : 0,181 \text{ nm}$

Rayons covalents : $\text{Ni} : 0,125 \text{ nm}$; $\text{H} : 0,037 \text{ nm}$

Rayons de Van der Waals : $\text{Ni} : 0,210 \text{ nm}$; $\text{H} : 0,120 \text{ nm}$

Données énergétiques ($T = 298 \text{ K}$)

Energie de première ionisation : $EI(\text{Na}) = 496 \text{ kJ.mol}^{-1}$

Affinité électronique : $AE(\text{Cl}) = +349 \text{ kJ.mol}^{-1}$

Enthalpie standard de sublimation : $\Delta_{\text{sub}}H^\circ(\text{Na}) = 107 \text{ kJ.mol}^{-1}$

Enthalpies standard de dissociation : $\Delta_{\text{dis}}H^\circ(\text{H}_2) = 436 \text{ kJ.mol}^{-1}$; $\Delta_{\text{dis}}H^\circ(\text{Cl}_2) = 122 \text{ kJ.mol}^{-1}$

Enthalpie standard de formation : $\Delta_f H^\circ(\text{NaCl}) = -411 \text{ kJ.mol}^{-1}$

Constantes d'équilibre ($T = 298 \text{ K}$)

Produit ionique de l'eau : $K_e = 10^{-14}$

Produits de solubilité : $\text{Al}(\text{OH})_3 : pK_s = 32,3$; $\text{CuI} : pK_s = 12,0$

Constante de formation du complexe $\text{Al}(\text{OH})_4^-$: $\beta_4 = 5 \times 10^{35}$

Données électrochimiques

Potentiels standard d'oxydoréduction ($T = 298 \text{ K}$) :

$\text{Cu}^{2+}/\text{Cu} : E_1^\circ = 0,34 \text{ V}$

$\text{Cu}^+/\text{Cu} : E_2^\circ = 0,52 \text{ V}$

$\text{I}_3^-/\text{I}^- : E_3^\circ = 0,54 \text{ V}$

Conductivités molaires limites des ions ($T = 298 \text{ K}$) :

$\lambda_m^\circ(\text{Al}^{3+}) = 183 \text{ S.cm}^2.\text{mol}^{-1}$

$\lambda_m^\circ(\text{Al}(\text{OH})_4^-) = 60 \text{ S.cm}^2.\text{mol}^{-1}$

$\lambda_m^\circ(\text{Na}^+) = 50,1 \text{ S.cm}^2.\text{mol}^{-1}$

$\lambda_m^\circ(\text{NO}_3^-) = 71,5 \text{ S.cm}^2.\text{mol}^{-1}$

$\lambda_m^\circ(\text{H}_3\text{O}^+) = 350 \text{ S.cm}^2.\text{mol}^{-1}$

$\lambda_m^\circ(\text{OH}^-) = 199 \text{ S.cm}^2.\text{mol}^{-1}$

I. Cohésion dans les solides

I.1. Propriétés physiques des corps purs

- I.1.1. Quelle est la définition d'un corps pur ?
- I.1.2. Comment définit-on l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux d'un corps pur ?
- I.1.3. La figure 1 (fournie en annexe, à rendre avec la copie) donne le diagramme de phase $p = f(T)$ d'un corps pur.
- Indiquer où se situent les différentes phases.
 - Donner l'expression générale de la variance d'un système.
 - Dans le cas du corps pur, calculer la variance :
 - dans chacun des domaines ;
 - sur les frontières entre domaines ;
 - au point t.
 - Commenter les valeurs obtenues.
 - Que représente physiquement le point c ?
- I.1.4. On étudie la frontière représentant l'équilibre liquide-solide.
- Rappeler l'expression différentielle, dG , de la fonction enthalpie libre, pour un corps pur.
 - En déduire l'expression différentielle, $d\mu$, du potentiel chimique d'un corps pur.
 - Quelle condition peut-on écrire dans le cas d'un équilibre entre deux phases d'un corps pur ?
 - En déduire l'expression de la pente de la courbe représentative de l'équilibre liquide-solide dans le diagramme de phase $p = f(T)$.
 - Pourquoi cette pente est-elle grande devant celle de la courbe représentative de l'équilibre solide-gaz ?
 - Dans le diagramme de H_2O , quelle est la particularité de la courbe d'équilibre liquide-solide ?
 - Interpréter cette particularité en comparant la structure du cristal de glace à celle de l'eau liquide.

I.2. Energie de liaison des cristaux ioniques

On considère le cristal ionique de NaCl et on étudie les propriétés énergétiques de la liaison chimique dans ce cristal.

- I.2.1. Quelle est la nature de la liaison chimique dans ce cristal ? Définir l'énergie réticulaire U .
- I.2.2. En construisant un cycle de Born-Haber, que l'on explicitera, calculer, en kJ.mol^{-1} l'énergie réticulaire U de NaCl à 298 K. Pour ce calcul, on assimilera énergie interne et enthalpie.

I.2.3. On représente l'énergie potentielle de la liaison chimique dans NaCl par le modèle suivant :

$$E = -\frac{e^2 NM}{4\pi\epsilon_0 r} + \frac{NB}{r^8}$$

où M est la constante de Madelung, et B une constante, r est la plus petite distance entre un ion Na^+ et un ion Cl^- au sein du cristal. La constante de Madelung vaut $M = 1,748$ pour le cristal de NaCl.

- Que représente la constante de Madelung ? Quel est le principe de son calcul ?
- Que représente le deuxième terme de cette équation ?
- Connaissant la distance à l'équilibre, r_0 , entre les ions Na^+ et Cl^- dans le cristal, déterminer l'expression littérale de B .
- Calculer E et comparer à l'énergie réticulaire U .

I.3. Structure des métaux

I.3.1. Cristal métallique

Le zinc métallique cristallise dans un réseau de type hexagonal compact, de paramètres a et c .

- Représenter la maille conventionnelle du réseau hexagonal compact. Le côté de l'hexagone sera noté a et la hauteur du prisme c .
- Déterminer le nombre d'atomes par maille.
- Indiquer où sont les contacts et calculer la coordinence.
- Calculer le rapport axial c / a .
- En réalité le réseau du Zn est déformé, le rapport axial ayant pour valeur 1,87. Sachant que la masse volumique du Zn vaut $\rho = 6,51 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$, calculer le rayon métallique du Zn, r_{Zn} .

I.3.2. Les laitons

- Donner la configuration électronique de l'élément Cu et de l'élément Zn.
- Les laitons sont des alliages de Cu et de Zn, de composition et de phases allotropiques variées. Hume-Rothery a montré que le rapport entre le nombre total d'électrons de valence de type s et de type p et le nombre d'atomes considérés détermine la nature de la phase : $3/2$ pour une phase β , $21/13$ pour une phase γ et $7/4$ pour une phase ϵ . Déterminer la composition Cu_xZn_y du laiton dans chacune de ces phases.

II. Réactions de précipitation

II.1. Solubilité de l'hydroxyde d'aluminium

Afin d'étudier la solubilité de l'hydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$ en fonction du pH, on considère une solution contenant initialement des ions Al^{3+} en concentration $c_0 = 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$.

II.1.1. Propriétés acido-basiques de $\text{Al}(\text{OH})_3$

- Ecrire les équations des réactions acido-basiques faisant intervenir l'hydroxyde d'aluminium.
- Quelles sont les propriétés acido-basiques de l'hydroxyde d'aluminium ?

II.1.2. On augmente progressivement le pH de la solution. Les effets de dilution seront négligés.

- Écrire les équations des réactions successives qui se produisent.
- Déterminer la valeur de la constante d'équilibre de chacune de ces réactions.
- Déterminer le pH :
 - à partir duquel $\text{Al}(\text{OH})_3$ précipite : pH_1
 - où les ions Al^{3+} et $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ sont en concentration égale : pH_2
 - à partir duquel $\text{Al}(\text{OH})_3$ est complètement redissous en $\text{Al}(\text{OH})_4^-$: pH_3
- Donner, en fonction de la concentration en ions hydronium, $[\text{H}_3\text{O}^+]$, et de c_0 l'expression de la concentration des espèces dissoutes Al^{3+} et $\text{Al}(\text{OH})_4^-$.
- Tracer $\log C$ en fonction du pH pour chacune de ces espèces, où C représente la concentration de l'espèce, et $\log$ le logarithme décimal. On utilisera l'échelle suivante : 1 cm par unité de pH et 1 cm par unité de $\log C$.
- En déduire la courbe de solubilité de $\text{Al}(\text{OH})_3$ donnant $\log S$, où S est la solubilité de $\text{Al}(\text{OH})_3$.

II.2. Suivi conductimétrique de la précipitation et de la redissolution de $\text{Al}(\text{OH})_3$

On suit la réaction de précipitation de $\text{Al}(\text{OH})_3$ par conductimétrie. On fait varier le pH de la solution en ajoutant, à l'aide d'une burette, un volume croissant, V , de soude de concentration $c_B = 1 \text{ mol.L}^{-1}$. Le volume initial de la solution est $V_0 = 100 \text{ mL}$. On négligera les effets de dilution.

II.2.1. La solution de départ contient HNO_3 à une concentration $c_A = 0,05 \text{ mol.L}^{-1}$ et $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ de concentration $c_0 = 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$. Quel est le pH de cette solution, noté pH_0 ?

II.2.2. On distingue alors quatre domaines de pH :

Domaine A : $\text{pH}_0 \leq \text{pH} < \text{pH}_1$

Domaine B : $\text{pH}_1 \leq \text{pH} < \text{pH}_2$

Domaine C : $\text{pH}_2 \leq \text{pH} \leq \text{pH}_3$

Domaine D : $\text{pH} > \text{pH}_3$

Lorsqu'on ajoute de la soude à la solution, quelle est la réaction prépondérante dans chacun des domaines ?

II.2.3. Calculer les volumes de soude à verser, V_1 , V_2 et V_3 , pour atteindre respectivement pH_1 , pH_2 et pH_3 .

- II.2.4. Dans chacun des domaines, déterminer l'expression de la concentration des espèces en solution, Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, NO_3^- , Na^+ , H_3O^+ et OH^- en fonction du volume de soude versé V , en indiquant quelles sont les espèces dont la concentration est négligeable (on ne cherchera pas à déterminer celle-ci). On présentera les résultats sous forme d'un tableau.
- II.2.5. Exprimer la conductivité σ de la solution dans chaque domaine en fonction des concentrations des espèces présentes en solution. On se limitera aux espèces en quantité non négligeable.
- II.2.6. Montrer que, dans les domaines A et D, la courbe de dosage conductimétrique, σ en fonction de V , est assimilable à une droite. Dans les domaines B et C, quelle est la condition pour que la courbe de dosage conductimétrique soit assimilable à une droite ?
- II.2.7. Déterminer le signe de la pente de chacune des droites précédentes. En déduire l'allure de la courbe de dosage.
- II.2.8. Si la concentration c_0 est inconnue, comment peut-on la déterminer à partir de cette courbe de dosage ?

II.3. Stabilisation d'un degré d'oxydation par précipitation

On étudie la stabilité des degrés d'oxydation du cuivre dans une solution contenant des ions iodure, sachant que CuI est une espèce peu soluble. Pour cela on tracera un diagramme donnant le potentiel E de la solution en fonction de $\text{pI} = -\log [\text{I}^-]$, où $\log$ représente le logarithme décimal.

II.3.1. Montrer que l'ion Cu^+ n'est pas stable en solution aqueuse.

II.3.2. Construction du diagramme

On considère les espèces Cu , Cu^+ et Cu^{2+} en présence d'ions iodure, dont la concentration est fixée par la valeur de pI . On construira le diagramme en prenant comme convention que la concentration totale en ions cuivre dissous est égale à $10^{-1} \text{ mol.L}^{-1}$. La température est fixée à 298 K.

- Appliquer la loi de Nernst à chacun des trois couples intervenant dans ce diagramme.
- En déduire l'équation $E = f(\text{pI})$ de chacune des droites frontières intervenant dans ce diagramme.
- Tracer le diagramme E en fonction de pI sur la figure 2, donnée en annexe, à rendre avec la copie.
- Identifier les domaines de prédominance ou d'existence des différentes espèces.
- Comment peut-on stabiliser le degré (I) de l'élément cuivre ?

II.3.3. Expérience

- Tracer, sur le diagramme précédent, la droite représentative du couple I_3^-/I^- , en prenant comme convention une concentration en I_3^- égale à $10^{-1} \text{ mol.L}^{-1}$.
- On mélange une solution d'iodure de potassium KI et une solution contenant des ions Cu^{2+} . Quelle est la condition sur pI pour qu'on observe un précipité de CuI ? Ecrire l'équation de la réaction chimique correspondante.
- Comment peut-on caractériser la présence d'ions I_3^- ?

III. Catalyse hétérogène

III.1. Généralités

III.1.1. Rappeler la définition d'un catalyseur.

III.1.2. Donner la définition de la catalyse homogène et de la catalyse hétérogène.

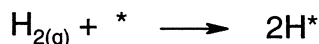
III.1.3. Quelles sont les principales étapes d'une réaction chimique en catalyse hétérogène ?

III.1.4. Donner deux exemples de catalyseurs hétérogènes, appartenant à des familles chimiques différentes, en précisant le type de réaction chimique catalysée.

III.2. Etude de l'adsorption

III.2.1. Chimisorption dissociative de H_2

La molécule de dihydrogène se dissocie lors de son adsorption sur une surface de nickel, selon la réaction :



où * désigne le site d'adsorption sur la surface et H^* l'espèce chimique H, adsorbée.

- Cette dissociation conduit à la formation de liaisons chimiques entre le métal Ni et l'hydrogène H : Ni-H.
Compte tenu de l'électronégativité de H et de Ni, dans quel sens s'effectue le transfert d'électrons dans cette liaison chimique ? Est-il justifié de parler d'ions hydrures adsorbés sur la surface de nickel ?
- Donner l'allure du diagramme d'orbitales moléculaires de valence de la molécule H_2 , en indiquant les orbitales atomiques de base, la forme des orbitales moléculaires obtenues, leur position énergétique relative, leur remplissage électronique.
- Définir l'énergie de liaison de H-H. Donner sa valeur.
- On donne les courbes d'énergie potentielle obtenues lorsque H_2 s'approche de la surface métallique (figure 3). La courbe (I) représente l'énergie potentielle de la molécule H_2 en fonction de la distance r entre le centre de la liaison H-H et le centre des atomes de nickel de la surface, supposée plane. La courbe (II) représente l'énergie de deux atomes d'hydrogène indépendants en fonction de leur distance à la surface (voir figure 3). L'origine des énergies correspond donc à l'énergie de la molécule H_2 isolée, située à très grande distance (r_1) de la surface de nickel. On prendra $D_1 = 434 \text{ kJ.mol}^{-1}$; $D_2 = -125 \text{ kJ.mol}^{-1}$; $D_3 = -40 \text{ kJ.mol}^{-1}$ (on précise que l'échelle des énergies n'est pas respectée sur la figure 3).
 - A quoi correspondent les énergies D_1 et D_2 ?
 - Calculer l'énergie de la liaison H-Ni.
 - La courbe (I) présente un minimum. Compte tenu de la distance r_3 et de l'énergie D_3 , à quel type de liaison ce minimum est-il associé ?

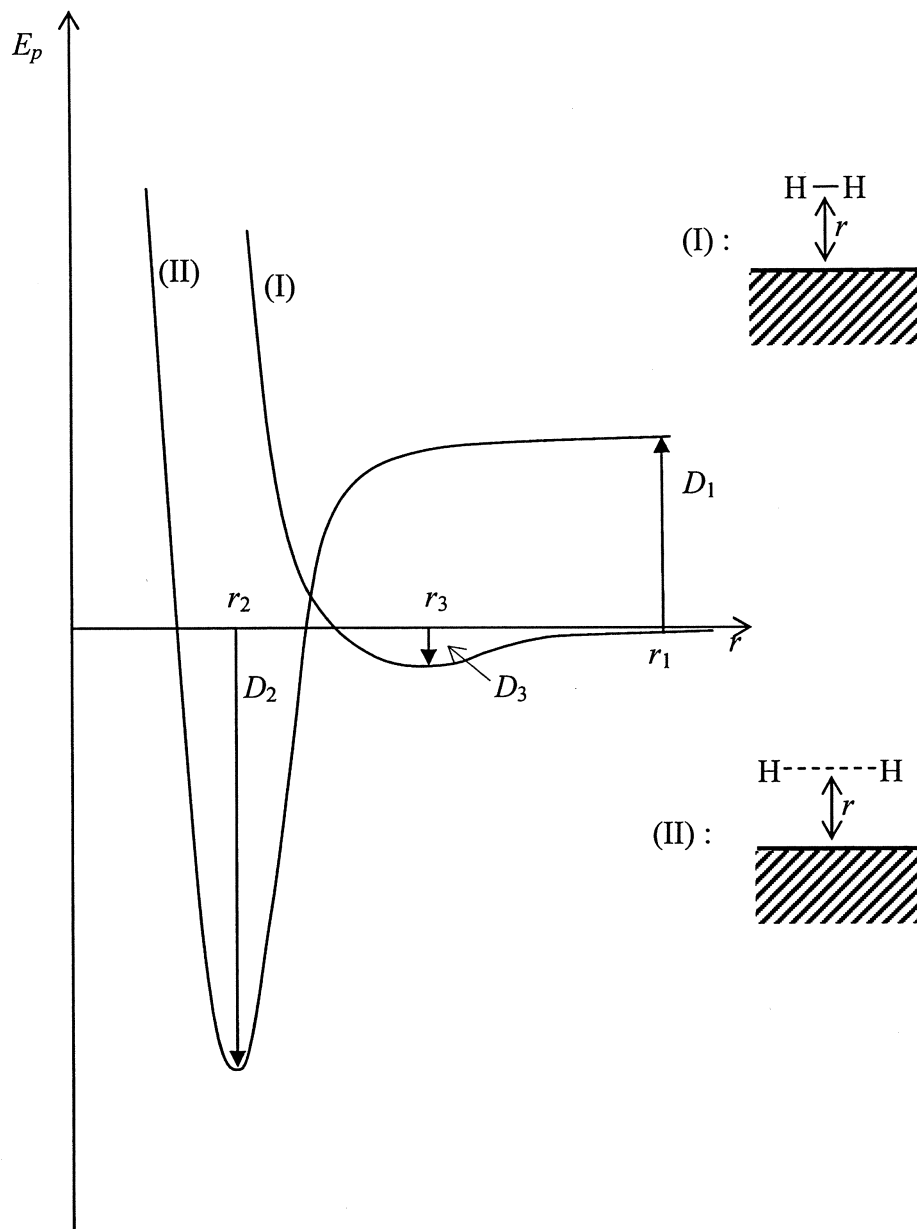


Figure 3 — Courbes d'énergie potentielle lors de l'adsorption de H_2 (I) et de $2H$ (II) et définition de la distance r pour les courbes (I) et (II).

e. Chemin réactionnel

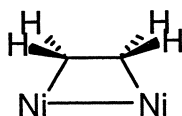
Pour faciliter la réponse on utilisera les courbes d'énergie potentielle dupliquées sur la figure 3bis, donnée en annexe, à rendre avec la copie.

- Montrer que si une molécule, venant de l'infini, se rapproche de la surface de Ni en suivant le chemin de plus basse énergie, elle s'adsorbe en se dissociant.
- Montrer que ce chemin réactionnel passe par un état de transition. Indiquer sa position.
- Que peut-on dire de l'ordre de grandeur de l'énergie d'activation ?

III.2.2. Chimisorption moléculaire de l'éthylène C_2H_4

- Ecrire la structure de Lewis de la molécule C_2H_4 .
- Retrouver le diagramme des orbitales moléculaires π et π^* de l'éthylène en utilisant la méthode de Hückel.

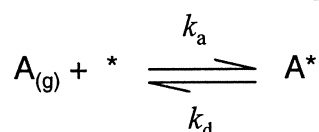
- c. Lorsque la molécule d'éthylène s'adsorbe sur la surface de Ni, elle adopte la configuration géométrique suivante appelée « di- σ » : son plan moyen est parallèle à la surface, une liaison est établie entre chaque atome de carbone et un atome de nickel, les atomes d'hydrogène sont dans un plan placé au-dessus de la liaison C–C par rapport aux deux liaisons C–Ni.



Justifier, à l'aide d'un schéma, que la liaison π de l'éthylène a contribué à l'adsorption de la molécule.

III.2.3. Isothermes d'adsorption

On considère l'adsorption d'un gaz A sur une surface selon le processus :



où les sites d'adsorption sont notés * et les sites occupés par une molécule A adsorbée sont notés A^* . La constante de vitesse de la réaction d'adsorption est k_a et la constante de vitesse de la réaction de désorption est k_d . On désigne par θ le taux d'adsorption du gaz A :

$$\theta = \frac{\text{Nombre de sites occupés par A}}{\text{Nombre de sites disponibles}}$$

On suppose que les deux réactions sont élémentaires. La vitesse de la réaction d'adsorption est donc d'ordre 1 par rapport à la pression partielle en gaz A, p , et d'ordre 1 par rapport au taux de sites vacants. La vitesse de la réaction de désorption est d'ordre 1 par rapport au taux de sites occupés.

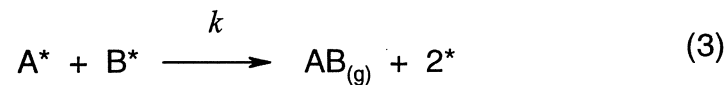
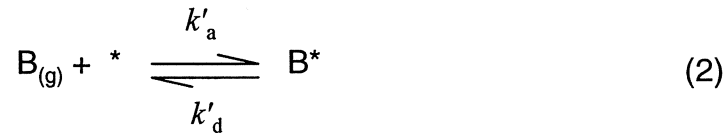
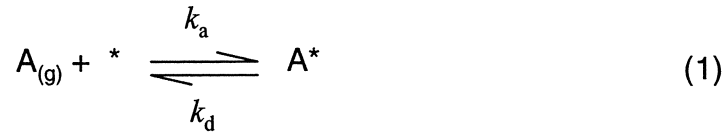
- Donner l'expression de la vitesse d'apparition des sites occupés, $d\theta/dt$.
- En déduire la valeur de θ , lorsque l'équilibre est établi. On appellera $K = k_a/k_d$ la constante de l'équilibre. L'expression de θ en fonction de K et de p est due à Langmuir (prix Nobel 1932) et correspond au taux de recouvrement de la surface dans le cadre du modèle de l'isotherme de Langmuir.
- Dans le tableau ci-dessous, la quantité de gaz CO adsorbé sur une surface de graphite est mesurée par le volume V qu'occuperait ce gaz, à une pression de 1 bar et à une température de 273 K. Ce volume V est donné en fonction de la pression partielle en CO dans la phase gazeuse.

p (bar)	0,13	0,26	0,39	0,52	0,65	0,78	0,91
V (cm ³)	10,3	19,3	27,3	34,1	40,0	45,5	48,0

- Montrer que θ est proportionnel à V . (La valeur de la constante de proportionnalité n'est pas exigée, et n'est pas utile pour la suite).
- Montrer que les données sont compatibles avec l'expression de θ déterminée dans le modèle de l'isotherme de Langmuir.
- En déduire la valeur de la constante d'équilibre K .

III.3. Mécanisme de réaction catalytique

On considère une réaction catalytique bimoléculaire se produisant à la surface d'un catalyseur entre deux espèces adsorbées A^* et B^* , provenant de l'adsorption de A et B gazeux. Ce type de réaction correspond à un mécanisme de Langmuir-Hinshelwood, dont le schéma est le suivant :



On utilise les mêmes conventions qu'en III.2.3, en particulier, les taux d'adsorption de A et de B sont notés respectivement θ_A et θ_B , et les pressions partielles en A et en B sont notées respectivement p_A et p_B .

III.3.1. Rappeler la définition d'une réaction bimoléculaire.

III.3.2. Ecrire la vitesse globale de la réaction, r_{AB} , en fonction de θ_A et de θ_B .

III.3.3. Ecrire les variations de taux d'adsorption $d\theta_A/dt$ et $d\theta_B/dt$ en fonction des constantes de vitesse, des taux d'adsorption et des pressions partielles.

III.3.4. Les équilibres (1) et (2) s'établissent rapidement devant la réaction (3). En supposant que $k\theta_B$ et $k\theta_A$ sont très petits devant k_d et k'_d , déterminer l'expression, à l'équilibre, de θ_A et θ_B à l'aide des constantes d'équilibre K et K' des réactions (1) et (2).

III.3.5. En déduire que l'expression de la vitesse globale de la réaction, r_{AB} , en fonction des pressions partielles p_A et p_B se met sous la forme :

$$r_{AB} = \frac{kKK'p_Ap_B}{(1 + Kp_A + K'p_B)^2}$$

III.3.6. La réaction d'oxydation de CO par le dioxygène dans les pots catalytiques automobiles se produit selon un mécanisme de Langmuir-Hinshelwood, sur un catalyseur au rhodium.

- Ecrire le bilan de la réaction et l'expression de la vitesse de réaction, r_{CO_2} , en fonction des pressions partielles p_{CO} et p_{O_2} , des constantes d'équilibre d'adsorption de CO et de O_2 , respectivement K_{CO} et K_{O_2} , et de la constante de vitesse k .
- On étudie expérimentalement la réaction d'oxydation catalytique de CO en effectuant des séries de mesure de la vitesse de formation de CO_2 en fonction

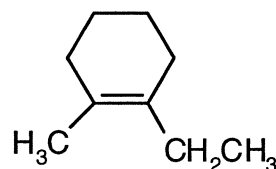
des pressions partielles p_{CO} et p_{O_2} . La température est fixée à 450K, et les constantes d'équilibre d'adsorption valent : $K_{\text{CO}} = 1,1 \times 10^{11}$ et $K_{\text{O}_2} = 2,3 \times 10^{11}$, les pressions partielles étant exprimées en mbar. Le tableau ci-dessous donne les résultats d'une série de mesures, effectuées à $p_{\text{CO}} = 1,3 \times 10^{-7}$ mbar :

p_{O_2} (mbar)	$6,7 \times 10^{-8}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$2,7 \times 10^{-7}$	$5,3 \times 10^{-7}$
r_{CO_2} (molécules.cm ⁻² .s ⁻¹)	$5,1 \times 10^{12}$	$7,0 \times 10^{12}$	$4,0 \times 10^{12}$	$2,7 \times 10^{12}$

- (i) Montrer que, d'après le mécanisme de Langmuir-Hinshelwood, p_{O_2} doit être une fonction affine de $\sqrt{\frac{p_{\text{O}_2}}{r_{\text{CO}_2}}}$.
- (ii) Montrer que les résultats des mesures sont compatibles avec le mécanisme proposé.
- (iii) Déterminer la valeur de la constante de vitesse k .

III.4. Stéréochimie et catalyse hétérogène

On considère la molécule de 1-éthyl-2-méthylcyclohexène :



III.4.1. Donner, en la justifiant, la configuration absolue, Z ou E, de cette molécule.

On effectue une hydrogénation catalytique de cette molécule sur nickel de Raney.

III.4.2. Donner la formule semi-développée du produit obtenu.

III.4.3. Combien de stéréoisomères obtient-on ? Le mélange est-il racémique ?

III.4.4. Combien le produit obtenu possède-t-il de centres stéréogènes ?

III.4.5. Dessiner et indiquer la configuration absolue de chacun d'eux dans chaque stéréoisomère.

III.4.6. La réaction d'hydrogénation est-elle stéréosélective ? stéréospécifique ?

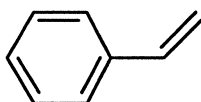
III.4.7. Nommer et représenter la conformation la plus stable des stéréoisomères obtenus.

IV. Synthèse de peptides en phase solide : le procédé Merrifield

On s'intéresse à la fabrication de chaînes peptidiques à partir d'acides α -aminés. La synthèse de Merrifield est basée sur l'emploi d'un support solide, constitué d'une résine de polymère, sur laquelle on peut fixer les chaînes peptidiques. Cette méthode permet l'automatisation du processus de synthèse des peptides. La première synthèse totale d'une protéine naturelle, l'insuline, a été réalisée grâce à ce procédé, en 1964.

IV.1. Fabrication de la résine

On considère la molécule de styrène (phényléthène).



IV.1.1. La double liaison est conjuguée avec le cycle aromatique. Expliquer ce que traduit cette notion de conjugaison.

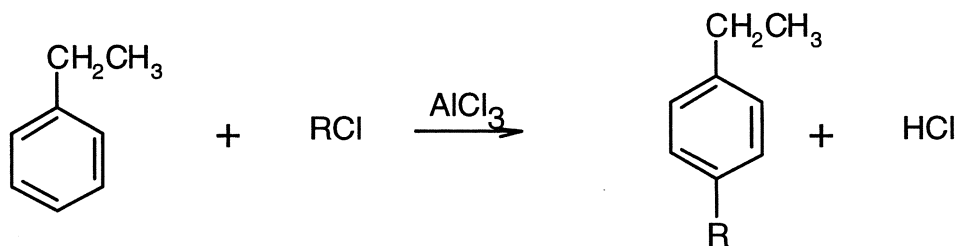
IV.1.2. Ecrire le bilan global de la réaction de polymérisation du styrène, et représenter la chaîne polymérique obtenue, en précisant quel est le monomère et quel est le motif élémentaire.

IV.1.3. On effectue la polymérisation du styrène selon un mécanisme radicalaire.

- Comment amorcer la réaction de polymérisation radicalaire ?
- Ecrire le mécanisme de la réaction de polymérisation radicalaire du styrène.

IV.1.4. Afin de permettre l'ancrage ultérieur de la chaîne peptidique, on effectue une alkylation de Friedel et Crafts (découverte en 1877) sur le noyau aromatique.

- Le schéma général d'une alkylation de Friedel et Crafts est le suivant :

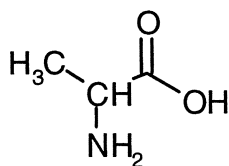


où $-\text{CH}_2\text{CH}_3$ est un substituant alkyle remplaçant la chaîne polymérique et RCl est un halogénoalcane.

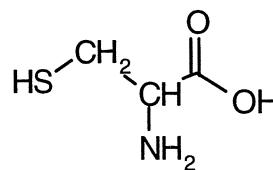
- Détailler le mécanisme de cette réaction.
 - Préciser le rôle de AlCl_3 .
- La fixation de R s'effectue majoritairement en position *para* par rapport à CH_2CH_3 . Comment peut-on expliquer cette orientation ?

IV.2. La liaison peptidique

On considère deux acides aminés : la L-alanine, notée Ala, et la L-cystéine, notée Cys :



[Ala]



[Cys]

IV.2.1. Quelle est la signification du préfixe «L» dans le nom conventionnel de ces deux acides aminés ? Dessiner la L-Ala et la L-Cys en représentation de Fischer. Quelle est leur configuration absolue en nomenclature de Cahn-Ingold-Prelog ?

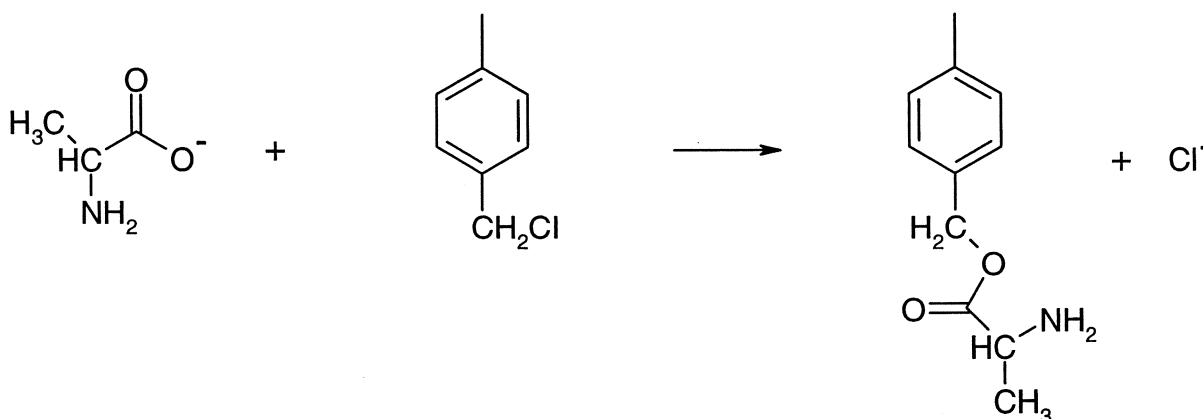
IV.2.2. Ces deux acides aminés réagissent, en milieu neutre, pour former un ou plusieurs dipeptides. Donner le mécanisme de cette réaction. A quelle classe appartient-il ?

IV.2.3. Combien de dipeptides peuvent être formés ? Donner leur formule semi-développée.

IV.2.4. Dans les acides aminés, on peut protéger la fonction amine $-NH_2$, en formant un dérivé noté $BocNH-$, et la fonction acide en formant un ester. Montrer qu'en choisissant judicieusement la position des groupements protecteurs, on peut former un seul dipeptide, obtenu après déprotection des extrémités.

IV.3. La synthèse en phase solide de chaînes peptidiques

Dans la synthèse par le procédé Merrifield, le polystyrène utilisé comprend un substituant R identique à CH_2Cl . On fixe un premier acide aminé, l'alanine, sur le polystyrène selon la réaction :

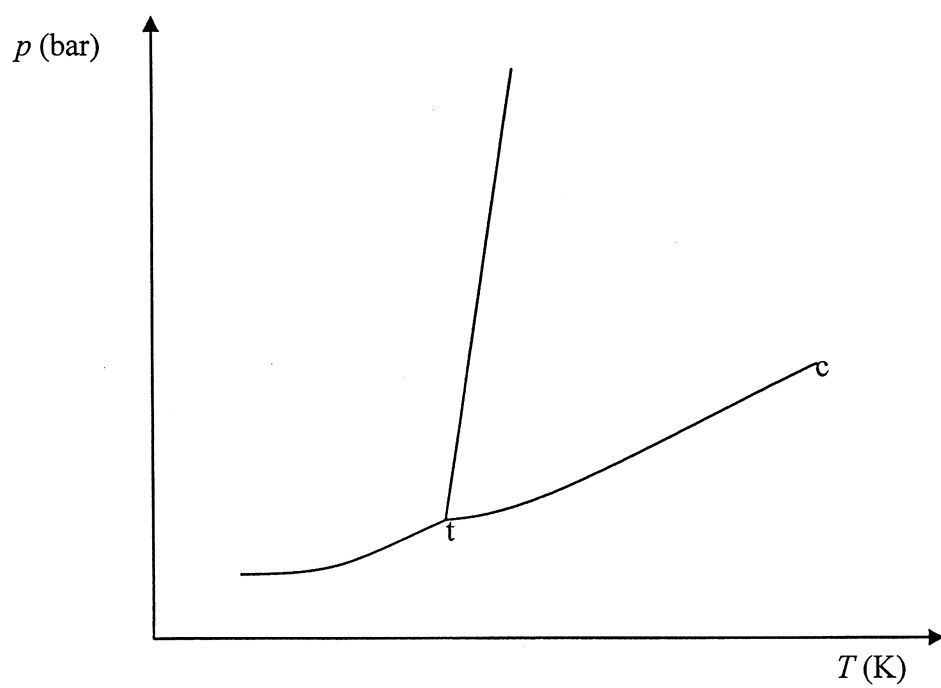


IV.3.1. De quel type de réaction s'agit-il ?

IV.3.2. On utilise alors un acide aminé N-protégé qui réagit avec l'acide aminé fixé sur la résine polymérique. Ecrire l'équation de la réaction.

- IV.3.3. On souhaite fabriquer le polypeptide $(\text{AlaCysAla})_n$. On rappelle que, dans l'écriture d'une chaîne peptidique, l'extrémité aminée (donc l'acide aminé *N*-terminal) est à gauche et l'extrémité carboxylique (donc l'acide aminé *C*-terminal) est à droite. Montrer comment on peut faire croître la chaîne peptidique par une succession de réactions chimiques.
- IV.3.4. Pourquoi cette méthode de synthèse en phase solide est-elle plus efficace qu'une méthode en solution, comme celle évoquée dans la question IV.2.4 ?
- IV.3.5. On sépare le peptide obtenu de la résine polymérique.
- Comment est définie la structure primaire d'un peptide ?
 - Quel type de liaison assure la structure secondaire d'un peptide ? Citer des exemples de structures secondaires de peptides.
- IV.3.6. Si le rendement de chaque étape (fixation d'un acide aminé supplémentaire) est de 98 %, quel est, au 50^{ème} acide aminé fixé, le rendement global de formation du polymère ? Commenter, et proposer une solution permettant d'améliorer le rendement.

Annexe

Figure 1 — *Diagramme de phase d'un corps pur*

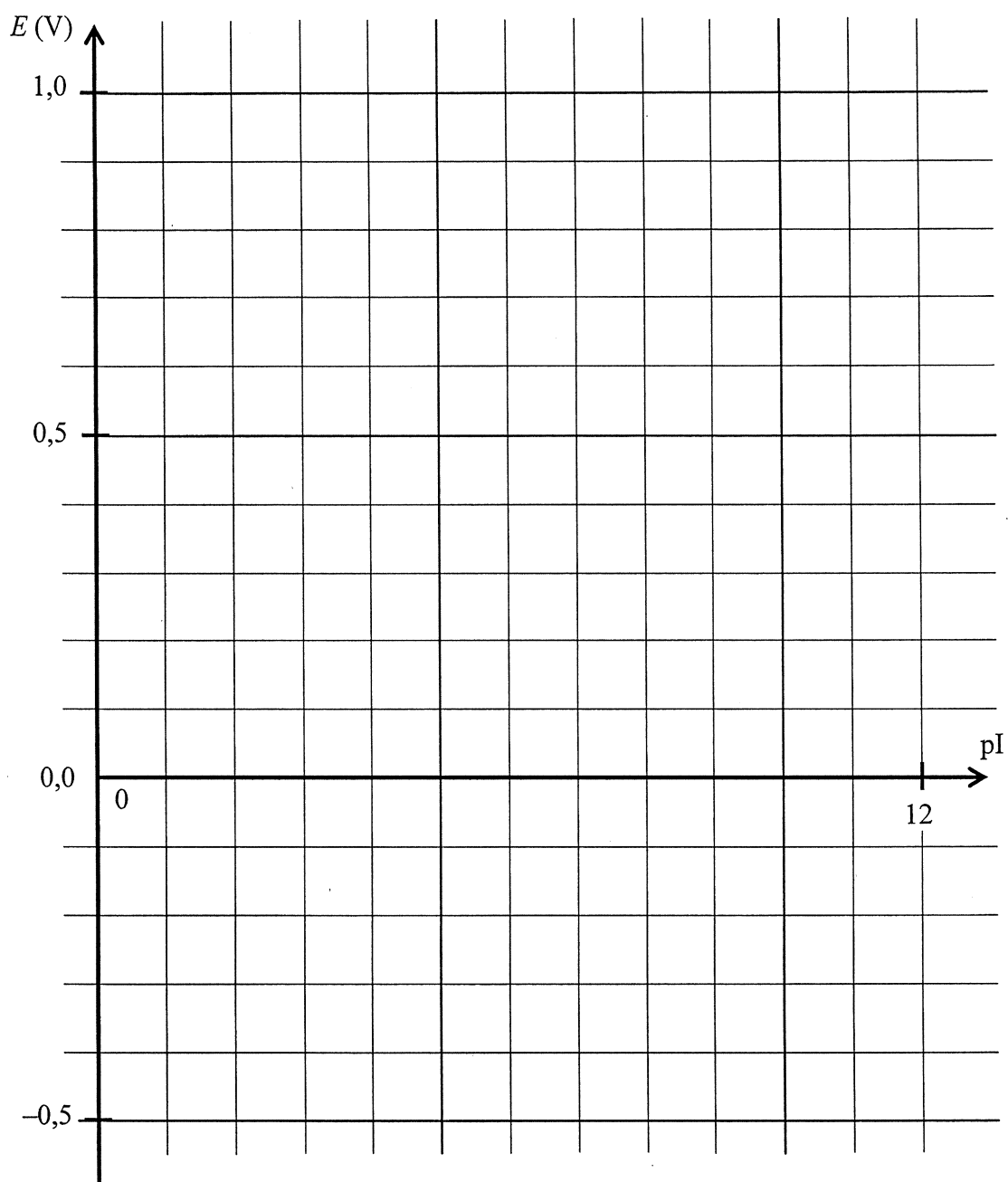


Figure 2 — *Diagramme $E = f(pI)$*

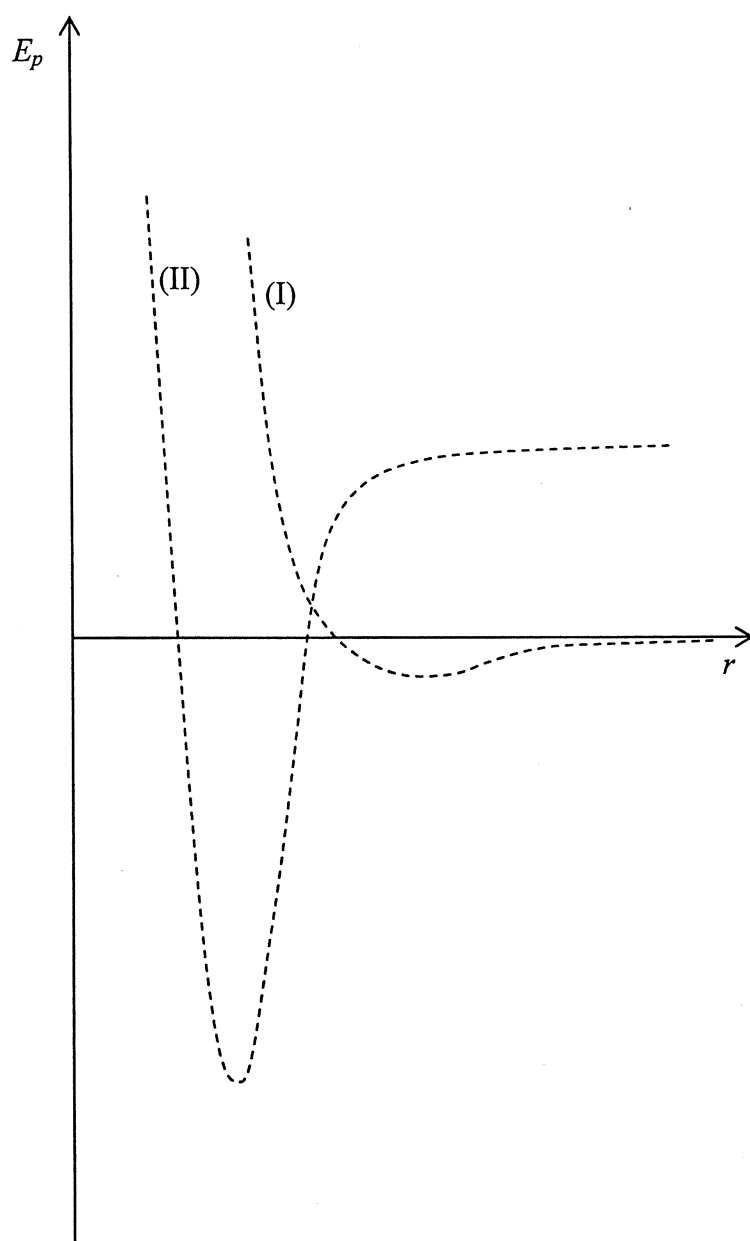


Figure 3bis — *Reproduction des courbes d'énergie potentielle de la figure 3*

8. Rapport relatif à la composition de chimie

Le sujet, qui aborde différents domaines de la chimie où interviennent des solides, est constitué de quatre parties indépendantes.

- La première débute par une étude thermodynamique des différents états du corps pur, avant d'aborder les aspects énergétiques et structuraux de solides cristallins.
- La deuxième concerne les réactions de précipitation, avec une étude du dosage de l'ion aluminium par la soude, suivi par conductimétrie, et de la stabilisation du degré d'oxydation (I) du cuivre par précipitation.
- La troisième est consacrée à la catalyse hétérogène et comprend une analyse de l'adsorption de molécules sur une surface métallique, une étude cinétique d'un mécanisme en catalyse hétérogène ainsi qu'une étude de la stéréochimie de la réaction d'hydrogénation catalytique.
- La quatrième traite de la synthèse peptidique sur support polymérique par le procédé Merrifield.

La plupart des candidats ont abordé les différentes parties. Mais, trop souvent, ils se contentent de réponses aux seules questions qui leur semblent directement et facilement accessibles. De là, l'impression d'une approche à la fois superficielle et fragmentaire de l'ensemble du sujet.

Cette dispersion nuit aux candidats. Elle empêche en effet une réflexion approfondie. En outre, le fait systématique de ne pas aller au-delà des réponses aux questions les plus élémentaires, pratiquement proposées par tout le monde, ne permet pas aux candidats de se distinguer. Les résultats obtenus indiquent que ceux qui ont montré leur capacité à résoudre l'ensemble d'une ou de plusieurs parties ont largement bénéficié de leur effort et ont obtenu des notes honorables, voire très bonnes.

Globalement, l'épreuve permet de bien classer les candidats, les notes s'échelonnant entre 0 et 20.

Cette année encore, certains points généraux méritent d'être soulignés,.

Le manque de précision du vocabulaire employé (mélange « pas tout à fait » racémique, configuration « plutôt » Z, « substance », « corps » ou « individu » chimique pour espèce chimique), et des définitions qui sont données montre que certains candidats négligent cet aspect, alors qu'il constitue une qualité essentielle pour qui veut enseigner. Les questions où interviennent des graphiques basés sur des données numériques, comme l'étude cinétique, sont souvent négligées, alors que l'étude et le développement des sciences physiques reposent largement sur l'exploitation de données numériques issues de travaux expérimentaux.

La chimie organique souffre d'un manque de rigueur dans l'écriture des réactions chimiques ou dans les transferts d'électrons permettant d'explicitier les mécanismes.

Enfin, en ce qui concerne la rédaction des copies, les remarques du rapport de l'épreuve écrite de chimie du concours précédent restent pertinentes. Soulignons enfin que des réponses trop succinctes ou trop elliptiques sont toujours sanctionnées.

Les remarques suivantes traduisent certaines erreurs fréquemment observées dans les copies.

Partie I

Le corps pur est souvent compris comme étant constitué d'un seul élément.

Pour la définition des énergies des réactions chimiques, l'état physique des espèces chimiques mises en jeu n'est pas toujours précisé.

Le calcul de la variance donne parfois lieu à des réponses incohérentes (par exemple, une variance négative !). Les différents termes intervenant dans le calcul doivent toujours être définis.

La signification de la constante de Madelung est parfois confondue avec l'écrantage électronique du noyau atomique.

La définition de l'énergie potentielle d'équilibre est parfois basée sur $E = 0$ et non sur une dérivée nulle.

La maille hexagonale compacte peut être représentée selon un prisme à base hexagonale ou à base de losange. Mais le nombre d'atomes composant la maille doit être déterminé correctement, ce qui n'est pas toujours le cas. D'autre part la figure donnant la position des atomes doit être lisible.

Partie II

Une confusion fréquente est commise sur la signification de la constante β_4 , confondue avec la constante de formation du complexe $\text{Al}(\text{OH})_4$ à partir de $\text{Al}(\text{OH})_3$. Le tracé de la courbe de solubilité ($\log S$ fonction du pH) est rarement effectué.

L'utilisation de la méthode de la réaction prépondérante n'est pas toujours évoquée pour justifier le calcul du pH.

L'interprétation de la pente des droites conductimétriques ne tient pas toujours compte de tous les ions (en particulier les ions Na^+ apportés par l'ajout de soude sont souvent oubliés). Une étude qualitative de la courbe peut aider le raisonnement. Globalement cette question est rarement bien traitée.

La construction du diagramme $E = f(\text{pI})$ est souvent mal effectuée : l'ion $\text{Cu}^+_{(\text{aq})}$ est fréquemment pris en compte, malgré la question II.3.1.

Partie III

Le catalyseur est souvent vu comme une espèce chimique qui déclenche ou favorise la réaction, alors que son rôle est cinétique et doit donc être associé à un accroissement de la vitesse de réaction.

Les exemples de catalyse font très rarement appel à des réactions de type industriel : ils restent la plupart du temps cantonnés à des expériences de laboratoire. Les catalyseurs cités n'appartiennent qu'exceptionnellement à 2 familles chimiques différentes.

Le sens du transfert d'électrons entre H et Ni n'est pas toujours correct, la définition de l'électronégativité, liée à l'attraction des électrons dans une liaison, étant mal utilisée.

Les diagrammes d'orbitales moléculaires du dihydrogène et de l'éthylène sont rarement complets.

Le modèle de réaction catalytique, basé sur l'isotherme de Langmuir, est parfois mal utilisé dans l'application au cas de la réaction d'oxydation de CO dans les pots catalytiques, car la stoechiométrie de la réaction n'est pas identique à celle étudiée théoriquement dans le paragraphe précédent : un modèle de mécanisme peut être utilisé de façon indépendante du bilan réactionnel. Cette étude du pot catalytique est inspirée d'un travail de S.B. Schwartz *et al.* (*J. Phys. Chem.* (1986) 90, 6194).

La définition d'une réaction bimoléculaire reste souvent incomplète, limitée à l'interaction entre deux molécules.

Le classement des substituants selon les règles de Cahn-Ingold-Prelog fait fréquemment appel à leur grosseur ou à leur masse (parfois même au poids), au lieu du numéro atomique.

Partie IV

Les candidats confondent souvent la délocalisation électronique et un mouvement d'électrons.

Les formes mésomères ne doivent pas être considérées comme des formes réelles, mais comme des écritures de formes limites servant à interpréter la délocalisation des électrons : ainsi, on ne doit pas dire « stabilisé par l'existence de formes mésomères ».

La réaction de polymérisation du styrène est rarement bien écrite, en particulier il manque souvent des atomes de carbone au motif polymérique.

Rappelons qu'il n'y a aucune relation entre la nomenclature L d'une molécule et le caractère lévogyre de la substance.

Enfin, dans les exemples de structures de peptides, certains candidats évoquent l'hélice de l'ADN. Les grandes classes de molécules biologiques semblent parfois confondues.

SESSION DE 2004

**concours externe
de recrutement de professeurs agrégés**

section : sciences physiques

option : physique

problème de physique

Durée : 6 heures

Calculatrice électronique de poche – y compris programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

Tout document et tout autre matériel électronique sont interdits.

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

Conducteurs quantiques

Introduction

Depuis les années 1980, on a assisté au développement considérable d'une branche de la physique des solides, appelée physique mésoscopique, qui s'intéresse à une échelle intermédiaire entre l'échelle atomique et l'échelle macroscopique. Les progrès énormes dans la réalisation de dispositifs électroniques à base de semiconducteurs ou de métaux, de plus en plus petits et de mieux en mieux contrôlés, ont permis l'observation expérimentale de nouveaux effets réellement quantiques à l'échelle mésoscopique du système étudié.

Les trois premières parties du problème s'intéressent à divers aspects du phénomène de conduction électrique dans les systèmes mésoscopiques. La première rappelle la description classique de ce phénomène en termes de diffusion des électrons, ignorant leur nature ondulatoire. Les deux suivantes étudient respectivement la quantification de la conductance et les phénomènes de localisation qui sont deux des manifestations expérimentales les plus frappantes d'effets quantiques à l'échelle mésoscopique. Même si ces trois parties sont très largement indépendantes, il est de loin préférable de les traiter dans l'ordre. **La lecture attentive du préambule est par ailleurs indispensable pour aborder le problème dans les meilleures conditions.**

La dernière partie, **totalelement indépendante des autres**, aborde certains aspects de l'électronique à un électron basée sur la quantification de la charge électrique.

On utilisera les notations suivantes :

- si A est un nombre complexe, A^* désigne son complexe conjugué et $\text{Re}(A)$ sa partie réelle.
- i désigne le nombre complexe de partie imaginaire positive et tel que $i^2 = -1$.
- $\vec{\nabla}$ désigne l'opérateur gradient.
- $\text{Int}(x)$ désigne la partie entière de x et $\log(x)$ son logarithme décimal.
- $\delta(\nu)$ désigne la distribution delta de Dirac de la variable ν .

On donne :

- la valeur absolue de la charge de l'électron $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ et sa masse $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- la constante de Planck $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
- la constante de Boltzmann $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
- la permittivité diélectrique du vide $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$

On rappelle que la conductance d'un dipôle électrique résistif est l'inverse de sa résistance.

On rappelle que la probabilité pour qu'un fermion occupe un état d'énergie ε à la température θ et pour un potentiel chimique μ est donnée par la distribution de Fermi Dirac :

$$f_0(\varepsilon) = \frac{1}{e^{(\varepsilon-\mu)/k_B\theta} + 1}$$

On rappelle également que $\frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon}(\varepsilon)$ tend vers la distribution $-\delta(\varepsilon - \mu)$ lorsque θ tend vers 0 à μ fixé.

L'usage de la calculatrice est autorisé.

Tournez la page S.V.P.

Préambule aux parties A,B,C

Les progrès réalisés dans la croissance et le dopage des cristaux semiconducteurs permettent de confiner des électrons dans un plan défini à l'interface de deux semiconducteurs, par exemple GaAs et GaAlAs. On réalise ainsi un véritable gaz bidimensionnel d'électrons. A l'aide de grilles métalliques polarisées, on peut définir dans ces gaz bidimensionnels des conducteurs de géométrie bien contrôlée. Le transport électronique dans ce type de conducteurs, qui sera étudié dans ce problème, est gouverné par les collisions que subissent les électrons du gaz bidimensionnel. Plusieurs temps permettent de le caractériser :

- Le temps de collision élastique τ_e est le temps moyen séparant deux collisions conservant l'énergie d'un même électron (par exemple les collisions sur les impuretés). La longueur caractéristique associée à τ_e est le libre parcours moyen élastique l_e .
- Le temps de collision inélastique τ_{in} est le temps moyen séparant deux collisions modifiant l'énergie de l'électron (collisions électron-phonon et électron-électron). La longueur caractéristique associée à τ_{in} est le libre parcours moyen inélastique l_{in} .
- Le temps de collision τ est défini par :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_{in}}$$

On lui associe le libre parcours moyen l .

- Le temps de cohérence de phase de la fonction d'onde d'un électron τ_φ , tout à fait analogue au temps de cohérence rencontré en optique, conditionne l'observation d'interférences quantiques. Dans les systèmes que nous considérerons, $\tau_\varphi = \tau_{in}$ car seules les diffusions inélastiques modifient la phase de la fonction d'onde électronique. On associe à τ_φ la longueur de cohérence de phase l_φ , confondue avec l_{in} .

Aux très basses températures qui seront étudiées dans ce problème, le nombre de phonons est petit et le mécanisme définissant le temps de collision est la diffusion sur les impuretés, de sorte que :

$$l = l_e \ll l_{in} = l_\varphi$$

On peut alors définir différents régimes de transport suivant la taille caractéristique L du conducteur :

- Pour $l \ll l_\varphi \ll L$, on a le régime diffusif classique qui sera étudié dans la partie A et dans la partie C.III. Aucun effet d'interférences quantiques n'est observé.
- Pour $l \ll L \ll l_\varphi$, on a le régime diffusif cohérent qui sera étudié dans les parties C.II et C.IV. Chaque électron subit de nombreuses collisions lors de la traversée de l'échantillon mais, la cohérence de phase étant maintenue sur toute la longueur de l'échantillon, la conductance devient sensible aux interférences entre les divers chemins de propagation possibles.
- Pour $L \ll l \ll l_\varphi$, on a le régime balistique étudié dans la partie B. L'électron ne subit aucune collision et l'échantillon peut alors être considéré comme un guide d'onde électronique.

PARTIE A

Conductivité d'un gaz d'électrons à 2 dimensions

Dans cette partie, on considère un gaz bidimensionnel d'électrons. Ce gaz occupe un carré de côté L dont on note x et y les deux directions principales. Le nombre d'électrons par unité de surface est n_s . Pour tenir compte des interactions du gaz d'électrons avec le réseau qui le supporte, on attribue aux électrons une masse m^* appelée masse effective. On néglige l'interaction coulombienne entre les électrons.

I Niveaux d'énergie et statistique des électrons

- I.1) On rappelle que l'équation de Schrödinger satisfaite par la fonction d'onde $\Psi(x,y)$ d'un électron du gaz est :

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] \Psi(x,y) = \varepsilon \Psi(x,y)$$

où ε est l'énergie de l'état électronique correspondant.

On impose à la fonction d'onde et à ses dérivées d'être périodiques dans les directions x et y avec une période L (conditions aux limites périodiques). Montrer que l'ensemble des fonctions :

$$\Psi_{k_x, k_y}(x,y) = \frac{1}{L} e^{ik_x x} e^{ik_y y}$$

avec $k_x = n_x \frac{2\pi}{L}$ et $k_y = n_y \frac{2\pi}{L}$ où n_x et n_y sont des entiers relatifs, forment une base ortho-normée de l'ensemble des solutions. Préciser l'expression de ε en fonction de k_x et k_y .

- I.2) Calculer le courant de probabilité $\vec{J}_p(k_x, k_y)$ associé à la fonction d'onde Ψ_{k_x, k_y} . On rappelle que le courant de probabilité $\vec{J}_p$ associé à une fonction d'onde Ψ s'écrit :

$$\vec{J}_p = \frac{1}{m^*} \text{Re} \left\{ \Psi^* \left[-i\hbar \vec{\nabla} \right] \Psi \right\}$$

Quelle est la dimension de $\vec{J}_p(k_x, k_y)$?

Montrer qu'un électron occupant l'état quantique décrit par Ψ_{k_x, k_y} a une contribution à la densité surfacique de courant électrique égale à :

$$\vec{J}_e(k_x, k_y) = -\frac{e\hbar}{m^* L^2} \vec{k}$$

où $\vec{k}$ est le vecteur de coordonnées k_x et k_y .

- I.3) En tenant compte du spin de l'électron, montrer que le nombre d'états électroniques contenus dans un grand "volume" $\Delta k_x \Delta k_y$ de l'espace des $\vec{k}$ est $\Delta k_x \Delta k_y L^2 / 2\pi^2$ (on précisera la notion de grand volume). En calculant le "volume" de l'espace des $\vec{k}$ compris entre les surfaces d'énergie constante ε et $\varepsilon + d\varepsilon$, montrer que pour $d\varepsilon$ suffisamment grand, le nombre d'états d'énergie comprise entre ε et $\varepsilon + d\varepsilon$ s'écrit $N(\varepsilon)d\varepsilon$ où la densité d'états $N(\varepsilon)$ est donnée par :

$$N(\varepsilon) = \frac{m^*}{\pi \hbar^2} L^2$$

- I.4) En déduire qu'à température nulle, les niveaux électroniques du gaz sont peuplés jusqu'à l'énergie de Fermi :

$$\varepsilon_F = \frac{n_s \pi \hbar^2}{m^*}$$

Tournez la page S.V.P.

Discuter la validité de ce calcul, sachant que pour les gaz d'électrons considérés, la densité électronique n_s est de l'ordre de 10^{11} cm^{-2} .

- I.5) Déterminer l'expression de la longueur d'onde λ_F d'un électron d'énergie ε_F . Montrer que λ_F , appelée longueur d'onde de Fermi, est de l'ordre de grandeur de la distance moyenne entre électrons.

Déterminer également l'expression de la vitesse v_F , appelée vitesse de Fermi, d'un électron d'énergie ε_F .

II Equation de Boltzmann. Conductivité électrique

On se propose de calculer la conductivité d'un tel gaz d'électrons en prenant en compte les collisions que subissent les électrons. On suppose le gaz d'électrons plongé dans un champ électrique $\vec{E}$ uniforme. On introduit la probabilité $f(\vec{k}, t)$ qu'un état électronique de vecteur d'onde $\vec{k}$ soit occupé à l'instant t .

- II.1) En supposant que le mouvement des électrons sous l'influence du champ $\vec{E}$ peut être décrit classiquement, préciser l'évolution du vecteur d'onde d'un électron en l'absence de collision. Déterminer le nombre d'électrons dont le vecteur d'onde à l'instant t est $\vec{k}$ à $d^2\vec{k}$ près. Montrer qu'en l'absence de collision, la conservation du nombre de particules conduit à :

$$\frac{\partial f}{\partial t} - \frac{e}{\hbar} \vec{E} \cdot \vec{\nabla}_{\vec{k}} f = 0$$

où $\vec{\nabla}_{\vec{k}}$ désigne le gradient par rapport aux coordonnées du vecteur $\vec{k}$.

- II.2) Pour tenir compte de l'effet des collisions, on introduit au second membre de l'équation précédente un terme source :

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{coll} = -\frac{f - f_0}{\tau(\varepsilon)}$$

où f_0 désigne la distribution de Fermi-Dirac et où τ , appelé temps de relaxation, ne dépend que de l'énergie de l'électron ε .

Justifier cette procédure et commenter la forme particulière choisie pour $\left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{coll}$. L'équation obtenue est appelée équation de Boltzmann.

- II.3) On suppose en plus le champ électrique stationnaire et suffisamment faible pour que la distribution f s'écarte très peu de sa valeur d'équilibre f_0 . En posant $f = f_0 + f_1$ et en linéarisant l'équation de Boltzmann, montrer que :

$$f_1(\vec{k}) = \frac{e\hbar}{m^*} \tau(\varepsilon) \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \vec{k} \cdot \vec{E}$$

- II.4) En utilisant le résultat de la question A.I.2 montrer que la densité surfacique de courant électrique s'écrit :

$$\vec{j} = -e \frac{L^2}{2\pi^2} \int f_1 \frac{\hbar \vec{k}}{m^* L^2} d^2\vec{k}$$

- II.5) A partir d'arguments de symétrie, montrer que $\vec{j}$ est parallèle à $\vec{E}$ et que la conductivité σ vaut :

$$\sigma = -\frac{e^2}{m^* L^2} \int \varepsilon \tau(\varepsilon) N(\varepsilon) \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} d\varepsilon$$

On pourra par exemple commencer par choisir $\vec{E}$ parallèle à x ou à y .

- II.6) Déduire du comportement de $\frac{\partial f_0}{\partial \epsilon}$ qu'à   temp  rature nulle, la conductivité ne dépend que des propriétés du gaz d'électrons à l'énergie de Fermi et qu'elle vaut :

$$\sigma = \frac{n_s e^2 \tau(\epsilon_F)}{m^*}$$

Commenter. Montrer que l'on peut écrire :

$$\vec{j} = -n_s e \vec{v}_d$$

où $\vec{v}_d$ est appelée vitesse de dérive. Donner l'expression de $\vec{v}_d$ et l'interpréter physiquement. Déterminer la mobilité η définie par $\vec{v}_d = -\eta \vec{E}$.

- II.7) En utilisant la relation entre f_1 et $\vec{\nabla}_{\vec{k}} f_0$, montrer qu'à   temp  rature nulle :

$$f(\vec{k}) \approx f_0 \left(\vec{k} + \frac{e\tau(\epsilon_F)}{\hbar} \vec{E} \right)$$

Représenter à   temp  rature nulle et dans le cas d'un champ $\vec{E}$ parallèle à x les portions du plan k_x, k_y où les fonctions f et f_0 prennent des valeurs non nulles. Expliquer pourquoi les propriétés de conduction du gaz d'électrons ne dépendent que de ses propriétés au niveau de Fermi.

Montrer que pour la conduction, tout se passe comme si seule une fraction des électrons participait à la conduction en se déplaçant à la vitesse de Fermi v_F . Evaluer cette fraction en fonction de v_d et v_F .

- II.8) Donner l'expression du libre parcours moyen l des électrons au niveau de Fermi et montrer que :

$$\sigma = \frac{e^2}{h} k_F l$$

où k_F désigne le vecteur d'onde de Fermi.

En déduire que $\hbar/e^2$ a la dimension d'une résistance.

III Données numériques

On considère un gaz bidimensionnel d'électrons de densité électronique $n_s = 3,56 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ et de mobilité $\eta = 0,85 \cdot 10^6 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. La masse effective des électrons est $m^* = 0,067 m_0$ où m_0 est la masse de l'électron libre.

- III.1) Déterminer les valeurs numériques de ϵ_F , λ_F , v_F , $\tau(\epsilon_F)$ et l .

Comparer les à celles obtenues dans un métal habituel comme l'or pour lequel on a une densité volumique d'électrons $\approx 6 \cdot 10^{28} \text{ cm}^{-3}$, $\epsilon_F = 5,5 \text{ eV}$, $\lambda_F = 5,2 \text{   }$, $v_F = 1,4 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$ et, à   temp  rature ambiante, $l \approx 20 \text{ nm}$. On admettra qu'à 3 dimensions, λ_F reste de l'ordre de la distance entre électrons.

Evaluer également numériquement la conductivité σ du gaz bidimensionnel.

- III.2) Donner les valeurs numériques de la résistance $\hbar/e^2$ et de la conductance e^2/h .

- III.3) Montrer que si l'on exprime la mobilité en unité $10^6 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ et la densité électronique en unité 10^{11} cm^{-2} , la résistance d'un carré du gaz d'électrons est indépendante de la dimension du carré et vaut :

$$R_{\square} = \frac{62.5}{n_s \eta} \Omega$$

Tournez la page S.V.P.

PARTIE B

Quantification de la conductance

On considère dans cette partie un conducteur rectiligne de longueur L (direction x) et de largeur W (direction y) très petite par rapport à L . On suppose L et W très inférieurs au libre parcours moyen l défini dans la partie précédente de sorte que les électrons du conducteur ne subissent aucune collision. On parle alors d'un régime de transport balistique. Dans la direction y , les bords du conducteur sont modélisés par une énergie potentielle abrupte $\tilde{V}(y)$ donnée par :

$$\tilde{V}(y) = 0 \text{ pour } 0 < y < W \quad \tilde{V}(y) = +\infty \text{ pour } y \leq 0 \text{ et } y \geq W$$

Comme dans la partie A, on néglige les interactions entre électrons et on affecte aux électrons une masse effective m^* .

- 1) Ecrire l'hamiltonien électronique et montrer que ses fonctions propres s'écrivent :

$$\Psi(x, y) = \varphi(x)\Phi(y)$$

les fonctions $\varphi(x)$ et $\Phi(y)$ étant fonctions propres de deux hamiltoniens à une dimension H_x et H_y que l'on déterminera.

Comme au A.I.1, montrer que l'application de conditions aux limites périodiques dans la direction x conduit à :

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{L}} e^{ik_x x}$$

où k_x prend des valeurs discrètes que l'on précisera.

Quelles sont les conditions aux limites dans la direction y ? Montrer que le spectre de H_y est composé de valeurs discrètes ε_n et déterminer les fonctions propres $\Phi_n(y)$ correspondantes.

Donner l'expression de l'énergie de l'électron associée à un vecteur d'onde k_x et à l'indice n .

- 2) En utilisant la formule rappelée à la question A.I.2, calculer le courant de probabilité associé à la fonction d'onde correspondant à k_x et n .

Montrer que le flux de ce courant de probabilité à travers une section transverse du conducteur est :

$$\frac{\hbar k_x}{m^* L}$$

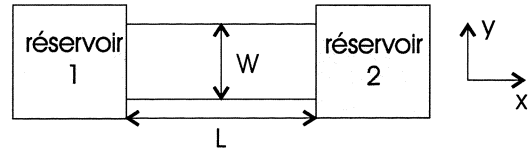
- 3) Par définition (et par analogie avec un guide d'onde électromagnétique), on associe à chaque fonction d'onde $\Phi_n(y)$ un mode transverse du guide d'onde électronique que constitue le conducteur.

On considère uniquement le mode électronique d'indice n et on cherche à calculer, en tenant compte du spin, le flux du courant de probabilité transporté par les états électroniques de vecteur d'onde $k_x > 0$ et d'énergie comprise entre ε et $\varepsilon + \Delta\varepsilon$, noté $J_{\varepsilon, \varepsilon + \Delta\varepsilon}^{n,+}$. Dans un premier temps, on considère le cas où $\varepsilon_n \leq \varepsilon$. Exprimer $J_{\varepsilon, \varepsilon + \Delta\varepsilon}^{n,+}$ comme une intégrale sur k_x puis comme une intégrale sur l'énergie. En déduire que pour $\varepsilon_n \leq \varepsilon$:

$$J_{\varepsilon, \varepsilon + \Delta\varepsilon}^{n,+} = \frac{2\Delta\varepsilon}{h}$$

Préciser ensuite ce que vaut $J_{\varepsilon, \varepsilon + \Delta\varepsilon}^{n,+}$ pour $\varepsilon + \Delta\varepsilon \leq \varepsilon_n$ puis pour $\varepsilon \leq \varepsilon_n \leq \varepsilon + \Delta\varepsilon$. Que vaut le flux du courant de probabilité transporté par les états électroniques du mode n de vecteur d'onde $k_x < 0$ et d'énergie comprise entre ε et $\varepsilon + \Delta\varepsilon$, noté $J_{\varepsilon, \varepsilon + \Delta\varepsilon}^{n,-}$?

- 4) On place maintenant le conducteur défini ci-dessus entre deux réservoirs d'électrons identiques constitués de deux gaz bidimensionnels d'électrons de densité électronique n_s et de masse effective m^* (voir figure 1). Ces deux réservoirs, également appelés contacts et notés 1 et 2, possèdent les propriétés suivantes :



- Figure 1 -

- Ils absorbent tous les électrons quittant le conducteur sans discrimination de leur énergie ou de leur état quantique.
- Ils émettent en direction du conducteur des électrons suivant une population d'états correspondant à un équilibre thermodynamique bien défini : distribution de Fermi-Dirac avec un potentiel chimique μ et une température θ .

Quel est l'analogue de ce type de réservoir pour des photons? Quels types de collisions doivent exister dans les réservoirs pour qu'ils puissent atteindre l'équilibre thermodynamique?

- 5) Dans la suite de cette partie, le contact 1 est porté à un potentiel électrique $V > 0$ tandis que l'on applique un potentiel nul au contact 2. On note μ_1 le potentiel chimique du réservoir 1 et μ_2 celui du réservoir 2.

Donner l'expression de la différence $\mu_2 - \mu_1$ en fonction de V .

On considère un mode transverse du conducteur, d'indice n , pour lequel $\varepsilon_n < \mu_2$. Montrer que si $\varepsilon_n < \mu_1$, le courant électrique total transporté par ce mode lorsque les réservoirs sont maintenus à température nulle est :

$$I_n = \frac{2e}{h}(\mu_2 - \mu_1)$$

Discuter le signe de I_n .

Montrer qu'à suffisamment faible différence de potentiel et à température nulle, la conductance associée à un mode est :

$$G = \frac{2e^2}{h}$$

- 6) En utilisant les résultats des questions A.I.5 et B.1, montrer que la conductance du conducteur à suffisamment faible tension et à température nulle est quantifiée et vaut :

$$G = \frac{2e^2}{h} \text{Int} \left[\frac{2W}{\lambda_F} \right]$$

où λ_F est la longueur d'onde de Fermi du gaz bidimensionnel d'électrons. Quel doit être l'ordre de grandeur de la largeur W du conducteur pour que cet effet de quantification puisse être observé? Commenter à l'aide des données numériques de la partie A.III.

A quelle condition sur la température θ du système peut on observer ces effets de quantification?

- 7) Montrer qu'une dissipation d'énergie que l'on évaluera est associée au processus de conduction décrit ci-dessus.

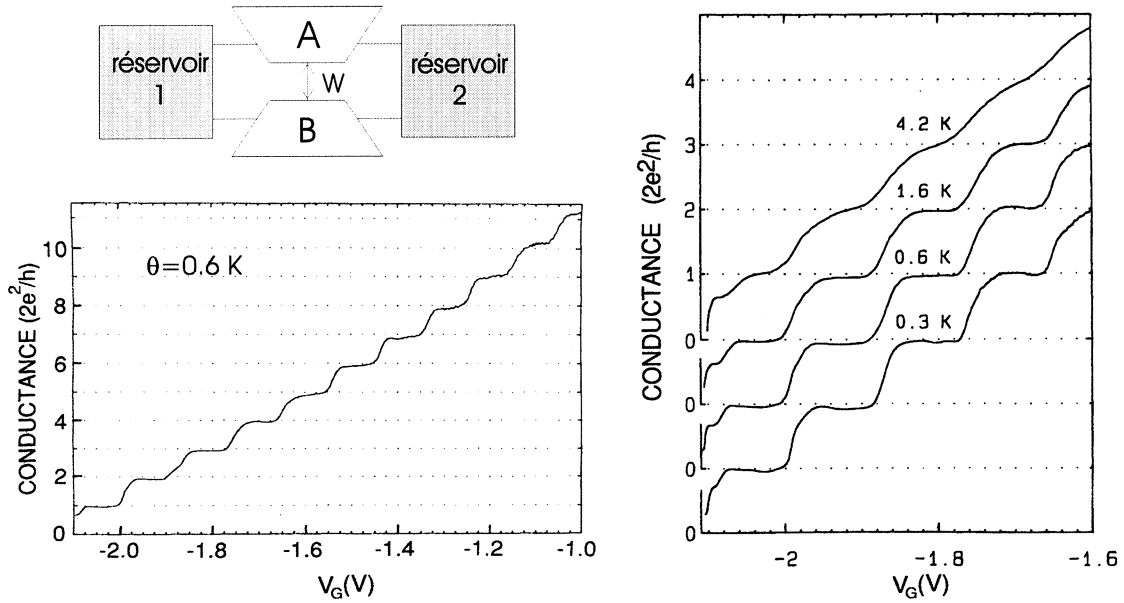
Comment varie la résistance du conducteur avec sa longueur L ?

Interpréter ces 2 résultats et proposer une explication pour cette dissipation apparemment paradoxale puisque l'on a supposé le conducteur en régime balistique.

Pourquoi parle-t-on de résistance de contact?

Quelle condition doit satisfaire la différence de potentiel V pour que l'on puisse supposer les réservoirs à l'équilibre thermique à la température θ ? Commenter à l'aide de la question précédente et des données numériques de A.III.

Tournez la page S.V.P.



- Figure 2 -

- 8) La figure 2 présente les résultats expérimentaux obtenus par B.J. Van Wees et ses collaborateurs en 1988¹. Le conducteur quantique et les réservoirs sont définis dans le même gaz bidimensionnel d'électrons de densité $n_s = 3,56 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, de mobilité $\eta = 0,85 \cdot 10^6 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ et de masse effective $m^* = 0,067 m_0$. Une tension négative V_G appliquée sur les électrodes A et B (grilles) permet de contrôler par un effet électrostatique non décrit ici la largeur W du conducteur défini entre ces deux électrodes.

Commenter la courbe donnant la conductance mesurée en fonction de la tension grille appliquée à $\theta = 0,6 \text{ K}$.

Comment varie la largeur du fil en fonction de la tension grille V_G ? Evaluer numériquement la variation de la largeur du fil entre deux paliers de conductance.

Commenter également la variation de la conductance avec la température.

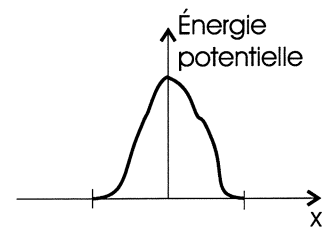
PARTIE C

Conducteur quantique et désordre

Dans cette partie, on souhaite tenir compte de la présence de désordre dans le conducteur quantique, associé par exemple à la présence d'impuretés. On se propose d'utiliser le formalisme de transmission des ondes électroniques développé dans la partie précédente et on modélise le désordre dans une tranche de conducteur par la transmission T de cette tranche qui décrit la probabilité qu'un électron injecté à l'un de ses bouts soit transmis à l'autre. Dans un premier temps, on rappelle quelques propriétés essentielles des coefficients de réflexion et de transmission d'une barrière de potentiel.

I Transmission et réflexion d'une barrière de potentiel

On étudie ici une géométrie unidimensionnelle et on considère la barrière de potentiel représentée sur la figure 3. On définit des régions appelées G et D situées respectivement à gauche et à droite de cette barrière, où l'énergie potentielle est nulle.



- Figure 3 -

1. B.J. Van Wees et al., Phys.Rev.Lett. 60, 848 (1988) et Phys.Rev.B. 43, 12431 (1991)

- I.1) On considère l'équation de Schrödinger associée à cette barrière de potentiel pour une particule de masse m^* . Montrer qu'un état stationnaire décrivant une particule de vecteur d'onde $k > 0$ arrivant de la région G vers la barrière s'écrit :

$$A \left\{ e^{ikx} + r e^{-ikx} \right\} \text{ dans G}$$

$$A \left\{ t e^{ikx} \right\} \text{ dans D}$$

où A est une constante. Que représentent r et t ?

- I.2) En utilisant la formule donnée à la question A.1.2, calculer le courant de probabilité associé à la fonction d'onde ci-dessus dans la région G et dans la région D. En déduire :

$$|r|^2 + |t|^2 = 1$$

$T = |t|^2$ est appelée transmission de la barrière.

- I.3) De la même façon, la fonction d'onde qui décrit une particule de vecteur d'onde $k < 0$ arrivant de la région D vers la barrière s'écrit :

$$A \left\{ e^{-ikx} + r' e^{ikx} \right\} \text{ dans D}$$

$$A \left\{ t' e^{-ikx} \right\} \text{ dans G}$$

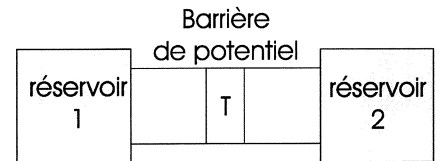
On admettra sans chercher à les démontrer les propriétés suivantes :

$$|r|^2 = |r'|^2 \text{ et } |t|^2 = |t'|^2$$

Quelle est la signification physique de ces relations?

II Conductance versus transmission

On considère un conducteur quantique similaire à celui décrit dans la partie B mais **mais pour lequel un seul mode transverse participe à la conduction**. Comme dans la partie B, ce conducteur est placé entre deux réservoirs d'électrons identiques notés 1 et 2. On applique au réservoir 1 un potentiel $V > 0$ et un potentiel nul au réservoir 2. On modélise les collisions élastiques que peuvent subir les électrons dans le conducteur par une barrière de potentiel dont les paramètres r et t (cf. C.I) sont supposés, pour simplifier, indépendants de l'énergie (voir figure 4).



- Figure 4 -

- II.1) En reprenant les grandes lignes du raisonnement de la partie B et en utilisant les résultats de la partie C.I, calculer le courant dans le conducteur à droite de la barrière pour une faible différence de potentiel V . Calculer de même le courant à gauche de la barrière. Commenter. En déduire qu'à suffisamment faible différence de potentiel V , la conductance du système vaut :

$$G = \frac{2e^2}{h} T$$

où T a été défini au C.I.2. Interpréter cette relation.

Tournez la page S.V.P.

II.2) Montrer que la résistance du conducteur s'écrit :

$$R = \frac{h}{2e^2} + \frac{h}{2e^2} \frac{1-T}{T}$$

A l'aide des résultats de la partie B, déterminer le sens physique du premier terme de la somme ci-dessus. En déduire que le second terme de cette somme représente la résistance intrinsèque du conducteur considéré.

II.3) Comment faudrait-il modifier la démarche utilisée ci-dessus pour l'adapter à un conducteur pour lequel plusieurs modes transverses participent à la conduction?

Dans les deux parties suivantes, on s'intéresse à un conducteur rectiligne **monomode transverse** contenant un grand nombre de diffuseurs (des impuretés par exemple) répartis aléatoirement. Chaque diffuseur est modélisé par une barrière de potentiel et on s'intéresse à la transmission du système ainsi formé ou, ce qui revient au même d'après la partie précédente, à la résistance du conducteur.

III Conducteur incohérent. Loi d'Ohm

Dans toute cette partie, **on suppose que la longueur de cohérence de phase des ondes électroniques est inférieure à la distance entre les diffuseurs.**

III.1) Dans un premier temps, on s'intéresse à la transmission $T(2)$ du système formé par deux barrières de transmission T_1 et T_2 séparées d'une distance plus grande que la longueur de cohérence de phase des ondes électroniques. Montrer que :

$$T(2) = \frac{T_1 T_2}{1 - (1 - T_1)(1 - T_2)}$$

Montrer que $(1 - T)/T$ est une grandeur additive c'est à dire que :

$$\frac{1 - T(2)}{T(2)} = \frac{1 - T_1}{T_1} + \frac{1 - T_2}{T_2}$$

Commenter ce résultat à l'aide de la question C.II.2.

III.2) On appelle ν la densité linéique de diffuseurs dans le conducteur. On suppose tous les diffuseurs identiques, chacun pouvant être modélisé par une barrière de transmission T . Montrer que la transmission d'une longueur L de conducteur contenant beaucoup de diffuseurs s'écrit :

$$T(L) = \frac{L_0}{L + L_0}$$

où l'on exprimera L_0 en fonction de T et ν .

III.3) Dans le cas, supposé réalisé par la suite où $T \approx 1$, montrer que :

$$L_0 \nu (1 - T) \approx 1$$

A partir de cette dernière relation, donner un sens physique à la longueur L_0 .

A l'aide du C.II.2, montrer que la résistance d'un conducteur de longueur L s'écrit :

$$R(L) = R_{cl}(L) + \frac{h}{2e^2}$$

Préciser le sens physique de chacun de ces termes. Commenter la dépendance de R_{cl} avec L . Comparer $R_{cl}(L)$ à la résistance que l'on obtiendrait à partir de l'équation de Boltzmann par un traitement analogue à celui réalisé au A, sachant qu'une telle approche donne pour la conductivité d'un système à une dimension :

$$\sigma_{1D} = \frac{n_l e^2 \tau(\varepsilon_F)}{m^*}$$

où n_l est la densité électronique linéique. On précise d'autre part qu'à une dimension, la longueur d'onde de Fermi est donnée par $\lambda_F = 4/n_l$. Conclure.

IV Conducteur cohérent. Localisation

On reprend le problème de la partie précédente, **en supposant cette fois-ci la longueur de cohérence de phase des ondes électroniques plus grande que la longueur du conducteur.**

IV.1) Reprendre la première question de la partie précédente et montrer que dans ce cas :

$$T(2) = \frac{T_1 T_2}{1 - 2\sqrt{(1-T_1)(1-T_2)} \cos \alpha + (1-T_1)(1-T_2)}$$

où α est le déphasage total subi par une onde électronique après un aller et retour entre les deux barrières.

IV.2) On considère un morceau de conducteur de transmission T_1 , dont la résistance intrinsèque vaut :

$$R_1 = \frac{h}{2e^2} \frac{1-T_1}{T_1}$$

d'après les résultats du C.II.2.

On rajoute à la suite de ce morceau un autre morceau de transmission T_2 et de résistance intrinsèque :

$$R_2 = \frac{h}{2e^2} \frac{1-T_2}{T_2}$$

On suppose que le déphasage subi par une onde électronique après un aller et retour entre les deux barrières de transmissions T_1 et T_2 est α . Calculer la résistance intrinsèque $R(\alpha)$ du conducteur ainsi formé. Comparer $R(\alpha)$ et $R_1 + R_2$. Commenter.

IV.3) Montrer que la résistance intrinsèque d'un morceau de conducteur ne contenant qu'un seul diffuseur (de transmission $T \approx 1$) est en moyenne :

$$\frac{h}{2e^2} \frac{\Delta L}{L_0}$$

où ΔL est l'inverse de la densité linéique de diffuseurs ν .

On utilisera la relation $\nu L_0(1-T) \approx 1$ établie à la question C.III.3.

IV.4) On considère un conducteur de longueur L et de résistance intrinsèque $R(L)$. On réalise un grand nombre de fois la même expérience : on rajoute au conducteur de longueur L un morceau de conducteur ne contenant qu'un seul diffuseur placé aléatoirement. Montrer qu'en moyenne, la résistance intrinsèque du conducteur ainsi formé est :

$$R(L + \Delta L) = R(L) + \frac{h}{2e^2} \left[1 + \frac{4e^2}{h} R(L) \right] \frac{\Delta L}{L_0}$$

IV.5) Montrer que la résistance intrinsèque $R(L)$ d'un conducteur plus court que la longueur de cohérence de phase des ondes électroniques vaut :

$$R(L) = \frac{h}{4e^2} \left[e^{2\frac{L}{L_0}} - 1 \right]$$

IV.6) Comment varie $R(L)$ pour $L \gg L_0$? Commenter ce résultat connu sous le nom de localisation forte.

IV.7) On considère maintenant un conducteur monomode transverse dont la longueur, bien que grande devant la distance entre diffuseurs, est très inférieure à la longueur de localisation L_0 .

IV.7.a) Montrer que cette hypothèse revient à supposer que la transmission de chaque diffuseur est très voisine de 1.

IV.7.b) Montrer à l'aide des résultats de la partie précédente que la résistance intrinsèque du conducteur est :

$$R(L) = R_{cl}(L) \left[1 + \frac{2e^2}{h} R_{cl}(L) \right]$$

où $R_{cl}(R)$ a été défini au C.III.3.

IV.7.c) En déduire que la correction à la conductance intrinsèque due aux effets d'interférences quantiques est :

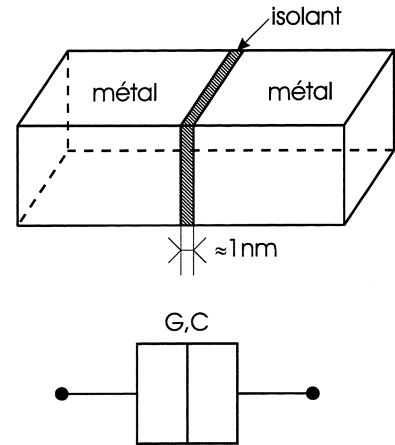
$$\Delta G = -\frac{2e^2}{h}$$

Cet effet est appelé localisation faible.

PARTIE D

Electronique à un électron

Dans cette partie, on s'intéresse à des dispositifs dont le composant de base est la jonction tunnel. Celle-ci est composée de deux électrodes métalliques séparées par une couche isolante d'épaisseur suffisamment faible pour que les électrons puissent la traverser par effet tunnel. Cette jonction peut être caractérisée par une conductance G dépendant de la transmission de la barrière de potentiel formée par la couche isolante. D'autre part, les deux électrodes métalliques forment également un condensateur de capacité C . La jonction tunnel et le schéma électrique que l'on utilisera pour la modéliser sont présentés sur la figure 5.

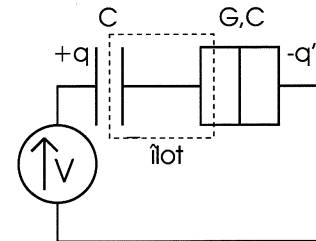


- Figure 5 -

L'électronique à un électron repose sur le caractère discret de la charge qui traverse la jonction tunnel : **à chaque événement tunnel, une charge égale à la charge de l'électron e passe à travers la jonction** (on néglige dans ce problème les événements où deux électrons traverseraient simultanément la barrière).

I Blocage de Coulomb de l'effet tunnel

Dans un premier temps, on considère le dispositif, représenté sur la figure 6, appelé "boîte à un électron", constitué d'une jonction tunnel en série avec un condensateur, l'ensemble étant polarisé par un générateur délivrant la tension V . Pour simplifier les calculs, on supposera que les capacités de la jonction et du condensateur sont toutes deux égales à C .



- Figure 6 -

- I.1) Montrer que la charge électrique de l'îlot métallique, formé par les armatures internes des capacités et représenté en pointillé sur la figure 6 est quantifiée et ne peut être qu'un multiple entier n de la charge de l'électron $-e$.
Expliquer pourquoi il n'en est pas de même des charges q et q' présentes sur les armatures du condensateur ou de la jonction?
- I.2) Exprimer la charge q du condensateur en fonction de n , V et C .
- I.3) Calculer l'énergie électrostatique U_e du système formé par les deux capacités en fonction de la capacité C , de la tension V et du nombre n d'électrons en excès sur l'îlot. Vérifier qu'elle s'écrit comme la somme de deux termes, l'un dépendant de V , l'autre de n et donner une interprétation physique de chacun de ces termes.
- I.4) On suppose que le système formé par les deux capacités est maintenu à température constante θ par un thermostat et qu'il est polarisé à tension constante V par le générateur. On cherche à calculer le nombre $\bar{n}$ d'électrons en excès sur l'îlot à l'équilibre. En appliquant

les deux premiers principes de la thermodynamique au système formé des deux capacités, montrer qu'à $\theta = 0\text{ K}$, le potentiel thermodynamique qui régit son évolution est :

$$U_e - \frac{neV}{2}$$

En déduire que l'équilibre du système à $\theta = 0\text{ K}$ est atteint pour la valeur $\bar{n}$ de n qui rend minimum la fonction :

$$\frac{1}{2} \frac{e^2}{2C} \left\{ n - \frac{CV}{e} \right\}^2$$

- I.5)** Tracer sur un même graphe les courbes représentant la fonction ci-dessus en fonction de V pour différentes valeurs de n .
En déduire le nombre entier $\bar{n}$ en fonction de V . Tracer la courbe $\bar{n}(V)$. Commenter.
Tracer également la courbe donnant, à $\theta = 0\text{ K}$, la charge q' de la capacité de la jonction tunnel en fonction de V .

- I.6)** Montrer qu'à $\theta = 0\text{ K}$, lorsqu'on augmente la tension V à partir de 0, l'effet tunnel est bloqué (blocage de Coulomb) jusqu'à ce que V soit égal à $e/2C$.
Vérifier que cette dernière condition s'écrit également :

$$\frac{1}{2} \frac{e^2}{2C} = \frac{V}{2}$$

Quelle est la signification physique de chacun des termes de cette équation? Proposer une interprétation physique simple du blocage de Coulomb.

- I.7)** Montrer que cet effet ne peut-être observé que si la température θ est suffisamment basse pour que :

$$k_B\theta \ll \frac{1}{2} \frac{e^2}{2C}$$

On suppose la condition ci-dessus vérifiée. Discuter qualitativement les fluctuations thermiques de n pour les différentes valeurs de la tension V . Préciser en particulier les valeurs de V pour lesquelles ces fluctuations sont thermiquement bloquées.

Evaluer l'ordre de grandeur des capacités nécessaires pour pouvoir observer des effets de blocage de Coulomb à température ambiante. En utilisant par exemple l'expression de la capacité d'une sphère métallique, évaluer un ordre de grandeur de la taille caractéristique des systèmes correspondants. Commenter.

On sait fabriquer par nanolithographie des jonctions tunnel dont la capacité est de l'ordre du femtofarad (10^{-15} F). Quelle température faut-il atteindre pour pouvoir observer des effets de blocage de Coulomb dans de tels systèmes? Comment peut-on obtenir une telle température? Quelle est la différence de potentiel qui permet d'ajouter un électron sur l'îlot? Commenter.

- I.8)** Dans cette question, on s'intéresse aux fluctuations quantiques de n . On cherche un critère pour que ces fluctuations, associées à la délocalisation des fonctions d'ondes électroniques de part et d'autre de la barrière, soient suffisamment faibles pour que la charge soit complètement localisée sur l'îlot et que les raisonnements ci-dessus restent valables.
On se place en régime de blocage de Coulomb maximal, par exemple à $V = e/C$. Montrer

que le temps qui sépare deux événements tunnel est relié à la conductance G de la jonction par :

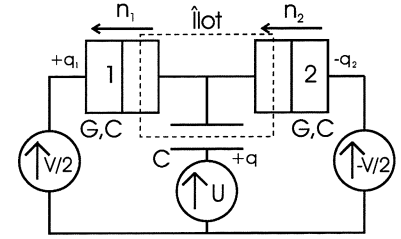
$$\tau = \frac{e}{GV} = \frac{C}{G}$$

En déduire l'élargissement ΔE des niveaux d'énergie de l'îlot. Vérifier que les effets de blocage de Coulomb ne sont observables que si :

$$G \ll \frac{e^2}{h}$$

II Le transistor à un électron

Dans cette partie, on considère le dispositif, présenté figure 7, contenant deux jonctions tunnel (notées 1 et 2) et un condensateur. Ce dispositif est appelé transistor à un électron. Pour simplifier les calculs, on supposera les deux jonctions tunnel identiques de capacité C égale à celle du condensateur. Comme dans la partie précédente, on cherche le nombre n d'électrons en excès sur l'îlot métallique formé par les armatures internes des trois capacités.

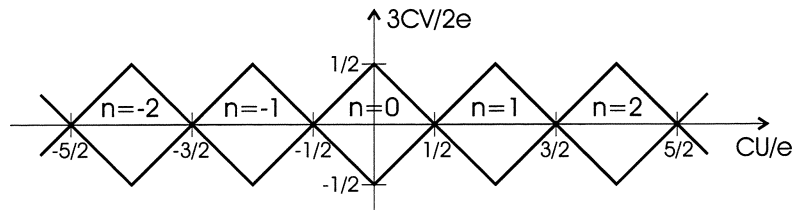


- Figure 7 -

- II.1)** Exprimer les charges individuelles q_1 , q_2 et q et l'énergie électrostatique globale des trois capacités en fonction de U , V , n et C .
- II.2)** On caractérise le système par le nombre n d'électrons en excès sur l'îlot, par le nombre n_1 d'électrons qui ont quitté l'îlot en traversant la jonction 1 et par le nombre n_2 d'électrons qui y sont arrivés en traversant la jonction 2 (voir figure 7). Exprimer en fonction de U , V , Δn_1 et Δn_2 , le travail fourni par l'ensemble des trois générateurs lors d'une transformation du système qui le conduit de l'état (n, n_1, n_2) à l'état $(n + \Delta n, n_1 + \Delta n_1, n_2 + \Delta n_2)$ à tensions U et V constantes.
- II.3)** Comme dans la partie précédente, montrer qu'à température θ nulle et à tension U et V constantes, le potentiel thermodynamique qui régit l'évolution du système est à une constante près :

$$\frac{1}{2} \left[\frac{n^2 e^2}{3C} \right] - n_1 e \left[\frac{V}{2} - \frac{U}{3} \right] - n_2 e \left[\frac{V}{2} + \frac{U}{3} \right]$$

- II.4)** A $\theta = 0 K$, on envisage la situation où n électrons en excès sont présents sur l'îlot. Etablir les conditions, portant sur U , V et n , pour que les transitions conduisant à $n - 1$ ou $n + 1$ électrons sur l'îlot soient thermodynamiquement bloquées. Montrer que la zone de stabilité de la configuration à n électrons sur l'îlot est le carré représenté pour $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ sur le diagramme ($Y = 3CV/2e$, $X = CU/e$) de la figure 8.



- Figure 8 -

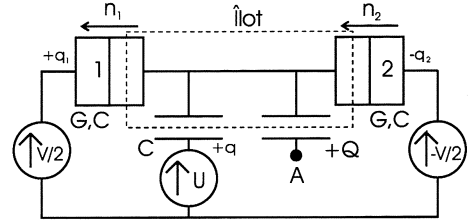
Tournez la page S.V.P.

- II.5)** A $\theta = 0 K$, on se place à une tension V inférieure à $e/3C$ et on augmente progressivement la tension U à partir de 0. Montrer qu'un courant électrique I traverse le dispositif lorsqu'on sort de la zone de stabilité d'un îlot à 0 électron? Que se passe-t-il si on augmente encore la tension U ?

Tracer qualitativement l'allure du courant en fonction de U .

Montrer que les pics de conductance sont d'autant plus larges que V est proche de $e/3C$ et évaluer le courant maximum qui traverse le transistor pour $V \approx e/3C$ en fonction de G et C . L'évaluer numériquement pour les valeurs typiques $G = 10^{-5} \Omega^{-1}$ et $C = 10^{-15} F$.

- II.6)** On modifie légèrement le schéma de la figure 7 en rajoutant un condensateur dont une des armatures est reliée à l'îlot métallique. Sur l'autre armature de ce condensateur on impose une charge constante égale à Q (voir figure 9).



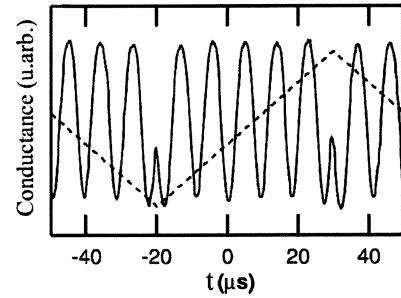
- Figure 9 -

Montrer que le diagramme de stabilité des différentes configurations de l'îlot est celui présenté figure 8 à condition de remplacer CU/e par $CU/e + Q/e$.

On part d'une situation où le transistor est polarisé au maximum d'un pic de conductance. De combien faut-il modifier Q pour atteindre le pic de conductance voisin, les générateurs de tension étant maintenus à tension constante? En déduire que le transistor à un électron peut-être utilisé comme un électromètre extrêmement sensible.

- II.7)** Dans cette question, on s'intéresse aux performances d'un électromètre réalisé en 1998 par R.J. Schoelkopf et ses collaborateurs² à l'aide d'un transistor à un électron à base d'aluminium. Toutes les mesures présentées ont été effectuées à très basse température ($\approx 45 mK$). Le schéma de principe du transistor est celui de la figure 9.

- II.7.a)** La figure 10 présente la conductance mesurée du transistor lorsqu'une tension triangulaire (représentée en pointillés) de fréquence $10 kHz$ est appliquée au point A. Lors de cette expérience, quelle est la variation de la charge Q ?



- Figure 10 -

- II.7.b)** Expliquer qualitativement comment régler le générateur de tension U pour que la sensibilité de l'électromètre soit maximale. On étudie maintenant la réponse en fréquence de l'électromètre ainsi polarisé lorsqu'on applique au point A une tension sinusoïdale de fréquence $\nu_0 = 1,1 MHz$ et dont la valeur efficace est ajustée en utilisant les résultats de l'expérience précédente pour correspondre à une charge de 0,01 électron. Pour cela, on utilise un analyseur de spectre qui mesure la transformée de Fourier $S(\nu)$ de la fonction d'autocorrélation du signal qu'il reçoit. Ce signal est la somme d'un signal sinusoïdal de fréquence ν_0 et de valeur efficace a et d'un bruit, blanc dans la bande de mesure (c'est à dire indépendant de la fréquence). Le signal sinusoïdal et le bruit

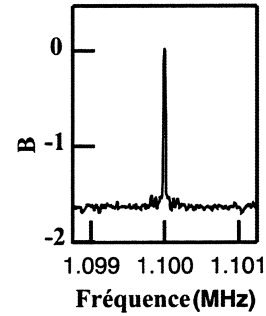
2. R.J. Schoelkopf et al., Science 280, 1238 (1998)

n'étant pas corrélés, leurs fonctions d'autocorrélation s'ajoutent de sorte que :

$$S(\nu) = a^2 \delta(\nu - \nu_0) + b^2$$

où le premier terme correspond à la sinusoïde et le second, constant, est caractéristique d'un bruit blanc.

Le temps de mesure fini T de l'analyseur fixe la résolution spectrale de sorte que l'on a accès à la quantité $A(\nu)$ égale à l'intégrale de $S(\nu)$ sur une bande de largeur $\Delta\nu = 1/T$ centrée autour de ν . La figure 11 présente, à une constante près, $B = \log(\sqrt{A(\nu)})$ en fonction de ν . Sachant que $\Delta\nu = 23 \text{ Hz}$, montrer que le bruit du système est caractérisé par la sensibilité $S_q = b \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ électrons}/\sqrt{\text{Hz}}$. Commenter en particulier l'unité de la quantité précédente et ses conséquences expérimentales.



- Figure 11 -

- II.7.c) Sachant que la capacité du condensateur de charge Q est $0,45 \cdot 10^{-15} \text{ F}$, calculer la sensibilité en énergie du transistor $\delta E = S_q^2/2C$. Montrer qu'elle a la même unité que la constante de Planck h et calculer le rapport $\delta E/h$. Commenter.
- II.7.d) L'étude en fréquence révèle par ailleurs que la bande passante du transistor est d'environ 100 MHz . Montrer que même si l'on souhaite effectuer des mesures rapides en utilisant toute la bande passante du transistor, le bruit de charge reste inférieur à 1 électron. Calculer la fréquence moyenne de passage des électrons pour un courant de 10 pA . En déduire que le transistor à un électron ci-dessus permet de mesurer, en une dizaine de secondes, des courants de l'ordre de 10 pA avec une précision relative de l'ordre de 10^{-9} .

Quel peut être l'intérêt métrologique d'un tel système?

10 Rapport relatif au problème de physique

Le sujet proposé en 2004 aborde certains aspects d'une branche de la physique des solides, appelée physique mésoscopique, qui s'est considérablement développée depuis le début des années 1980. Elle s'intéresse aux phénomènes essentiellement quantiques qui se produisent dans les métaux ou les semiconducteurs à une échelle intermédiaire entre l'échelle microscopique et l'échelle macroscopique. Les énormes progrès réalisés dans l'élaboration des matériaux ainsi que dans les technologies de fabrication de dispositifs électroniques de taille nanométrique ont permis l'observation expérimentale de nombreux effets quantiques originaux à l'échelle mésoscopique. Parmi ces effets, on peut citer la quantification de la conductance, les phénomènes de localisation ou l'électronique à un électron qui sont abordés dans ce problème mais également l'effet Hall quantique entier ou fractionnaire qui a donné lieu à l'attribution de deux prix Nobel dans les vingt dernières années.

Le problème aborde deux aspects essentiels de la physique mésoscopique :

- le premier est lié à la nature ondulatoire des électrons. Lorsque la taille du système étudié devient plus petite que la longueur de cohérence de phase électronique, on observe des effets de quantification de la conductance, étudiés partie B et des effets d'interférences qui conduisent aux phénomènes de localisation étudiés partie C.
- le second, lié à la quantification de la charge électronique et au phénomène de blocage de Coulomb, est appelé électronique à un électron et est étudié partie D.

Remarques générales

Même si le jury a eu le plaisir de corriger quelques excellentes copies où l'ensemble du problème est abordé avec une compréhension manifeste de la physique des systèmes considérés, le niveau général n'est pas satisfaisant. On trouve en particulier un nombre important de copies au contenu indigent compte tenu de la durée de l'épreuve.

Une analyse un peu rapide peut conduire à attribuer ce résultat décevant au fait que la mécanique quantique est présente pour la première fois dans la quasi-totalité du problème. Il s'agit toutefois uniquement de l'aspect ondulatoire ; les problèmes plus délicats, par exemple liés à la mesure, ne sont pas concernés. La partie C présente en particulier une analogie très forte avec l'optique ondulatoire, mentionnée dans le texte, qui aurait dû permettre aux candidats de se raccrocher à une physique plus familière. Enfin, la partie D, indépendante des autres, concerne l'électrostatique et la thermodynamique classique ; elle ne fait pas intervenir la mécanique quantique, mais elle n'est pas mieux traitée que le reste du problème lorsqu'elle a atteint.

Il semble que les résultats un peu décevants enregistrés à cette épreuve témoignent plutôt d'une certaine incapacité des candidats à réagir devant un problème inconnu ou à savoir reproduire dans un domaine les raisonnements ou les méthodes que l'on a l'habitude d'utiliser dans un autre. Ce sont pourtant les aptitudes correspondantes que doit notamment tester le problème. Celui-ci présente une assez grande variété de raisonnements sans difficultés techniques majeures, les calculs étant courts et relativement simples dans l'ensemble.

Afin de faciliter la progression dans le problème, beaucoup de résultats intermédiaires sont donnés dans l'énoncé. Les correcteurs prêtent alors une attention toute particulière à la façon dont ces résultats sont établis. Or, de nombreuses tricheries volontaires et systématiques sont constatées ; cela ne peut que nuire à l'impression générale laissée par une copie.

Remarques à propos des différentes parties du problème

▪ **La partie A** présente une description semi-classique standard du transport électronique dans les gaz bidimensionnels d'électrons. Les effets d'interférences quantiques ne sont pas pris en compte et l'influence des processus de diffusion sur les propriétés de transport est décrite par l'équation de Boltzmann dans l'approximation du temps de relaxation.

Cette partie, souvent traitée de manière satisfaisante, fait quand même apparaître un certain nombre de lacunes graves. En particulier, la dualité onde-corpuscule semble très mal connue. Ainsi, pour déterminer la longueur d'onde de Fermi des électrons, une majorité de candidats utilise la relation de dispersion du photon. L'ensemble des applications numériques fait par ailleurs apparaître un manque total de maîtrise des ordres de grandeur attendus : on trouve par exemple des longueurs d'onde électronique de l'ordre de 10^{24} m, des temps de relaxation de l'ordre de 10^{30} s, des énergies de Fermi de l'ordre du MeV, sans parler des vitesses de Fermi parfois nettement supérieures à la vitesse de la lumière ...

Signalons par ailleurs que de nombreux candidats ne réalisent pas que pour un système bidimensionnel, résistance et résistivité ont la même dimension. Cela conduit à de nombreuses erreurs.

▪ **La partie B** établit la quantification de la conductance d'un conducteur quantique en régime balistique (absence de diffusion). Il s'agit de dénombrer correctement la contribution au courant des électrons injectés par les réservoirs. Peu de candidats peuvent mener à bien cette entreprise. Par ailleurs, de nombreuses réponses totalement inexactes sont obtenues à la question sur l'analogie des réservoirs pour les photons : laser (souvent), photodiode à semi-conducteur et même « accélérateur de particules (boson de Higgs) » ... Que penser des réponses fournies par un tel candidat aux questions de ses futurs élèves ?

▪ **La partie C** propose une étude des effets du désordre dans un conducteur quantique. On s'intéresse dans un premier temps (parties I et II) à l'influence d'une impureté, modélisée par une barrière de transmission T , sur la conductance d'un conducteur quantique cohérent. Il s'agit ici de reproduire les raisonnements de la partie précédente dans un cas un peu plus complexe. La notion de transmission pour une barrière de potentiel est en général bien connue même si, pour beaucoup de candidats, la relation $|r|^2 + |t|^2 = 1$ traduit la conservation de l'énergie !

On s'intéresse ensuite à un conducteur quantique incohérent en présence de désordre (partie C). On commence par étudier le cas de 2 impuretés séparées d'une distance plus grande que la longueur de cohérence de phase des ondes électroniques. Il s'agit là d'un problème analogue à celui d'un interféromètre de Fabry-Pérot pour lequel la longueur de la cavité serait plus grande que la longueur de cohérence temporelle de la lumière. Les candidats qui ont remarqué cette analogie profonde ont souvent bien traité cette partie. On généralise ensuite au cas d'un conducteur macroscopique contenant un grand nombre d'impuretés et on montre que l'approche utilisée permet de retrouver la loi d'Ohm. Peu de candidats ont su attribuer un sens physique correct à la longueur L_0 définie dans cette partie. La relation $L_0 \nu(1 - T) \approx 1$ montre qu'il s'agit de la distance au bout de laquelle un électron a une probabilité 1 d'avoir été réfléchi. On peut donc identifier L_0 au libre parcours moyen de l'électron.

La partie D reprend les raisonnements de la partie précédente dans le cas d'un conducteur cohérent. Là encore, l'analogie avec l'optique est profonde. Cette partie met en évidence les effets de localisation forte et de localisation faible.

▪ **La partie D**, totalement indépendante des autres, concerne l'électronique à un électron. Elle aborde dans un premier temps (sous-partie I) les effets associés à la quantification de la charge électronique, en particulier le blocage de Coulomb. Cette partie, ne faisant pas intervenir de mécanique quantique, donne

des résultats très décevants. Les calculs élémentaires reliant les charges des capacités aux tensions appliquées sont en général mal faits. Aucun candidat ne parvient à démontrer la forme du potentiel thermodynamique à minimiser pour trouver l'équilibre du système. Il s'agit pourtant là d'une application directe des 2 premiers principes de la thermodynamique dans un cas certes différent du gaz parfait, mais relativement simple.

La sous-partie II envisage l'application des effets de blocage de Coulomb à la réalisation d'un électromètre extrêmement sensible appelé transistor à un électron. Elle n'est abordée que par un tout petit nombre de candidats qui ont montré là une compréhension assez fine des phénomènes physiques mis en jeu. La fin de cette partie étudiant les performances expérimentales d'un tel dispositif ne l'est jamais.

Conclusion

La mécanique quantique a auprès des étudiants une réputation bien établie : elle est surprenante, difficile, les calculs sont lourds et l'interprétation en est délicate. Il est permis de penser que certains candidats sont en quelque sorte partis « battus ». Pourtant, l'essentiel du sujet est accessible, toutes les parties étant d'un abord aisé, les difficultés arrivant progressivement.

Pour conclure, le jury rappelle que la mécanique quantique est une partie importante de la physique. Beaucoup d'étudiants l'ont longtemps cantonnée à la physique de l'atome ou à l'interprétation de la liaison chimique. En réalité son importance conceptuelle et pratique est maintenant telle qu'un scientifique, quelle que soit sa discipline, ne devrait plus en ignorer les aspects élémentaires. Et il est souhaitable qu'un lauréat de l'agrégation de physique ait une connaissance plus poussée du sujet même s'il n'est pas directement amené à l'enseigner.

11 DÉROULEMENT DES ÉPREUVES ORALES

Les candidats admissibles à l'Agrégation de Physique reçoivent une convocation pour une série d'oral, comportant trois épreuves réparties sur 6 jours.

La série commence par un tirage au sort le premier jour. Chaque candidat tire au sort un numéro, correspondant à trois enveloppes contenant les sujets :

- leçon de Physique (coefficient 4)
- leçon de Chimie (coefficient 3)
- montage de Physique (coefficient 3)

Ces enveloppes seront ouvertes par le candidat au début de chacune des épreuves, qui commencent dès le lendemain du tirage au sort, selon l'horaire suivant

(Attention, les transports en commun fonctionnent qu'à partir de 5h30).

Ouverture du sujet	5h10	6h30	7h50	11h20	12h40	14h00
Début de l'épreuve	9h20	10h40	12h00	15h30	16h50	18h10

Une épreuve se déroule de la façon suivante :

- ouverture du sujet tiré au sort : un sujet obligatoire pour les leçons, et un sujet à choisir parmi deux proposés pour le montage.
- 4 h de préparation à l'épreuve (10 minutes supplémentaires étant allouées pour permettre les déplacements entre étages).
- 1 h 20 d'épreuve, dont 50 min pour l'exposé d'une leçon ou 40 min pour la présentation du montage, le reste du temps pouvant être utilisé par le Jury pour les questions.

L'usage des calculatrices personnelles n'est pas autorisé.

Les épreuves sont publiques.

Il est demandé aux candidats de se munir d'une pièce d'identité en cours de validité, de transparents vierges et de marqueurs pour rétroprojection, ainsi que d'une blouse pour la leçon de Chimie.

A la fin du tirage au sort, les candidats peuvent visiter les bibliothèques et la collection de matériel de Physique et de Chimie.

Les bibliothèques resteront ouvertes aux candidats tous les soirs à partir de 18h 15.

Le matériel ainsi que les livres et documents, doivent être envoyés ou déposés (éventuellement par les candidats eux-mêmes), au plus tard avant le début de la première épreuve de la première série. Pour le matériel il est nécessaire de fournir un inventaire et une notice de fonctionnement. Ils seront récupérés le jour de la proclamation des résultats.

LEÇONS DE PHYSIQUE 2004

1. Utilisation des intégrales premières du mouvement en mécanique. Exemples et applications. (1^{er} CU)
2. Contact entre deux solides. Frottement de glissement. Exemples. (PC ou 1^{er} CU)
3. Caractère non galiléen du référentiel terrestre. Conséquences. (PCSI ou 1^{er} CU)
4. Mouvement d'un solide autour d'un axe fixe. Equilibrage statique et dynamique. Exemples. (1^{er} CU)
5. Approximation gyroscopique. Effets dans les domaines macroscopique et microscopique. (1^{er} CU)
6. Utilisation des lois de conservation dans le problème à deux corps. Applications. (MPSI, PCSI ou 1^{er} CU)
7. Principes de la cinématique relativiste. Durée propre. Longueur propre. (1^{er} CU)
8. Collisions en relativité restreinte : application à l'étude des particules élémentaires. (1^{er} CU)
9. Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique indépendant du temps. Applications. (1^{er} CU)
10. Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide ; validité. Théorèmes de Bernoulli ; limites et applications. (PC)
11. Notion de viscosité d'un fluide. Ecoulements visqueux, nombre de Reynolds. Exemples simples. (PC)
12. Equations de bilan en mécanique des fluides : exemples et applications. (PC)
13. Modèle du gaz parfait. (MPSI ou PCSI)
14. Energie interne et échanges énergétiques. (PCSI ou 1^{er} CU)
15. Exemples de phénomènes irréversibles ; bilans d'entropie. (MP ou 1^{er} CU)
16. Application des deux premiers principes de la thermodynamique au fonctionnement des machines thermiques. (MPSI, PCSI ou 1^{er} CU)
17. Evolution et condition d'équilibre des systèmes thermodynamiques : Potentiels thermodynamiques. (PC)
18. Etude thermodynamique d'un système constitué par un corps pur sous plusieurs phases. Exemples. (PC ou 1^{er} CU)
19. Notion d'état microscopique. Interprétation statistique de l'entropie. Exemples. (1^{er} CU)
20. Facteur de Boltzmann. Applications. (1^{er} CU)
21. Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir. Applications. (MP ou 1^{er} CU)
22. Etude d'un phénomène de transport : conduction thermique ou diffusion de particules. Applications. (1^{er} CU)
23. Conversion de puissance électromécanique. Exemples et applications. (PSI ou 1^{er} CU)
24. Induction électromagnétique. Aspects énergétiques. Applications. (PC ou 1^{er} CU)
25. Systèmes bouclés. Applications. (PSI ou 1^{er} CU)
26. Traitement d'un signal électrique : filtrage linéaire. Etude spectrale. Exemples et applications. (PSI ou 1^{er} CU)
27. Etude macroscopique des milieux diélectriques. (PC ou 1^{er} CU)
28. Utilisation des propriétés de symétrie dans l'étude des champs électromagnétiques. Exemples. (PC ou 1^{er} CU)

29. Exemples simples de phénomènes de propagation unidimensionnels. Ondes progressives, ondes stationnaires. Aspects énergétiques. (PC ou 1^{er} CU)
30. Propagation dans un milieu dispersif : vitesse de phase, vitesse de groupe ; paquets d'ondes planes et évolution. Exemples. (PC ou 1^{er} CU)
31. Dispersion et absorption d'une onde électromagnétique plane dans un milieu diélectrique. Modélisations microscopiques. (PC)
32. Réflexion et réfraction d'une onde électromagnétique monochromatique plane à la surface de séparation entre deux milieux diélectriques linéaires homogènes isotropes. (1^{er} CU)
33. Effet de peau. Réflexion des ondes électromagnétiques planes à la surface d'un milieu conducteur. (MP ou 1^{er} CU)
34. Propriétés et applications du rayonnement dipolaire électrique. (MP, PC)
35. Notion de rayon lumineux. Principe de Fermat. Conséquences. (1^{er} CU)
36. Application des lois de l'optique à l'étude d'un instrument d'optique au choix (lunette astronomique, télescope, appareil photographique, microscope...). (1^{er} CU)
37. Obtention d'interférences à deux ondes en optique. Notion de cohérence. (PC ou 1^{er} CU)
38. Interféromètres à division d'amplitude. Applications. (1^{er} CU)
39. Diffraction de Fraunhofer. Applications. (1^{er} CU)
40. Diffraction par des structures périodiques dans différents domaines spectraux. (1^{er} CU)
41. Le photon : la particule et ses interactions avec la matière. (1^{er} CU)
42. Absorption, émission spontanée ou induite du rayonnement : coefficients d'Einstein. Applications. (1^{er} CU)
43. Dualité onde-corpuscule : Relation de Louis de Broglie ; inégalités d'Heisenberg. Applications. (1^{er} CU)
44. Quantification dans les atomes : énergie et moment cinétique. (1^{er} CU)
45. Puits de potentiel : exemples et applications en physique quantique. (1^{er} CU)
46. Effet tunnel. Applications. (1^{er} CU)
47. Le noyau : stabilité, énergie. (1^{er} CU)
48. Comportement dynamique des systèmes couplés : oscillateurs à deux degrés de liberté en mécanique classique, systèmes à deux niveaux d'énergie en physique quantique. Analogies et différences. (1^{er} CU)
49. Cohésion de la molécule et des solides ; aspects énergétiques. (1^{er} CU)
50. Chaîne linéaire infinie d'oscillateurs harmoniques. Modes propres. Approximation des milieux continus. Aspects énergétiques. (PC ou 1^{er} CU)
51. Capacités thermiques : description , interprétations microscopiques. (1^{er} CU)
52. Paramagnétisme, ferromagnétisme (approximation du champ moyen). (PC ou 1^{er} CU)
53. Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques ; applications. (PC ou 1^{er} CU)
54. Mécanismes de la conduction électrique. Loi d'Ohm. Effet Hall. Applications. (1^{er} CU)

55. Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique. (1^{er} CU)

56. Exemples d'effets de non linéarité sur le comportement d'un oscillateur. (1^{er} CU)

LEÇONS DE CHIMIE 2004

1. Transformation chimique : équation de la réaction, avancement, bilan de matière. (1^{ère} scientifique)
2. Solutions électrolytiques ; mise en solution d'espèces ioniques ou moléculaires. (1^{ère} scientifique)
3. La conductimétrie : conductivité d'une solution ionique et application à la détermination de concentrations (dosage volumétrique exclu). (1^{ère} scientifique)
4. Réactions d'oxydoréduction en solution aqueuse (dosage exclu). (1^{ère} scientifique)
5. Dosages directs par réactions acido-basiques et d'oxydoréduction. (1^{ère} scientifique)
6. Structure des molécules organiques. Isoméries. Relations structures-propriétés physiques. (1^{ère} scientifique)
7. Les grandes familles de réactions en chimie organique sur l'exemple des alcools. (1^{ère} scientifique)
8. Etude de l'eau de Javel : obtention, propriétés, dosage. (Terminale Sciences Médico-Sociales)
9. Les acides α -aminés. Synthèse peptidique. (Terminale Sciences Médico-Sociales)
10. Principe et applications de la spectrophotométrie. (Terminale scientifique et Terminale scientifique – Spécialité)
11. Réactions acido-basiques en solution aqueuse ; constante d'acidité. (Terminale scientifique)
12. Titrages acido-basiques suivis par pHmétrie. (Terminale scientifique)
13. Indicateurs colorés acido-basiques : étude, choix pour un dosage acide-base. (Terminale scientifique)
14. Etude d'une cinétique de réaction (catalyse exclue). (Terminale scientifique)
15. Catalyse et catalyseurs ; applications. (Terminale scientifique)
16. Estérification et hydrolyse des esters. (Terminale scientifique)
17. Saponification des esters. Les savons : mode d'action et préparation à partir des triglycérides. (Terminale scientifique)
18. L'aspirine : synthèse, dosage, formulations. (Terminale scientifique)
19. Transformations chimiques spontanées : piles. (Terminale scientifique)
20. Transformations chimiques forcées : électrolyses et accumulateurs. (Terminale scientifique)
21. Les acides dans les boissons : aspects qualitatifs et quantitatifs. (On ne se limitera pas aux monoacides). (Terminale scientifique – Spécialité)
22. Contrôle de qualité du vin. (Terminale scientifique – Spécialité)
23. Contrôle de qualité d'eaux minérales. (Terminale scientifique – Spécialité)
24. Colorants : extraction, synthèse, identification. (Terminale scientifique – Spécialité)
25. Arômes et conservateurs : extraction, synthèse, dosage. (Terminale scientifique – Spécialité)
26. Classification périodique : étude expérimentale de l'évolution des propriétés physico-chimiques. (MPSI-PTSI)
27. Structure électronique et géométrie des molécules ; illustrations des relations structure-propriétés. (MPSI-PTSI)
28. Structure et propriétés des cristaux métalliques sur l'exemple du fer. (MPSI-PTSI)
29. Enthalpie de réaction : mesure et applications. (MPSI-PTSI)
30. L'effet tampon : mise en évidence, applications. (MPSI-PTSI)
31. Principe et illustrations des dosages par précipitation. (MPSI-PTSI)

32. Réactions de complexation : illustrations et applications. (MPSI-PTSI)
33. Principe et illustrations des dosages redox par potentiométrie. (MPSI-PTSI)
34. Notion de mécanisme réactionnel en cinétique homogène : aspects macroscopiques et microscopiques. (MPSI-PTSI)
35. Illustrations et applications des lois de déplacement des équilibres. (MP-PSI-PT)
36. Mélanges binaires : équilibres liquide-vapeur ; applications. (MP)
37. Lecture et utilisation des diagrammes d'Ellingham : application à la pyrométallurgie. (MP-PSI)
38. Application des diagrammes potentiel-pH à l'hydrométallurgie du zinc (construction de diagramme exclue) (PSI)
39. Corrosion humide du fer. Protection du fer par le zinc. (PSI)
40. Courbes intensité-potentiel, application à l'électrolyse. (PSI)
41. Exemples de mécanismes en chimie organique : substitutions nucléophiles (compétition SN/E exclue). (PSI)
42. Exemples de mécanismes en chimie organique : élimination, compétition SN/E. (PSI)

MONTAGES 2004

1. Dynamique newtonnienne.
2. Tension superficielle.
3. Dynamique des fluides.
4. Thermométrie.
5. Transitions de phase.
6. Ondes acoustiques.
7. Formation des images en optique.
8. Interférences lumineuses ; conditions d'obtention.
9. Diffraction des ondes lumineuses.
10. Spectrométrie optique.
11. Milieux optiquement actifs : biréfringence et polarisation rotatoire.
12. Production et analyse d'une lumière polarisée.
13. Emission et absorption dans le domaine optique.
14. Lasers.
15. Photorécepteurs.
16. Condensateurs.
17. Induction, auto-induction.
18. Milieux magnétiques.
19. Matériaux semi-conducteurs.
20. Production et mesure de champs magnétiques.
21. Conversion de puissance (électrique-électrique, électromécanique...).
22. Transducteurs électromécaniques.
23. Capteurs : caractérisation, utilisation.
24. Mesure des tensions et des courants.
25. Instrumentation numérique.
26. Amplification de signaux.
27. Filtrage.
28. Télécommunication : mise en forme, transport et détection de l'information.
29. Oscillateurs.
30. Mesure des fréquences temporelles (domaine de l'optique exclu).
31. Acquisition, analyse et traitement des signaux.
32. Asservissement d'une grandeur physique.
33. Phénomènes de transport.
34. Phénomènes non-linéaires.
35. Mesure de longueurs d'onde.
36. Ondes stationnaires.
37. Propagation des ondes. Impédances.
38. Résonance.
39. Couplage des oscillateurs.
40. Constantes physiques fondamentales ; unités.

13. Rapport sur la leçon de physique

Cette épreuve de l'agrégation consiste, pour le candidat, à exposer une leçon au jury. Pour la session 2005, la liste des sujets est jointe à ce rapport.

Au travers de son exposé, le candidat doit, d'une part, faire la preuve de ses connaissances scientifiques et de sa maîtrise des notions présentées et, d'autre part, montrer de la conviction et de la motivation. Il prouve ainsi au jury qu'il possède toutes les qualités d'un futur professeur agrégé : maîtrise du savoir et aptitude à transmettre son message avec rigueur et enthousiasme communicatif.

Cette épreuve est donc exigeante. Pour être réussie, elle doit être préparée avec soin durant l'année qui précède le passage du concours.

Déroulement de l'épreuve

Après avoir pris connaissance du sujet, le candidat prépare son exposé pendant quatre heures. A l'issue de cette préparation, il l'expose pendant 50 minutes. Ensuite, il est interrogé par le jury pendant 20 à 25 minutes environ.

Pendant la préparation, le candidat peut accéder librement à une bibliothèque richement pourvue, qui rassemble un grand nombre d'ouvrages scientifiques « classiques ». Il dispose également de documents variés, destinés à illustrer les leçons et, cette année pour la première fois, regroupés sur un cédérom, ce qui rend possible une présentation à l'aide d'un vidéo projecteur.

Enfin, le candidat bénéficie de l'aide d'un technicien de laboratoire qualifié pour la mise en place et la réalisation « d'expériences de cours » qu'il désire présenter durant son exposé. Naturellement, le technicien peut aider à la préparation de l'expérience à l'initiative du candidat mais est naturellement absent pendant la présentation de la leçon.

Remarques et conseils sur le déroulement de l'épreuve

Le jury de la leçon invite vivement les candidats à lire les remarques consignées ci-dessous. Elles nous paraissent de nature à améliorer largement la qualité des exposés sans pour autant vouloir standardiser ou définir la forme d'une « leçon type ». L'esprit d'initiative et l'originalité sont toujours des qualités très valorisées.

La leçon de physique à l'agrégation est essentiellement une épreuve orale menée au tableau. Le candidat doit donc veiller à la qualité de la présentation : diction claire, vocabulaire précis, écriture soignée et tableau bien organisé. Il lui faut avoir le désir d'être écouté et compris en étant efficace et convaincant. Le candidat doit également veiller à maîtriser les 50 minutes du temps imparti : la conception de la leçon exige le respect d'un certain équilibre entre les parties, un point fort ne devant pas être abordé en quelques minutes à la fin de l'épreuve.

Le candidat doit lire avec soin le thème de la leçon. En outre, il lui est vivement conseillé de prendre connaissance d'éventuelles remarques formulées sur la leçon dans les rapports du concours. La leçon doit être impérativement traitée au niveau indiqué : premier cycle universitaire ou classes

préparatoires aux grandes écoles. Les exposés conduits à un niveau insuffisant sont bien sûr sanctionnés.

Le candidat peut souhaiter écrire à l'avance le plan de la leçon sur un transparent rétroprojeté ou bien au tableau. Il doit alors veiller à indiquer explicitement au jury la progression adoptée, c'est-à-dire à préciser la correspondance entre son discours et le plan présenté au jury.

L'exposé doit être conduit avec vivacité, entrain et aisance. L'usage des notes doit être limité par exemple à la vérification d'un résultat obtenu ; la présentation de la leçon ne peut pas se limiter, comme c'est parfois le cas, à une simple recopie de notes tenues à la main. Le jury pénalise donc les candidats qui font un usage excessif de leurs notes.

Les calculs fastidieux doivent céder la place à la physique. Mais les grandeurs apparaissant dans les relations doivent être clairement définies. Il faut en outre préciser le contexte dans lequel ces relations sont construites, leur domaine de validité et faire ressortir les résultats physiques marquants.

L'utilisation de transparents judicieusement choisis ou réalisés et intelligemment intégrés à la présentation constitue évidemment une plus-value. Mais, en aucun cas, un exposé ne peut se réduire à la projection d'une suite de documents. En outre, le candidat doit veiller à ce que le jury dispose d'un temps suffisant pour prendre connaissance du contenu du transparent présenté.

Le candidat doit être très attentif au contenu d'un document numérique tiré du cédérom : est-il exactement adapté à la leçon ? Utilise-t-il les bonnes notations ? Permet-il de conduire effectivement telle ou telle discussion comme celle du pouvoir de résolution d'un réseau par exemple ? Il faut que le candidat veille à prendre pleinement connaissance du contenu du transparent qu'il compte utiliser et qu'il signale explicitement d'éventuels changements de notations par rapport à son exposé.

Le candidat est parfois conduit à réaliser ses propres transparents pour y consigner par exemple un passage « calculatoire » ou qui reprend une variante d'une situation physique déjà présentée. Le jury accepte naturellement qu'une partie très technique et fastidieuse soit ainsi présentée, surtout si le temps gagné est consacré à l'analyse physique du problème étudié. Mais il faut également que le candidat fasse la preuve de ses capacités à conduire avec dextérité et rigueur certaines parties « techniques » de son exposé ; il ne doit donc pas systématiquement recourir aux transparents dès le moindre calcul mais les réserver à des situations judicieusement choisies.

Les expériences dites de cours, destinées à illustrer un phénomène physique ou à mettre en évidence une loi comportementale, sont très appréciées et valorisées. Elles doivent être réalisées avec soin, conçues pour être vues par « toute la classe » et peuvent en définitive constituer un élément important de la leçon (en optique, par exemple). Le candidat doit alors veiller à décrire l'expérience de manière suffisamment explicite et à l'exploiter au mieux.

L'épreuve se termine par un dialogue au cours duquel les membres du jury interrogent le candidat. Les questions posées visent à faire préciser un ou plusieurs points et à évaluer dans quelle mesure la maîtrise du candidat. Cette phase de questions ne constitue pas le point essentiel de l'évaluation mais ne doit pas être prise à la légère : le candidat a tout intérêt à être un partenaire actif ayant le désir d'expliquer les concepts qu'il vient de présenter.

Les remarques précédentes ne doivent pas masquer le fait que, cette année encore, le jury de la leçon a eu le plaisir d'assister à d'excellentes leçons, attrayantes, scientifiquement irréprochables et conduites par des candidats brillants et convaincants.

Remarques sur le contenu scientifique des leçons

Leçons de mécanique du point et du solide (1 à 9) :

Leçon 2 : Le candidat doit être en mesure de faire la mise en équation des expériences qu'il présente. L'aspect cinématique du glissement est souvent abordé avec insuffisamment de soin. Des confusions persistent entre absence de glissement et absence de mouvement ainsi qu'entre absence de glissement et absence de frottement. L'étude d'un mouvement de roulement constitue une illustration intéressante.

Leçon 4 : Il est inutile de faire les démonstrations des calculs des éléments cinétiques du solide (matrice d'inertie). Le pendule pesant et, a fortiori, le pendule simple ne constituent pas les meilleures illustrations de la leçon. Enfin, si le jury a eu le plaisir de voir cette année une excellente illustration expérimentale de l'équilibrage statique et dynamique d'une machine tournante, celle-ci nous a semblé insuffisamment exploitée. Nous encourageons donc les candidats à mieux utiliser les expériences présentées.

Leçon 5 : Cette leçon peut et doit être illustrée par des expériences pertinentes. Il faut veiller à consacrer un temps suffisant à l'étude du domaine microscopique.

Leçon 6 : Très souvent, l'intérêt du référentiel barycentrique n'est pas bien dégagé. Rappelons qu'il faut être capable de prouver que moment cinétique et énergie cinétique se réduisent à ceux de la particule fictive dans ce référentiel.

Leçon 8 : Le référentiel du centre de masse est toujours introduit, mais l'intérêt qu'il présente n'est pas suffisamment souligné, en particulier dans la détermination du seuil énergétique d'une collision inélastique. Il faut savoir faire la différence entre « invariance » et « conservation ». Comme le titre l'indique, il faut chercher à illustrer la leçon par des exemples empruntés à la physique des particules. La diffusion de Rutherford ne constitue pas une bonne illustration de cette leçon par exemple.

Leçon 9 : Rappelons une nouvelle fois que cette leçon doit être traitée dans le cadre de la relativité restreinte. Dans les applications, le cas des champs magnétiques non uniformes peut être traité pour illustrer les phénomènes de dérive, d'effet miroir et de confinement magnétique par exemple.

Leçons de mécanique des fluides (10 à 12) :

Il faut parvenir à trouver un juste équilibre entre développements théoriques bien maîtrisés et illustrations expérimentales pertinentes. Ces leçons sont souvent l'occasion d'aborder des situations physiques variées, intéressantes mais parfois délicates à comprendre ou à interpréter. Il faut donc à la fois veiller à ne pas transformer ces leçons en un catalogue de faits expérimentaux mal décrits et mal compris et ne pas développer un formalisme excessif, même correctement manipulé, au détriment des applications physiques.

Leçons de thermodynamique (13 à 22) :

Leçon 13 : Le candidat doit maîtriser les ordres de grandeur des valeurs des grandeurs introduites : densité particulaire ; nombre de collisions par unité de temps, de surface ; vitesse quadratique moyenne ; longueur d'onde de de Broglie associée à une entité ... et savoir les utiliser de manière pertinente au cours de l'exposé. La notion de gaz parfait polyatomique doit être abordée.

Leçon 14 : Cette leçon est l'occasion d'effectuer des bilans énergétiques mettant en jeu des travaux et des transferts thermiques. Il ne faut donc pas passer trop de temps sur l'interprétation microscopique de la fonction énergie interne, de manière à en consacrer davantage aux applications.

Leçon 15 : Rappelons qu'il faut s'attacher à identifier les causes d'irréversibilité dans les transformations étudiées.

Leçon 16 : Le candidat peut parfaitement présenter des machines thermiques cycliques où le fluide caloporteur subit des changements d'états.

Leçon 18 : Il ne faut pas rester à un niveau trop descriptif : on attend l'utilisation de potentiels thermodynamiques adaptés pour prévoir l'évolution du système et sa possibilité d'équilibre.

Leçon 19 : Il faut définir avec soin les notions de microétats et de macroétats : pour cela, on peut s'appuyer par exemple sur un système physique discret. Ce peut être l'occasion d'introduire la notion de température thermodynamique.

Leçon 21 : Le candidat doit savoir faire la différence entre le champ de rayonnement d'équilibre et le corps noir. L'effet de serre ne constitue pas l'unique application à envisager pour ce sujet, et les valeurs numériques obtenues avec des modèles élémentaires de cet effet doivent être présentées avec beaucoup d'esprit critique.

Leçons d'électronique (23 à 26) :

Lors de la présentation des leçons d'électronique, le candidat doit veiller à faire preuve de beaucoup de rigueur dans l'algèbrisation des grandeurs utilisées : intensité, tension, force électromotrice induite, flux magnétique,

Leçon 23 : La conversion de puissance a donné lieu à des exposés purement descriptifs. Nous attendons « une attitude de physicien », c'est-à-dire une justification des modèles simples proposés pour les machines à courant continu, par exemple avec les conditions d'algèbrisation des grandeurs électriques et mécaniques introduites.

Leçon 26 : Il faut expliquer avec soin ce qu'est un filtre et la signification de ses caractéristique (ordre, type, ...).

Leçons sur les phénomènes de propagation et l'électromagnétisme (27 à 34) :

Leçon 32 : Ce sujet donne souvent lieu à des développements calculatoires excessifs. Le cas des ondes évanescentes apparaissant lors de la réflexion totale doit être connu et peut être évoqué. Il est nécessaire de définir les coefficients de réflexion et de transmission en énergie même si l'expression finale est admise.

Leçon 34 : Il faut s'attacher à dégager les hypothèses nécessaires à l'établissement de l'expression du champ électromagnétique créé par le dipôle dans la zone de rayonnement. La polarisation de l'onde rayonnée doit être décrite et l'étude des antennes peut constituer une application de cette leçon.

Leçons d'optique (35 à 40) :

Leçon 36 : Il ne s'agit pas d'une présentation purement descriptive et qualitative d'un instrument d'optique. Elle doit être l'occasion d'appliquer avec soin les lois de l'optique géométrique et physique à l'instrument choisi.

Leçon 38 : Si le jury souhaite naturellement une solide illustration expérimentale de la leçon, il ne faut pas la transformer en une succession d'observations purement qualitatives. Cette leçon doit être l'occasion pour le candidat de montrer qu'il sait conduire l'analyse théorique du phénomène expérimental montré.

Leçon 39 : Les conditions de l'approximation de Fraunhofer doivent être précisées et discutées.

Leçon 40 : Il faut veiller au bon équilibre de l'exposé : il est inutile de faire l'étude de la diffraction de Fraunhofer qui doit être supposée connue et il est souhaitable de consacrer plus de cinq minutes à l'étude de la diffraction des rayons X par les cristaux par exemple.

Leçons de physique de la matière (41 à 56) :

Leçon 41 : Des expériences doivent être décrites et modélisées en prenant soin de donner des ordres de grandeur. Les échanges de moment cinétique méritent d'être discutés.

Leçon 42 : Les coefficients d'Einstein ne doivent pas être évoqués dans le seul cas du rayonnement thermique.

Leçon 43 : Les inégalités d'Heisenberg méritent d'être reliées au caractère ondulatoire de la particule.

Leçon 44 : Le candidat ne doit ni se limiter à un exposé historique purement qualitatif, ni se lancer dans des calculs non maîtrisés. En particulier l'étude quantique de l'atome d'hydrogène n'est pas indispensable. Trop souvent l'interprétation des expériences présentées n'est pas comprise.

Leçon 45 : La résolution analytique du puits de potentiel doit être présentée de façon synthétique pour réserver une durée suffisante aux applications.

Leçon 47 : Ce nouveau sujet, introduit pour compléter les thèmes abordés à l'oral de l'agrégation, a donné lieu à des exposés souvent attractifs mais un peu trop qualitatifs et descriptifs. Les candidats

doivent évidemment avoir des connaissances sur les techniques expérimentales qui permettent d'obtenir des informations sur la taille et la structure interne du noyau.

Leçon 55 : Une illustration souvent choisie est l'étude d'un dispositif mécanique comportant une masse suspendue à un ressort vertical excité à une extrémité. Cette expérience est bien choisie mais la mise en équation pose régulièrement des difficultés.

14. Rapport sur la leçon de chimie

L'épreuve de chimie à l'oral de l'agrégation de sciences physiques (option physique) consiste en une leçon de 50 minutes, suivie de questions posées par le jury pendant une quinzaine de minutes.

Les titres des sujets proposés lors du concours 2004 sont extraits des programmes de chimie des classes de première scientifique, terminale scientifique (enseignement obligatoire ou de spécialité), terminale S.M.S et des programmes des classes préparatoires MPSI, PTSI, MP, PSI et PT.

Les prestations dans cette épreuve sont de qualité variable (voir les documents 4 : distributions des notes).

Afin d'augmenter leurs chances de réussite, les futurs candidats sont invités à consulter, outre le présent rapport, ceux des sessions précédentes.

Remarques générales :

Présentation.

L'exposé dont la qualité a une part prépondérante dans la note attribuée constitue le point central de l'épreuve. Le candidat doit montrer qu'il a réfléchi aux objectifs correspondant à l'énoncé exact du sujet en dégagant clairement le message qu'il veut transmettre à son auditoire. Celui-ci doit être considéré comme une classe qu'il faut intéresser et non comme un aéropage de professeurs auquel le candidat explique la démarche qu'il suivrait devant une classe réelle. La leçon doit être conduite à un rythme soutenu qui doit permettre de traiter complètement tous les points attendus mais aussi la prise de notes sans donner une impression de confusion. La précision et la rigueur du langage scientifique ainsi que le bon usage du français sont indispensables. Dynamisme et bonne élocution sont des qualités très recherchées dans un concours de recrutement de professeurs. Le candidat doit donc s'adresser à l'auditoire et ne pas lire constamment ses notes. Il doit pouvoir s'en affranchir lorsqu'il s'agit d'écrire une définition ou une équation de réaction chimique, en particulier pour l'ajustement des nombres stœchiométriques, sauf, éventuellement, pour vérification.

Le jury déconseille au candidat de ne s'inspirer que d'un seul ouvrage pour le plan, les exemples et l'illustration expérimentale lorsqu'il s'agit de construire la leçon. Cette attitude traduit en effet un manque de réflexion personnelle et de recul par rapport au sujet traité. La présentation d'une leçon ne saurait être unique, ni dans son plan, ni dans le choix des expériences.

L'introduction, certes brève, ne doit pas consister en la simple lecture d'un plan écrit au tableau. Le candidat doit y annoncer les objectifs pédagogiques qu'il souhaite atteindre durant son exposé. Il doit également montrer comment celui-ci s'insère de façon cohérente dans la progression du programme, en précisant les notions déjà acquises par l'auditoire. Il est déconseillé de consacrer trop de temps à des parties "généralités" ou "rappels", alors que des exemples concrets peuvent être donnés.

Lorsque le plan a été entièrement écrit au tableau, il revient au candidat d'indiquer régulièrement la partie qu'il est sur le point de traiter (il est maladroit d'indiquer des parties qui ne seront pas traitées faute de temps).

La présentation au tableau peut être complétée par la projection de documents qui participe à la dynamique et à l'efficacité de l'exposé. Leur contenu doit être parfaitement compris et maîtrisé, notamment dans les cas où ces derniers sont des reproductions d'ouvrages. Le candidat doit également faire attention lorsqu'il présente un schéma de montage un peu différent de celui utilisé. En aucun cas, un exposé ne saurait se limiter à une succession de transparents, qui tente de masquer une absence de connaissances sur le sujet traité.

Une bonne gestion du temps pendant un exposé est une qualité indispensable pour un futur professeur. Le jury avertit systématiquement le candidat au bout de 45 minutes afin qu'il puisse bâtir sa conclusion et s'assure qu'il n'a rien oublié d'important. Cet avertissement n'est en rien une invitation à traiter dans la précipitation et la confusion une partie non abordée ou à commencer des expériences qui ne pourront être ni menées à bien ni exploitées. Aussi le jury est-il étonné de constater que beaucoup de candidats sont surpris à l'annonce des 5 dernières minutes alors qu'ils n'ont pas fini de traiter (ou n'ont pas abordé) une (parfois des) partie(s) essentielle(s) du sujet. A l'inverse, une présentation écourtée et incomplète révèle souvent un manque de maîtrise du sujet par le candidat. Ces deux cas sont toujours sanctionnés.

Présentation d'expériences

Les expériences sont le support indispensable de l'argumentation de l'exposé. Les sujets sont généralement choisis de façon à donner lieu à l'illustration expérimentale la plus riche possible. Une démarche expérimentale pauvre ou négligée est donc fortement pénalisée. Les sujets correspondant au programme des classes préparatoires doivent également être illustrés expérimentalement.

Les expériences doivent être judicieusement choisies mais surtout exploitées de manière à introduire ou illustrer une notion étudiée dans la leçon. Le jury attend, pour chaque expérience réalisée, la présentation d'un schéma indiquant les conditions opératoires (nature des réactifs, concentration des solutions, principales observations ...), l'écriture correcte des équations des réactions chimiques ainsi que la justification du protocole mis en œuvre. Lorsqu'elle est possible, la caractérisation expérimentale ou l'illustration des propriétés des produits d'une transformation chimique est attendue. Dans les leçons comportant des titrages, il est préférable de titrer une espèce contenue par exemple dans un produit de la vie courante plutôt qu'une solution de laboratoire. La validité et la précision des résultats expérimentaux doivent être discutées et comparées, dans le cas des dosages notamment, aux résultats attendus. A ce propos, des conditions expérimentales qui conduisent à un volume équivalent inférieur à 5 mL, avec utilisation d'une burette de 25 mL, ne sont pas judicieuses.

Le récit d'une expérience effectuée durant la préparation ne dispense pas de la présentation d'une partie judicieusement choisie de celle-ci. Cela permet au candidat de montrer son habileté expérimentale lors de l'utilisation de techniques classiques (pipetage, filtrations, réalisation de chromatographie, mesure de point de fusion, ...). Il lui faut donc avoir réfléchi pendant les 4 heures de préparation aux manipulations réalisées devant le jury et aux résultats expérimentaux obtenus lors de la préparation, présentés et exploités durant l'exposé. Les expériences en tubes à essais (tubes qu'il ne faut d'ailleurs pas oublier d'agiter !) ne sont pas forcément les plus faciles : une réflexion préalable sur les concentrations à choisir est indispensable pour éviter des surprises pendant l'exposé qui sont déstabilisantes pour le candidat. Pour les dosages colorimétriques, il est inutile de réaliser devant le jury un dosage rapide censé avoir été fait lors de la préparation. En revanche, ce dosage réalisé pendant la leçon doit être mené avec soin pour déterminer le plus précisément possible le volume équivalent. S'il s'agit du suivi de la mesure d'une grandeur physique, le jury attend que le candidat

retrouve quelques points à reporter sur la courbe réalisée en préparation. Un tracé complet est la plupart du temps inutile, long et ennuyeux. Dans ces conditions, il n'est pas judicieux de chercher à retrouver les coordonnées de points au voisinage de l'équivalence.

L'utilisation d'un logiciel tableur généraliste n'est pas toujours la solution la plus facile pour l'exploitation des données expérimentales. Il existe des outils dédiés aux sciences physiques plus adaptés (régression linéaire ou affine, tracé de la dérivée, utilisation de la méthode des tangentes ...)

D'autre part, le candidat ne doit ni se décourager, ni se laisser déconcerter par une réaction ou une expérience non concluante. Il doit prêter une attention toute particulière aux conditions de sécurité dans lesquelles il travaille. Les règles de sécurité doivent être appliquées avec discernement et sans excès afin de montrer que la gestion des risques a été bien comprise.

Pendant la présentation, le jury peut se déplacer afin de contrôler les expériences ou de consulter la bibliographie. Ceci ne doit en aucun cas perturber le candidat qui doit poursuivre son exposé.

Questions posées par les membres du jury

A la fin de son exposé, le candidat doit rester concentré et attentif pour pouvoir répondre aux questions du jury qui sont pour la plupart inspirées par la leçon qu'il vient d'écouter.

Ces questions sont destinées à faire préciser certains points jugés confus ou incomplets, à corriger des lapsus ou erreurs lus ou entendus. Il peut être également demandé au candidat d'approfondir certaines notions, à un niveau dépassant celui précisé dans le titre du sujet. De nombreuses questions concernent les conditions opératoires des expériences réalisées, afin de vérifier si le candidat les a bien maîtrisées.

Conclusion

La réussite à cette épreuve nécessite donc une réflexion approfondie sur son contenu, dépassant la simple reproduction d'extraits de manuels mis à disposition pendant les quatre heures de préparation, ainsi qu'une bonne maîtrise dans la présentation.

Une excellente leçon est forcément exposée avec dynamisme et conviction, conduite avec logique, clarté et rigueur, équilibrée (tous les points essentiels ont été traités), illustrée expérimentalement avec des exemples pertinents et soutenue par des connaissances solides en chimie.

Remarques particulières sur quelques leçons :

Ces remarques d'ordre général sont complétées par quelques indications particulières destinées à nourrir la réflexion des futurs candidats à propos de certains titres (les numéros sont ceux du concours 2004 et peuvent être modifiés à l'avenir) :

Leçon n°2 : les effets de solvant de l'eau (ionisant, dispersant, solvatant) sont souvent mal compris, donc mal décrits.

Leçon n°3 : l'étude des facteurs d'influence sur la conductance (ou la conductivité) doit être menée de façon quantitative (au moins pour certains d'entre eux). La réalisation expérimentale de la

détermination d'une concentration doit être effectuée avec un appareil dédié à la mesure d'une conductance ou d'une conductivité.

Leçon n°5 : la justification de l'allure de la courbe de conductimétrie est attendue.

Leçon n°8 : la concentration d'une eau de Javel s'exprime en pourcentage massique de dichlore actif et non plus par son degré chlorométrique comme l'indiquent les manuels scolaires.

Leçon n°9 : il convient d'expliquer un minimum la synthèse peptidique.

Leçon n°11 : la détermination expérimentale d'une constante d'acidité doit être effectuée. Par ailleurs, une lecture attentive du programme est tout particulièrement nécessaire pour traiter cette leçon.

Leçon n°13 : les critères de choix de l'indicateur coloré doivent être clairement donnés et justifiés. La zone sensible de l'indicateur coloré est rarement exactement l'intervalle $[pK_a - 1 ; pK_a + 1]$.

Leçon n°18 : la préparation de l'aspirine est à effectuer durant la leçon, la caractérisation pouvant être faite sur le produit synthétisé en préparation. Un calcul de rendement est souhaitable. La formulation n'est pas à négliger lors de l'exposé et doit être présentée sous un angle chimique.

Leçon n°19 : l'introduction du quotient réactionnel et sa comparaison avec la constante d'équilibre est hors sujet.

Leçons n°21 à 25 : les expériences menées doivent primer sur l'énoncé de la législation sur les taux légaux de sucres, d'acides, ...

Leçon n°21 : l'aspect qualitatif de l'acidité des boissons est à traiter.

Leçon n°23 : les notions utilisées, vues dans le programme d'enseignement obligatoire, sont davantage à réinvestir qu'à définir.

Leçon n°26 : cette leçon doit revêtir un caractère essentiellement expérimental.

Leçon n°27 : sans être le cœur du sujet, les règles de base de la méthode V.S.E.P.R doivent être clairement présentées et illustrées par quelques exemples simples. Les relations structure-propriétés physico-chimiques doivent être illustrées par plusieurs exemples expérimentaux.

Leçon n°30 : il ne faut pas encombrer la présentation par des calculs systématiques de pouvoir tampon, ceux-ci ne devant d'ailleurs pas se limiter à l'utilisation d'une courbe de dosage acide faible / base forte. La mesure du pH et de sa variation pour un grand nombre de solutions est toujours fastidieuse. Les tampons biologiques font partie du sujet.

Leçon n°31 : une présentation qualitative ne saurait suffire. Il faut utiliser précisément les produits de solubilité.

Leçon n°32 : les diagrammes de prédominance des complexes sont à évoquer. Les définitions afférentes aux complexes (ligands, ...) et la nomenclature ne doivent pas constituer le cœur de la leçon.

Leçon n°33 : la leçon ne consiste pas uniquement à donner les différentes expressions de $E=f(V/V_{eq})$.

Leçon n°34 : cette leçon se prête aussi à des illustrations expérimentales.

Leçon n°35 : calculs et démonstrations ne doivent pas prédominer. Il faut être vigilant quant à la nature du paramètre qui varie dans les expériences présentées.

Leçon n°38 : les différentes étapes de l'hydrométallurgie du zinc doivent être justifiées à partir de l'étude de diagrammes potentiel-pH déjà tracés.

Commentaires sur les leçons de la prochaine session :

Suite aux changements de programmes des classes préparatoires scientifiques en deuxième année, certaines leçons disparaissent et d'autres changent légèrement d'intitulé (voir la liste proposée dans les documents n°16).

15 Rapport sur le montage de physique

L'épreuve de montage consiste en une présentation pendant 40 minutes d'expériences préparées pendant 4 heures par le candidat avec l'assistance de techniciens et de professeurs préparateurs. Le jury pose ensuite des questions destinées à approfondir ou clarifier certains points abordés ou escamotés lors des différentes expériences auxquelles il vient d'assister.

L'épreuve du montage nécessite, pour être réussie, une bonne pratique de la manipulation de nombreux appareils, et exige une préparation importante pour le concours.

Cette année, l'interdiction des photocopies le jour de l'épreuve, annoncée dans le rapport 2003, prend effet pour la première fois.

L'ensemble des membres du jury de montage constate avec beaucoup de satisfaction les effets très bénéfiques de cette décision : choix de manipulations plus varié, plus original et personnalisé pour de nombreux candidats, réflexion souvent approfondie sur les expériences présentées, à l'opposé de la tendance « reproduction presse-boutons » observée les années précédentes. Cette évolution est également constatée par l'équipe de techniciens et professeurs préparateurs encadrant la préparation de l'épreuve.

Gageons que cette amélioration sera pérenne et permettra aux futurs professeurs de mesurer ainsi l'importance du caractère expérimental de la discipline qu'ils souhaitent enseigner.

Preuve de cette évolution positive, la moyenne générale de cette épreuve est cette année en hausse sensible par rapport aux années précédentes.

Cette année, le jury a eu le plaisir de mettre une dizaine de fois la note maximale à des candidats. Il a aussi malheureusement trop souvent utilisé la note 01 quasi-minimale, sanctionnant ainsi des candidats qui, même sans avoir pu préparer dans de bonnes conditions, ne parviennent pas à exploiter leur temps de préparation pour présenter ne serait-ce qu'une manipulation à peu près réalisée et comprise, ce qui n'est pas excusable dans un concours de ce niveau.

Le jury utilise toute l'échelle de notes à sa disposition et l'écart-type très important associé à cette épreuve signifie que celle-ci classe les candidats de façon très efficace.

Remarques générales sur le déroulement de l'épreuve

Devant le jury, le candidat présente des expériences et doit réaliser des mesures dont les résultats sont confrontés à des modèles théoriques. Les valeurs obtenues peuvent également être comparées à des données tabulées.

Le contenu théorique de la présentation est donc réduit à sa plus simple expression et les formules utilisées n'ont pas besoin d'être justifiées dans le détail. Cela dit, on attend un minimum d'esprit scientifique, les justifications théoriques, brièvement résumées, ne peuvent pas se réduire à un entassement de phrases contradictoires, sorte de catalogue de tout et du contraire, au choix, sans doute pertinent, du jury.

Celui-ci n'hésite évidemment pas à se déplacer si nécessaire pour voir de plus près les détails des expériences qui lui sont présentées. Mais cela ne dispense en aucun cas les candidats de présenter de belles images réalisées dans de bonnes conditions de projection, ni d'utiliser les moyens modernes de présentation (flexcam pour les expériences, vidéo-projection pour les logiciels d'acquisition ou d'exploitation) qui sont à leur disposition. Depuis cette année, un vidéo-projecteur est systématiquement présent dans chaque salle de présentation et son utilisation, au demeurant fort simple, doit être connue des candidats, futurs professeurs.

Les expériences présentées sur le thème choisi par le candidat doivent, si cela est possible et si le libellé exact du sujet ne l'interdit pas, aborder différents domaines de la physique.

Même si des expériences qualitatives, si possible spectaculaires, sont dans une certaine mesure bien venues, les mesures doivent être quantitatives et, dans la majorité des cas, pour avoir un sens, être accompagnées d'une estimation raisonnable des incertitudes associées. Cette discussion doit, au moins une fois, être complètement aboutie. Les candidats se reporteront avec profit aux rapports des années précédentes dans lesquels ces points sont largement détaillés.

Rappelons que nombre de logiciels d'exploitation prennent en compte les barres d'erreur et permettent l'estimation de l'incertitude sur la régression linéaire effectuée, celle-ci étant évidemment plus faible que celle portant sur un point isolé.

Signalons également l'existence de Handbooks qui n'apparaissent que trop peu sur les tables des candidats. Ceux-ci préfèrent trop souvent se référer à des valeurs beaucoup moins précises données dans les ouvrages d'enseignement, dans des conditions souvent non précisées. L'exemple le plus classique est celui de la vitesse du son dans l'air, trop souvent annoncée à 340 ms^{-1} . Une lecture, même rapide, d'un Handbook permet de voir rapidement l'influence de paramètres comme l'humidité de l'air et surtout la température, la valeur de celle-ci étant par ailleurs aisément accessible au candidat.

Pour finir, précisons que c'est au candidat de choisir le niveau auquel il souhaite se situer. Un montage trop ambitieux au départ, s'il est mal géré, peut conduire à des catastrophes, alors qu'une approche plus modeste, mais mieux maîtrisée, aurait pu aboutir à une prestation reflétant davantage les aptitudes et qualités réelles de son auteur.

Remarques portant sur des montages particuliers

Les numéros indiqués sont ceux de la liste de montages 2004.

Montage 1 : Les tables à coussin d'air ne sont pas les seuls outils à la disposition des candidats pour ce montage. L'utilisation de tables à digitaliser couplées à des logiciels d'acquisition et de dépouillement des données permet une présentation plus riche, ainsi qu'un gain de temps permettant de présenter plus d'expériences abordant des phénomènes plus variés.

Montage 3 : Il s'agit bien ici de dynamique des fluides et non pas seulement d'expériences sur les fluides : statique et diffusion de particules sont donc exclues. Par ailleurs l'utilisation d'un appareil dédié à l'étude de la loi de Poiseuille doit être menée avec discernement avec le contrôle précis des conditions de validité (voir à ce sujet la composition de physique de cette année).

Montage 7 : Il s'agit ici de savoir former des images et pas seulement d'en étudier tous les défauts !

Montages 9 et 10 : Dans ces montages, les mesures de largeurs de fentes mal calibrées, ou dont la largeur est donnée de manière indicative (sans indication de précision), ne peuvent pas constituer le thème central de l'étude. Il serait illusoire d'espérer déterminer avec une précision satisfaisante la longueur d'onde d'un laser He-Ne à partir de l'analyse de la figure de diffraction par une fente, même calibrée. L'utilisation de montages avec réseaux doit être mieux maîtrisée, en évitant de confondre angles et déviations par rapport à l'ordre zéro. Les conditions de Fraunhofer, plus larges que la simple « diffraction à l'infini », gagneraient à être connues. Dans les expériences de filtrage spatial de type passe-haut, l'utilisation d'objets de phase serait certainement plus pertinente que celle d'une plume.

Montage 21 : Ce montage, relativement peu choisi cette année, a donné lieu à des prestations assez pauvres, alors que des matériels d'électrotechnique adéquats sont disponibles. La conversion électrique-électrique semble se limiter, sauf exception, au transformateur et, pire, la conversion électrique-mécanique à de vagues principes. Il y a pourtant dans la collection ce qu'il faut pour des mesures de rendements électromécaniques : sur ce point, il est préférable de bien expliquer les fonctions de chacun des éléments de la chaîne de conversion (ce qui suppose qu'elles sont bien comprises), plutôt que de se contenter d'estimer un rendement global dont l'interprétation ne débouche sur rien de vérifiable. Notons, en remarque technique, qu'il est souhaitable que tous les bancs de manipulations d'électrotechnique soient complets, c'est à dire avec leurs alimentations, hacheurs et systèmes de mesures spécifiques complets ; globalement, sur l'ensemble de la collection, il est vrai qu'il est toujours possible de se débrouiller.

Montage 29 : Les oscillations libres et les oscillations harmoniques forcées ne sont pas hors sujet. Mais elles ne peuvent être le seul thème abordé durant ce montage, oscillateurs de relaxation et quasi-sinusoïdaux étant ici à l'évidence le thème central.

Montage 31 : Les candidats ont très souvent recours à la « périodisation » du signal préalablement à l'analyse de Fourier par certains logiciels. Cette démarche est pour le moins étrange : périodiser suppose connue la période du signal et on peut dès lors s'interroger sur la pertinence de l'analyse de Fourier subséquente. Les candidats perdent du coup de vue le rôle de la durée totale d'enregistrement sur la résolution spectrale associée à la transformée de Fourier.

Montage 32 : Il n'est pas nécessaire de se lancer dans des prestations trop techniques ou trop ambitieuses. Ce montage peut donner lieu à une bonne liaison entre mesure et grandeur physique, pour peu que l'on ne perde pas de vue la mise en valeur de la grandeur physique elle-même. Cela dit, les méthodes de corrections « PID » peuvent être montrées simplement sur des exemples judicieusement calibrés.

Montages 38 et 39 : L'étude de la phase est trop souvent absente de ces montages alors qu'elle fournit des relations complémentaires non redondantes à celle de l'amplitude

LEÇONS DE PHYSIQUE 2005

1. Utilisation des intégrales premières du mouvement en mécanique. Exemples et applications. (1^{er} CU)
2. Contact entre deux solides. Frottement de glissement. Applications au glissement et au roulement. (PC ou 1^{er} CU)
3. Caractère non galiléen du référentiel terrestre. Conséquences. (PCSI ou 1^{er} CU)
4. Mouvement d'un solide autour d'un axe fixe. Equilibrage statique et dynamique. Exemples. (1^{er} CU)
5. Approximation gyroscopique. Effets dans les domaines macroscopique et microscopique. (1^{er} CU)
6. Utilisation des lois de conservation dans le problème à deux corps. Applications. (MPSI, PCSI ou 1^{er} CU)
7. Principes de la cinématique relativiste. Durée propre. Longueur propre. (1^{er} CU)
8. Collisions en relativité restreinte : application à l'étude des particules élémentaires. (1^{er} CU)
9. Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique indépendant du temps. Applications. (1^{er} CU)
10. Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide ; validité. Relation de Bernoulli ; limites et applications. (PC)
11. Notion de viscosité d'un fluide. Ecoulements visqueux, nombre de Reynolds. Exemples simples. (PC)
12. Equations de bilan en mécanique des fluides : exemples et applications. (PC)
13. Modèle du gaz parfait. (MPSI ou PCSI)
14. Echanges énergétiques ; bilans d'énergie et d'enthalpie. (PCSI ou 1^{er} CU)
15. Exemples de phénomènes irréversibles ; bilans d'entropie. (1^{er} CU)
16. Application des deux premiers principes de la thermodynamique au fonctionnement des machines thermiques. (MPSI, PCSI ou 1^{er} CU)
17. Evolution et condition d'équilibre d'un système thermodynamique fermé : potentiels thermodynamiques. (PC)
18. Etude thermodynamique d'un système constitué par un corps pur sous plusieurs phases. Exemples. (PCSI, PC ou 1^{er} CU)
19. Notion d'état microscopique. Interprétation statistique de l'entropie. Exemples. (1^{er} CU)
20. Facteur de Boltzmann. Applications. (1^{er} CU)
21. Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir. Applications. (MP ou 1^{er} CU)
22. Etude d'un phénomène de transport : conduction thermique ou diffusion de particules. Applications. (1^{er} CU)
23. Conversion de puissance électromécanique. Exemples et applications. (PSI ou 1^{er} CU)
24. Induction électromagnétique. Aspects énergétiques. Applications. (PC ou 1^{er} CU)
25. Systèmes bouclés. Applications. (PSI ou 1^{er} CU)
26. Traitement d'un signal électrique : filtrage linéaire. Etude spectrale. Exemples et applications. (PSI ou 1^{er} CU)
27. Utilisation des propriétés de symétrie dans l'étude des champs électromagnétiques. Exemples. (PC ou 1^{er} CU)

28. Exemples simples de phénomènes de propagation unidimensionnels. Ondes progressives, ondes stationnaires. Aspects énergétiques. (PCSI, PC ou 1^{er} CU)
29. Ondes sonores dans les fluides (PC).
30. Propagation dans un milieu dispersif : vitesse de phase, vitesse de groupe ; paquets d'ondes planes et évolution. Exemples. (PC ou 1^{er} CU)
31. Dispersion et absorption d'une onde électromagnétique plane dans un milieu diélectrique. Modélisations microscopiques. (PC)
32. Réflexion et réfraction d'une onde électromagnétique monochromatique plane à la surface de séparation entre deux milieux diélectriques linéaires homogènes isotropes. (1^{er} CU)
33. Réflexion des ondes électromagnétiques planes à la surface d'un milieu conducteur. Effet de peau. (1^{er} CU)
34. Propriétés et applications du rayonnement dipolaire électrique. (MP, PC)
35. Notion de rayon lumineux. Principe de Fermat. Conséquences. (1^{er} CU)
36. Application des lois de l'optique à l'étude d'un instrument d'optique au choix (lunette astronomique, télescope, appareil photographique, microscope...). (1^{er} CU)
37. Obtention d'interférences à deux ondes en optique. Notion de cohérence. (PC ou 1^{er} CU)
38. Interféromètres à division d'amplitude. Applications. (1^{er} CU)
39. Diffraction de Fraunhofer. Applications. (1^{er} CU)
40. Diffraction par des structures périodiques dans différents domaines spectraux. (1^{er} CU)
41. Le photon : la particule et ses interactions avec la matière. (1^{er} CU)
42. Absorption, émission spontanée ou induite du rayonnement : coefficients d'Einstein. Applications. (1^{er} CU)
43. Dualité onde-corpuscule : Relation de Louis de Broglie ; inégalités d'Heisenberg. Applications. (1^{er} CU)
44. Puits de potentiel : exemples et applications en physique quantique. (1^{er} CU)
45. Confinement de l'électron et quantification de l'énergie dans les atomes. (1^{er} CU)
46. Effet tunnel. Applications. (1^{er} CU)
47. Le noyau : stabilité, énergie. (1^{er} CU)
48. Comportement dynamique des systèmes couplés : oscillateurs à deux degrés de liberté en mécanique classique, systèmes à deux niveaux d'énergie en physique quantique. Analogies et différences. (1^{er} CU)
49. Cohésion de la molécule et des solides ; aspects énergétiques. (1^{er} CU)
50. Chaîne linéaire infinie d'oscillateurs harmoniques. Modes propres. Approximation des milieux continus. Aspects énergétiques. (1^{er} CU)
51. Capacités thermiques : description , interprétations microscopiques. (1^{er} CU)
52. Paramagnétisme, ferromagnétisme (approximation du champ moyen). (1^{er} CU)
53. Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques ; applications. (PSI ou 1^{er} CU)
54. Mécanismes de la conduction électrique. Loi d'Ohm. Effet Hall. Applications. (1^{er} CU)
55. Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique. (1^{er} CU)
56. Exemples d'effets de non linéarité sur le comportement d'un oscillateur. (1^{er} CU)

LEÇONS DE CHIMIE 2005

1. Transformation chimique : équation de la réaction, avancement, bilan de matière. (1^{ère} scientifique)
2. Solutions électrolytiques ; mise en solution d'espèces ioniques ou moléculaires. (1^{ère} scientifique)
3. La conductimétrie : conductivité d'une solution ionique et application à la détermination de concentrations (dosage volumétrique exclu). (1^{ère} scientifique)
4. Dosages directs par réactions acido-basiques et d'oxydoréduction. (1^{ère} scientifique)
5. Le squelette carboné des hydrocarbures : relations structures - propriétés physiques, modification du squelette carboné. (nomenclature exclue). (1^{ère} scientifique)
6. Les grandes familles de réactions en chimie organique illustrées sur l'exemple des alcools. (1^{ère} scientifique)
7. Etude de l'eau de Javel : obtention, propriétés, dosage. (Terminale Sciences Médico-Sociales)
8. Les acides α -aminés. Synthèse peptidique. (Terminale Sciences Médico-Sociales)
9. Principe et applications de la spectrophotométrie. (Terminale scientifique et Terminale scientifique – Spécialité)
10. Réactions acido-basiques en solution aqueuse ; constante d'acidité. (Terminale scientifique)
11. Titrages acido-basiques suivis par pHmétrie. (Terminale scientifique)
12. Indicateurs colorés acido-basiques : étude, choix pour un dosage acide-base. (Terminale scientifique)
13. Etude d'une cinétique de réaction (catalyse exclue). (Terminale scientifique)
14. Catalyse et catalyseurs ; applications. (Terminale scientifique)
15. Estérification et hydrolyse des esters. (Terminale scientifique)
16. Saponification des esters. Les savons : mode d'action et préparation à partir des triglycérides. (Terminale scientifique)
17. L'aspirine : synthèse, dosage, formulations. (Terminale scientifique et Terminale scientifique – Spécialité)
18. Piles : mise en jeu de transformations chimiques spontanées. (Terminale scientifique)
19. Électrolyses et accumulateurs : mise en jeu de transformations chimiques forcées. (Terminale scientifique)
20. Étude qualitative et quantitative des espèces acido-basiques dans les liquides alimentaires. (Terminale scientifique – Spécialité)
21. Contrôle de qualité de l'eau. (Terminale scientifique – Spécialité)
22. Contrôle de qualité du vin. (Terminale scientifique – Spécialité)
23. Colorants : extraction, synthèse, identification. (Terminale scientifique – Spécialité)
24. Arômes et conservateurs : extraction, synthèse, dosage. (Terminale scientifique – Spécialité)

25. Dosages indirects. (Terminale scientifique et Terminale scientifique – Spécialité)
26. Évolution des propriétés physico-chimiques dans la classification périodique ; étude expérimentale. (MPSI-PTSI)
27. Structure électronique et géométrie des molécules ; illustrations des relations structure - propriétés. (MPSI-PTSI)
28. Structure et propriétés des cristaux métalliques illustrées sur l'exemple du fer. (MPSI-PTSI)
29. Enthalpie de réaction : mesure et applications. (MPSI-PTSI)
30. Illustrations et applications des réactions de complexation. (MPSI-PTSI)
31. Principe et illustrations des dosages par précipitation. (MPSI-PTSI)
32. Principe et illustrations des dosages redox par potentiométrie. (MPSI-PTSI)
33. Cinétique homogène : étude expérimentale et mécanismes réactionnels. (MPSI-PTSI)
34. Illustrations et applications des lois de déplacement des équilibres. (MP-PSI-PT)
35. Mélanges binaires : équilibres liquide-vapeur ; applications (liquides non miscibles exclus). (MP)
36. Lecture et utilisation des diagrammes d'Ellingham : application à la pyrométallurgie. (MP-PSI)
37. Application des diagrammes potentiel-pH à l'hydrométallurgie du zinc (construction de diagramme exclue). (PSI)
38. Applications des courbes intensité-potentiel. (PSI)
39. Corrosion humide du fer. Protection du fer par le zinc. (PSI)
40. Exemples de mécanismes en chimie organique : additions électrophiles sur la double liaison carbone - carbone. (PSI)

MONTAGES 2005

1. Dynamique newtonnienne.
2. Tension superficielle.
3. Dynamique des fluides.
4. Thermométrie.
5. Transitions de phase.
6. Phénomènes de transport.
7. Phénomènes dissipatifs.
8. Formation des images en optique.
9. Interférences lumineuses ; conditions d'obtention.
10. Diffraction des ondes lumineuses.
11. Spectrométrie optique.
12. Milieux optiquement actifs : biréfringence et pouvoir rotatoire.
13. Production et analyse d'une lumière polarisée.
14. Emission et absorption dans le domaine optique.
15. Lasers.
16. Photorécepteurs.
17. Production et mesure de champs magnétiques.
18. Milieux magnétiques.
19. Métaux .
20. Matériaux semi-conducteurs.
21. Condensateurs ; effets capacitifs.
22. Induction, auto-induction.
23. Conversion de puissance électrique-électrique.
24. Conversion de puissance électro-mécanique.
25. Capteurs et transducteurs.
26. Mesure des tensions et des courants.
27. Amplification de signaux.
28. Télécommunication : mise en forme, transport et détection de l'information.
29. Acquisition, analyse et traitement des signaux.
30. Mesure des fréquences temporelles (domaine de l'optique exclu).
31. Mesure de longueurs.
32. Asservissement d'une grandeur physique ; applications.
33. Instabilités et phénomènes non-linéaires.
34. Ondes et impédances.
35. Ondes acoustiques.
36. Résonance.
37. Oscillateurs.
38. Couplage des oscillateurs.
39. Filtrage.
40. Constantes physiques fondamentales ; unités.