

# 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 2003
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 2004

# COMPOSITION DU JURY

<b>PIETRYK Gilbert</b>	<i>Inspecteur Général de l'Education Nationale Président du Jury</i>
<b>GULDNER Yves</b>	<i>Professeur à l'Université Paris VI Vice-Président du Jury</i>
<b>LE BOURHIS Jean-François</b>	<i>Inspecteur Pédagogique Régional de l'académie de Caen Vice-Président du Jury</i>
<b>BARBET-MASSIN Rémi</b>	<i>Professeur au Lycée Henry IV à Paris</i>
<b>BAUDIN Jean-Bernard</b>	<i>Sous-directeur de laboratoire de l'Ecole Normale Supérieure</i>
<b>BAUMBERGER Tristan</b>	<i>Professeur à l'Université Paris VII</i>
<b>BERROIR Jean-Marc</b>	<i>Professeur à l'Ecole Normale Supérieure de Paris</i>
<b>BILLY Nicolas</b>	<i>Professeur à l'Université Evry - Val d'Essonne</i>
<b>BRIFFAUT Jean-Noël</b>	<i>Professeur au Lycée Brizeux à Quimper</i>
<b>CAMELIO Béatrice</b>	<i>Professeur au Lycée Clémenceau à Nantes</i>
<b>GADET Véronique</b>	<i>Professeur au Lycée Chaptal à Paris</i>
<b>GOUEDARD Michèle</b>	<i>Professeur au Lycée Fénelon à Paris</i>
<b>HOLDSWORTH Peter</b>	<i>Professeur à l' Ecole Normale Supérieure de Lyon</i>
<b>JACQUIER Philippe</b>	<i>Professeur à l'Université ParisVI</i>
<b>JULIEN Lucile</b>	<i>Professeur à l'Université ParisVI</i>
<b>KAHANE Claudine</b>	<i>Professeur à l'Université Joseph Fourier à Grenoble</i>
<b>LAIGROZ Paulette</b>	<i>Professeur au Lycée du Parc à Lyon</i>
<b>MANGILI Daniel</b>	<i>Professeur au Lycée Saint Louis à Paris</i>
<b>OBERT Dominique</b>	<i>Professeur au Lycée Victor Hugo à Besançon</i>
<b>ODERMATT Philippe</b>	<i>Professeur au Lycée Champollion à Grenoble</i>
<b>POLICAR Clotilde</b>	<i>Maître de conférences à l' Université Paris XI</i>
<b>PONTY Pascal</b>	<i>Professeur au Lycée Eiffel à Cachan</i>
<b>SIMON Daniel</b>	<i>Professeur à l'Université de Lyon 1</i>
<b>SZYMCZAK Anne</b>	<i>Professeur au Lycée Wallon à Valenciennes</i>

## **AVANT-PROPOS**

*La session 2003 de l'agrégation externe de sciences physiques est caractérisée par une augmentation significative du nombre de postes ouverts au concours (185 à comparer aux 166 postes de la session 2002). Celle-ci s'accompagne d'une relative stabilité du nombre de candidats inscrits, ce qui laisse présager, du moins on peut l'espérer, la fin de l'évolution constatée durant les dernières années (2045 inscrits en 97 contre 1203 en 2003). 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. Le niveau des lauréats reste très satisfaisant.*

*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 conduisent à formuler les conseils suivants :*

*- **En leçons**, il est prioritaire de définir avant tout l'objectif à atteindre à travers le thème étudié. Ce n'est qu'à ce prix que l'on peut identifier le fil conducteur de la construction de la leçon et faire passer avec clarté et cohérence un message fort. Certes la construction scientifique de la leçon constitue la colonne vertébrale de l'exposé, mais de réelles compétences pédagogiques sont attendues, le candidat devant convaincre le jury de l'intérêt des explications qu'il donne. Sa prestation aux épreuves orales ne préfigure-t-elle pas celle de l'« acteur » qu'il sera demain dans sa classe ? La « mise en scène » de l'exposé n'est pas à négliger ; la présentation d'expériences et l'utilisation de moyens de projection modernes (vidéoprojecteur notamment) en sont des supports vivants.*

*- **En montages**, un choix cohérent et personnel des expériences réalisées est attendu. Même s'il n'y a pas de réponse absolue quant au nombre de manipulations à présenter, on peut en général considérer que cinq expériences pertinentes, dont trois donnent lieu à des mesures quantitatives bien interprétées, assurent une bonne note dès lors que le candidat commente les mesures faites, précise les précautions expérimentales prises et interprète les phénomènes observés.*

***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.*

*Depuis quelques années, les centres de préparation accomplissent un considérable travail pour élaborer des **documents photocopiés**, dont plusieurs sont disponibles sous forme de cédéroms, généralement très bien faits et qui présentent l'ensemble des montages en proposant pour chaque titre un choix d'expériences adaptées. Ces photocopiés sont une aide précieuse pour la préparation de l'épreuve de montage pendant l'année qui précède le concours.*

*Cette année, ces documents ont été mis à disposition des candidats, qui en ont largement fait usage pendant les quatre heures de préparation. Malheureusement, si ces photocopiés constituent une très bonne base de travail pour la préparation et l'entraînement à l'épreuve durant l'année et, comme support initial, pour une réflexion personnelle approfondie, ils se sont à l'usage révélés souvent pénalisants pendant les épreuves ; de nombreux candidats se sont en effet trouvés absolument incapables d'adapter ou d'expliquer les nombreux "conseils et astuces" qu'ils y ont trouvés, certains d'entre eux allant jusqu'à avouer avoir suivi un protocole sans le comprendre. A l'évidence, bon nombre de candidats ont insuffisamment travaillé pour cette épreuve, croyant pouvoir se reposer sur les photocopiés pour pallier la faiblesse de leur préparation initiale. Or, dans notre système éducatif, l'importance de la pratique expérimentale est affirmée tant au niveau du second degré qu'au niveau du post-baccalauréat : la vérification des capacités expérimentales constitue aujourd'hui une épreuve du baccalauréat S et la pratique des TP cours est généralisée en classes préparatoires aux grandes écoles. Il convient donc d'insister sur cette nécessaire formation expérimentale du futur enseignant de sciences physiques, et de tirer les conclusions des dérives observées cette année. **En conséquence, les photocopiés et leurs équivalents sous forme de cédéroms ne seront pas acceptés à la session 2004.***

*Pour ce qui concerne les **transparents** pour rétroprojecteur mis à la disposition des candidats, la dérive observée depuis plusieurs années s'amplifie : leur nombre croît de manière très importante, chaque centre fournissant son propre jeu de transparents, ce qui entraîne de multiples redondances et rend la gestion du stock particulièrement difficile. Dans ces conditions, un nouveau dispositif va être mis en place, dispositif consistant à remplacer les transparents pour rétroprojecteur par des **documents numérisés** pour vidéo-projecteur. Cette mesure vise, dans le strict respect de l'équité des candidats, à aider ces derniers dans leur recherche documentaire et à les amener à apprendre à utiliser dès leur année de préparation cet outil - le vidéo-projecteur - qui prend une place de plus en plus importante au service de la pédagogie et de la didactique. Les candidats disposeront alors d'une banque*

*de « transparents » numérisés à l'intérieur de laquelle ils pourront sélectionner les documents leur permettant d'illustrer au mieux leurs leçons.*

*Dès la session 2004, les centres de préparation sont invités à élaborer de tels « transparents » numérisés et à les faire parvenir au président du jury pour validation ; à titre transitoire, les transparents pour rétroprojecteur seront autorisés à cette même session, le jury incitant cependant fortement les candidats à opter pour les documents numérisés.*

*A la session 2005, les transparents pour rétroprojecteur ne seront plus acceptés.*

*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*

## INFORMATIONS STATISTIQUES

185 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 étant éventuellement rappelées à titre de comparaison.

	2003	2002
Inscrits	1162	1203
Présents aux trois épreuves	690	735
<b>Admissibles</b>	<b>324</b>	<b>315</b>
Barre d'admissibilité	42/120	43/120
Moyenne générale du candidat classé premier	17,43/20	17,32/20
Moyenne générale du dernier candidat reçu	7,82/20	8,55/20
<b>ADMIS</b>	<b>175</b>	<b>166</b>

### EPREUVES ECRITES

Les épreuves écrites se sont déroulées les 14, 15 et 16 avril 2003.

Moyenne des candidats aux épreuves écrites :

Nature de l'épreuve	Moyenne des candidats ayant composé	Moyenne des candidats admissibles
Composition de physique	7,4/20	11,4/20
Composition de chimie	7,7/20	10,4/20
Problème de physique	7,2/20	10,7/20

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 17 juin au 21 juillet 2003.

Moyenne des candidats aux épreuves orales :

Nature de l'épreuve	Moyenne des candidats présents aux épreuves orales	Ecart-type
Leçon de physique	7,6/20	3,98
Leçon de chimie	8,05/20	4,03
Montage de physique	6,78/20	4,48

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
1981	19	15
1980	68	46
1979	74	47
1978	55	33
1977	24	9
1976	16	3
1975	17	5
1974	14	5
1973	5	2
1972	7	3
1968 à 1971	16	6
1952 à 1967	9	1

### Répartition par titres et diplômes

Titre ou diplôme	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
Doctorat	9	2
DEA	36	19
Ingénieur	30	14
Maîtrise	224	137
CAPES, PLP	25	3

### Répartition par profession

Profession	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
Etudiant	148	88
Elèves d'une ENS	54	50
Elève IUFM 1 <sup>ère</sup> année	22	9
Certifiés et PLP stagiaires	30	10
Enseignant MEN	45	11
Enseignement privé	1	0
Autres ministères	3	0
Hors fonct publique/sans emploi	21	7

### Répartition par sexe

	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
Homme	236	119
Femme	88	56

# REGLEMENTATION

## Programme :

Le programme des épreuves écrites et orales de la session 2003 est décrit dans le BO spécial n° 13 du 30 mai 2002.

Ce programme est reconduit pour la session 2004 (cf. BO spécial n° 3 du 22 mai 2003).

## Epreuves :

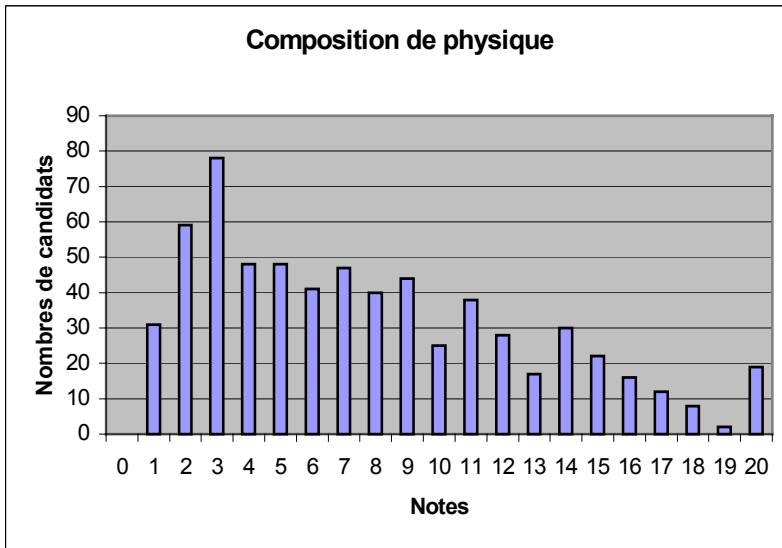
Les épreuves écrites comportent :

- 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)

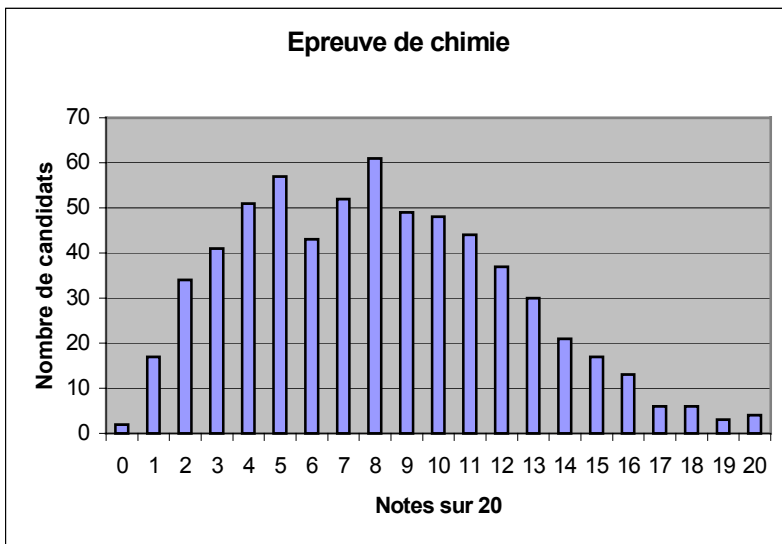
Les épreuves orales comportent :

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

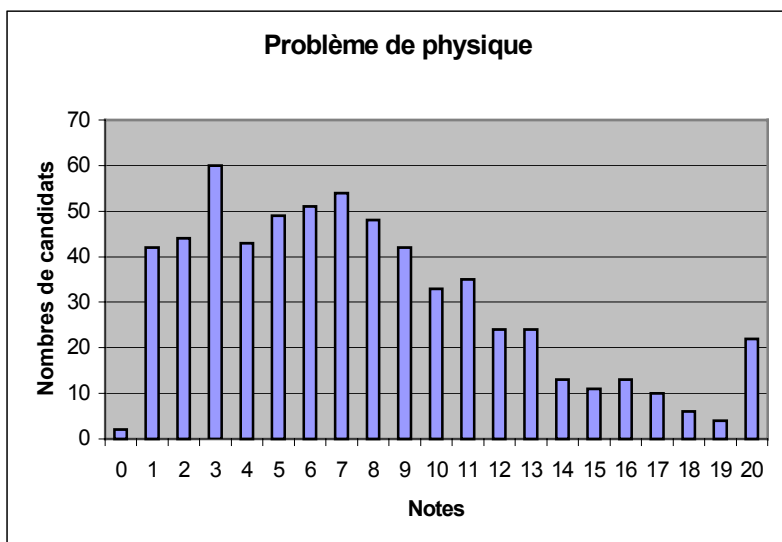
## Distribution des notes sur 20 aux épreuves écrites des candidats



Moyenne : 7,4
Ecart-type : 5,0

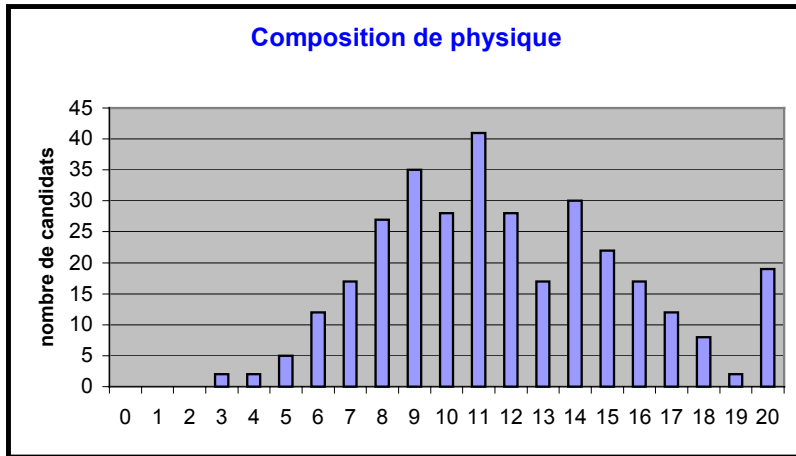


Moyenne : 7,7
Ecart-type : 4,2

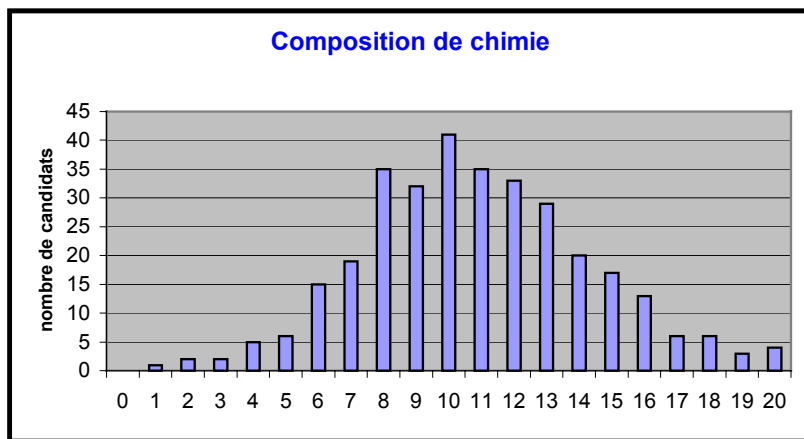


Moyenne : 7,2
Ecart-type : 4,9

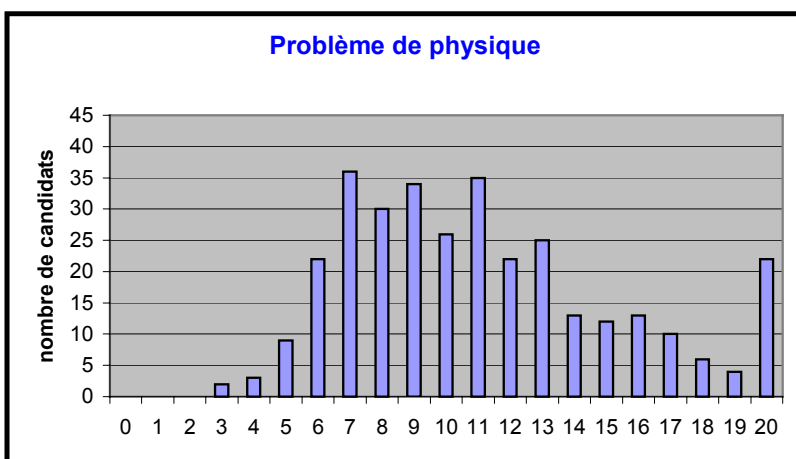
Distribution des notes sur 20 aux épreuves écrites  
des candidats admissibles.



Moyenne:	11,38
Ecart-type	3,88

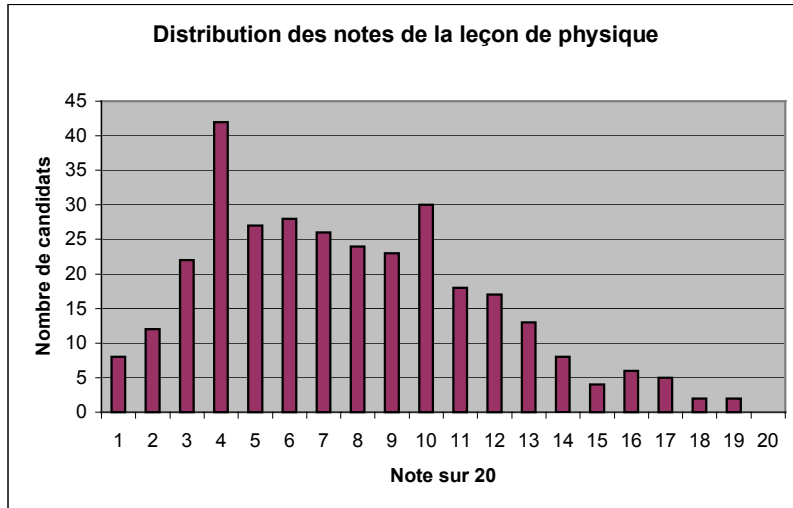


Moyenne:	10,39
Ecart-type	3,47

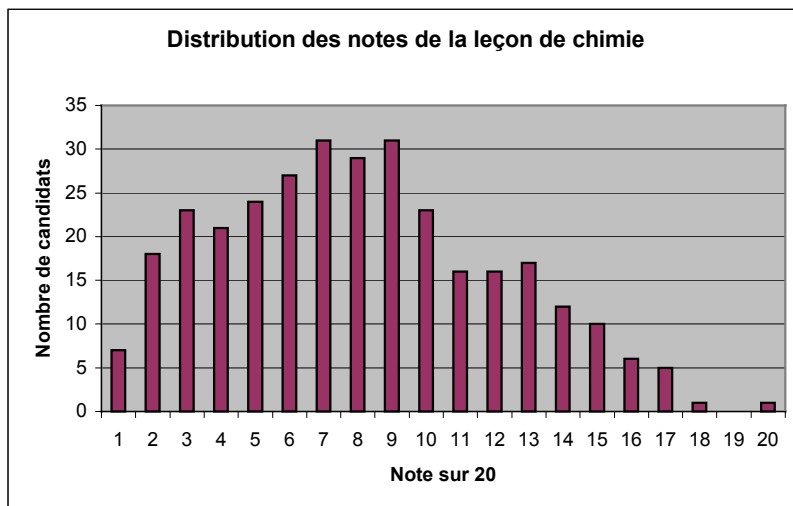


Moyenne:	10,67
Ecart-type	4,23

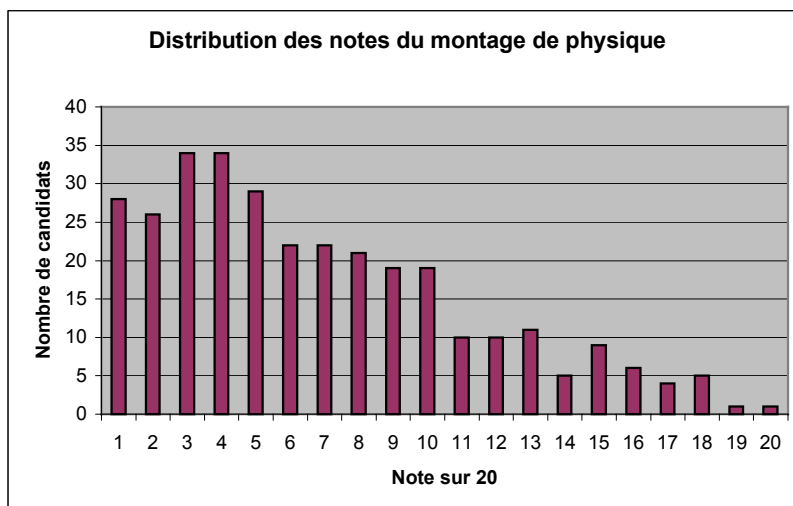
# Distributions des notes de l'oral



Moyenne	7.60
EcartType	3.98



Moyenne	8.05
EcartType	4.03



Moyenne	6.78
EcartType	4.48

4353

**28531**

*repère à reporter sur la copie*

**SESSION DE 2003**

---

**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.*

**Tournez la page S.V.P.**

# CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES ET TELECOMMUNICATIONS

Ce sujet comporte trois parties indépendantes :

- PARTIE A : Electromagnétisme et relativité,
- PARTIE B : Rayonnement dipolaire et applications,
- PARTIE C : Propagation guidée, fibres optiques.

Chaque partie comporte de nombreuses questions indépendantes. Le candidat peut utiliser un résultat donné par le texte, même s'il n'a pas été démontré.

Les vecteurs sont notés en gras.

Des données utiles à la résolution de certaines questions sont regroupées au début du problème.

La plus grande importance sera donnée à la qualité de la rédaction et de la présentation.

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 indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

## Données générales

- $\text{rot}(f\mathbf{G}) = f \text{rot}\mathbf{G} + \text{grad}f \wedge \mathbf{G}$
- $\text{rot}(\text{rot}\mathbf{G}) = -\Delta\mathbf{G} + \text{grad}(\text{div}\mathbf{G})$
- $\text{div}(f\mathbf{G}) = f \text{div}\mathbf{G} + \text{grad}f \cdot \mathbf{G}$

## Données relatives à la PARTIE B

- masse de l'électron :  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- charge de l'électron :  $-e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- vitesse de la lumière dans le vide :  $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- perméabilité magnétique du vide :  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$

Données relatives à la PARTIE C

- $\mathbf{a} \wedge (\mathbf{b} \wedge \mathbf{c}) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c})\mathbf{b} - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})\mathbf{c}$
- coordonnées cylindriques :

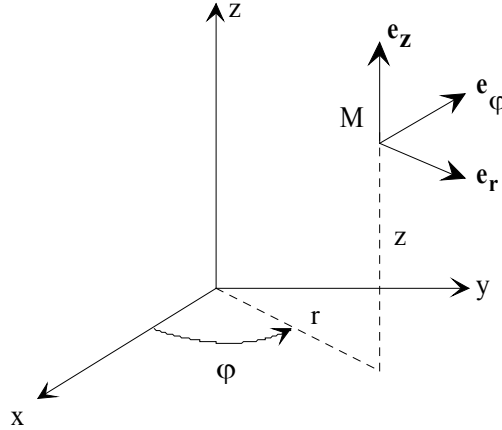


figure 1

- Laplacien en coordonnées cylindriques :  $\Delta f(r, \varphi) = \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2}$
- fonction de Bessel de première espèce d'ordre  $m$  :  $J_m(x)$  pour  $m$  entier naturel.
  - elle vérifie l'équation différentielle suivante :
 
$$\frac{d^2 J_m(x)}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dJ_m(x)}{dx} + \left(1 - \frac{m^2}{x^2}\right) J_m(x) = 0$$
  - comportement au voisinage de 0 :  $J_0(0) = 1$  et  $J_m(0) = 0$  pour  $m \geq 1$ .
  - $\frac{dJ_0(x)}{dx} = -J_1(x)$ .
  - tableau des premières solutions de l'équation  $J_0(x) = 0$  sur  $]0; +\infty[$  :

2,405	5,520	8,654	11,792	14,931
-------	-------	-------	--------	--------

- fonction de Bessel modifiée de seconde espèce d'ordre  $m$  :  $K_m(x)$  pour  $m$  entier naturel.
  - elle vérifie l'équation différentielle suivante :
 
$$\frac{d^2 K_m(x)}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dK_m(x)}{dx} - \left(1 + \frac{m^2}{x^2}\right) K_m(x) = 0.$$
  - comportement au voisinage de l'infini :  $K_m(x) \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} 0$ .
  - $K_m(x)$  ne s'annule pas sur  $]0; +\infty[$ .
  - $\frac{dK_0(x)}{dx} = -K_1(x)$ .

## PARTIE A : Electromagnétisme et relativité.

Cette partie traite des difficultés liées à l'utilisation simultanée des lois de l'électromagnétisme et de la mécanique classique de Newton. Elle étudie ensuite comment la transformation de Lorentz-Poincaré et l'utilisation de la mécanique relativiste d'Einstein permettent de lever ces difficultés.

On considère un référentiel **galiléen**  $R$ , il est rapporté à trois axes orthogonaux  $Ox, Oy, Oz$ .  $(\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z)$  est la base orthonormée directe associée. On désigne par  $t$  le temps dans  $R$ , ainsi un événement est repéré dans  $R$  par  $(x, y, z, ct)$  où  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide.

### 1. Les équations de Maxwell.

L'étude est conduite dans  $R$ , on note  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{B}$  les champs électrique et magnétique,  $\rho$  la densité de charge volumique et  $\mathbf{j}$  le vecteur densité de courant volumique.

1.1. Rappeler la définition d'un référentiel galiléen.

On rappelle les quatre équations de Maxwell reliant  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{j}$  et  $\rho$  :

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0 & (\text{flux magnétique}) & & \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} & (\text{Maxwell-Faraday}) \\ \operatorname{div} \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} & (\text{Maxwell-Gauss}) & & \operatorname{rot} \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} & (\text{Maxwell-Ampère}) \end{aligned}$$

### 1.2. Potentiels.

1.2.1. Rappeler les expressions des champs  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$  en fonction des potentiels vecteur  $\mathbf{A}$  et scalaire  $V$  et justifier l'existence de ces potentiels.

1.2.2. En déduire le système de deux équations aux dérivées partielles liant  $\mathbf{A}$ ,  $V$ ,  $\mathbf{j}$  et  $\rho$ .

1.2.3. On admet que l'on peut imposer la condition de jauge de Lorentz :  $\operatorname{div} \mathbf{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial V}{\partial t} = 0$ .

Ecrire, dans ce cas, les deux équations de la question A.1.2.2.

On considère désormais un second référentiel **galiléen**  $R'$  en translation rectiligne uniforme à la vitesse  $\mathbf{v}_e = v_e \mathbf{e}_x$  par rapport à  $R$ . Son origine  $O'$  est située sur l'axe  $Ox$ , ses trois axes  $O'x', O'y', O'z'$  sont respectivement parallèles aux axes  $Ox, Oy, Oz$ . On désigne par  $t'$  le temps dans  $R'$ , ainsi un événement est repéré dans  $R'$  par  $(x', y', z', ct')$ . Enfin si  $t' = t = 0$ , les origines  $O$  et  $O'$  de  $R$  et  $R'$  coïncident.

### 2. Les lois de l'électromagnétisme en mécanique newtonienne.

Dans cette partie A.2., l'étude est conduite dans le cadre de la mécanique newtonienne.

#### 2.1. Transformation « classique » des champs.

2.1.1. Dans le référentiel  $R$ , rappeler l'expression de la force de Lorentz  $\mathbf{F}$  exprimant l'action du champ électromagnétique  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$  sur une particule chargée test de charge  $q$  animée d'une vitesse  $\mathbf{v}$  dans  $R$ .

- 2.1.2. Expliciter la formule de transformation des vitesses reliant la vitesse  $\mathbf{v}'$  de la particule chargée test dans  $R'$ , à  $\mathbf{v}$  et  $\mathbf{v}_e$ .
- 2.1.3. Dans le référentiel  $R'$ , le champ électromagnétique précédent est caractérisé par les champs électrique et magnétique  $\mathbf{E}'$ ,  $\mathbf{B}'$ . En utilisant les questions précédentes, exprimer les vecteurs  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$  en fonction des vecteurs  $\mathbf{E}'$ ,  $\mathbf{B}'$  et  $\mathbf{v}_e$ .

## 2.2.

- 2.2.1. Expliciter la transformation de Galilée reliant  $(x',y',z',ct')$  à  $(x,y,z,ct)$ .

On établit alors les 4 équations formelles, que l'on admettra, reliant les différentes dérivées partielles :

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x'} \quad \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y'} \quad \frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z'} \quad \frac{\partial}{\partial ct} = \frac{\partial}{\partial ct'} - \frac{v_e}{c} \frac{\partial}{\partial x'}$$

- 2.2.2. On se place dans un domaine de l'espace où la densité de charge volumique et le vecteur densité de courant volumique sont nuls.

2.2.2.α. Montrer que l'équation de Maxwell relative au flux magnétique est invariante par changement de référentiel galiléen.

2.2.2.β. Etudier de même l'invariance de l'équation de Maxwell-Gauss.

2.2.2.γ. Que peut-on conclure ?

## 2.3.

On considère un fil rectiligne uniformément chargé de grande dimension, coïncidant avec les axes  $Ox$  et  $O'x'$ . Il est fixe dans le référentiel  $R'$  donc animé dans le référentiel  $R$  d'un mouvement de translation rectiligne uniforme à la vitesse  $\mathbf{v}_e = v_e \mathbf{e}_x$ . On note  $\lambda_0$  la densité linéique de charge mesurée dans  $R'$ .

- 2.3.1. Déterminer, en un point quelconque situé en dehors de l'axe, les champs électrique et magnétique  $\mathbf{E}'$ ,  $\mathbf{B}'$  créés par le fil dans le référentiel  $R'$ .
- 2.3.2. En utilisant la loi de la transformation classique des champs établie à la question A.2.1.3., exprimer, en un point quelconque situé en dehors de l'axe, les champs  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$  créés par le fil dans le référentiel  $R$ .
- 2.3.3. En se plaçant toujours dans le cadre de la mécanique newtonienne, évaluer **directement** la valeur du champ magnétique  $\mathbf{B}$  dans le référentiel  $R$ .
- 2.3.4. Que peut-on conclure ?

## 3. Les lois de l'électromagnétisme en mécanique relativiste.

Dans cette partie A.3., l'étude est conduite dans le cadre de la mécanique relativiste.

Un champ électromagnétique est caractérisé par  $(\mathbf{E}, \mathbf{B})$  les champs électrique et magnétique mesurés dans le référentiel  $R$ , et  $(\mathbf{E}', \mathbf{B}')$  les champs électrique et magnétique mesurés dans le référentiel  $R'$ .

On pose  $\beta_e = \frac{v_e}{c}$  et  $\gamma_e = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_e^2}}$ , on rappelle l'expression de la transformation einsteinienne des champs :

$$\mathbf{E}_{//} = \mathbf{E}'_{//}, \quad \mathbf{E}_{\perp} = \gamma_e (\mathbf{E}'_{\perp} - \mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B}'_{\perp}), \quad \mathbf{B}_{//} = \mathbf{B}'_{//}, \quad \mathbf{B}_{\perp} = \gamma_e \left( \mathbf{B}'_{\perp} + \frac{\mathbf{v}_e}{c^2} \wedge \mathbf{E}'_{\perp} \right).$$

L'indice // représente les champs parallèles à la direction définie par  $\mathbf{v}_e$ , l'indice  $\perp$  représente les champs perpendiculaires à  $\mathbf{v}_e$ . On a ainsi  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_{//} + \mathbf{E}_{\perp}$  et  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_{//} + \mathbf{B}_{\perp}$ .

### 3.1.

**3.1.1.** Énoncer le principe de relativité d'Einstein.

**3.1.2.** Expliciter la transformation de Lorentz-Poincaré reliant  $(x', y', z', ct')$  à  $(x, y, z, ct)$ .

On établit alors les 4 équations formelles, que l'on admettra, reliant les différentes dérivées partielles :

$$\frac{\partial}{\partial x} = \gamma_e \left( \frac{\partial}{\partial x'} - \beta_e \frac{\partial}{\partial ct'} \right) \quad \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y'} \quad \frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z'} \quad \frac{\partial}{\partial ct} = \gamma_e \left( -\beta_e \frac{\partial}{\partial x'} + \frac{\partial}{\partial ct'} \right).$$

**3.1.3.** On se place dans un domaine de l'espace où la densité de charge volumique et le vecteur densité de courant volumique sont nuls. On **admet** que les équations de Maxwell-Faraday et Maxwell-Ampère sont invariantes par changement de référentiel galiléen.

**3.1.3.α.** En utilisant les questions précédentes, montrer que l'équation de Maxwell relative au flux magnétique est invariante par changement de référentiel galiléen.

**3.1.3.β.** Étudier de même l'invariance de l'équation de Maxwell-Gauss.

**3.1.3.γ.** Comparer cette situation avec celle de la question **A.2.2.2.β.**

### 3.2.

On étudie à nouveau le fil rectiligne chargé de la question **A.2.3.**

**3.2.1.** Déterminer, en un point quelconque situé en dehors de l'axe, les champs électrique et magnétique  $\mathbf{E}'$ ,  $\mathbf{B}'$  créés par le fil dans le référentiel  $R'$ .

**3.2.2.** En utilisant la loi de la transformation einsteinienne des champs, déterminer, en un point quelconque situé en dehors de l'axe, les champs  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$  créés par le fil dans le référentiel  $R$ .

### 3.2.3.

**3.2.3.α.** Déterminer, à l'aide du théorème de Gauss appliqué dans  $R$ , la charge portée par une longueur  $h$  du fil, mesurée dans le référentiel  $R$ .

**3.2.3.β.** Retrouver la valeur de cette charge à partir des résultats de la cinématique relativiste.

**3.2.3.γ.** Évaluer alors directement la valeur du champ magnétique  $\mathbf{B}$  dans le référentiel  $R$ .

## PARTIE B : Rayonnement dipolaire et applications.

La partie B aborde la production d'une onde électromagnétique par un dipôle électrique oscillant. Une première application concerne l'étude d'une antenne émettrice en liaison avec la téléphonie mobile, une seconde aborde la diffusion d'un rayonnement par un atome.

On nomme  $R$  un référentiel galiléen rapporté à trois axes orthogonaux  $Ox, Oy, Oz$ .  $(\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z)$  est la base orthonormée directe associée. On note  $j$  le complexe tel que  $j^2 = -1$ .

### 1. Etude du rayonnement du dipôle électrique.

On considère un doublet constitué de deux charges ponctuelles de charges opposées  $+q$  et  $-q$ . La charge  $-q$  est fixe et placée en  $O$  ; la charge  $+q$  est mobile sur l'axe des  $z$  suivant la loi  $z(t) = a \sin(\omega t)$  ;  $a$  et  $\omega$  représentent respectivement l'amplitude et la pulsation des oscillations. L'ensemble constitue un dipôle variable qui crée dans le vide une onde électromagnétique de pulsation  $\omega$  en un point  $M$  repéré par les coordonnées sphériques  $(r, \theta, \varphi)$  ;  $(\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_\varphi)$  désignent les vecteurs unitaires associés. La figure 2 précise le repérage du point  $M$ .

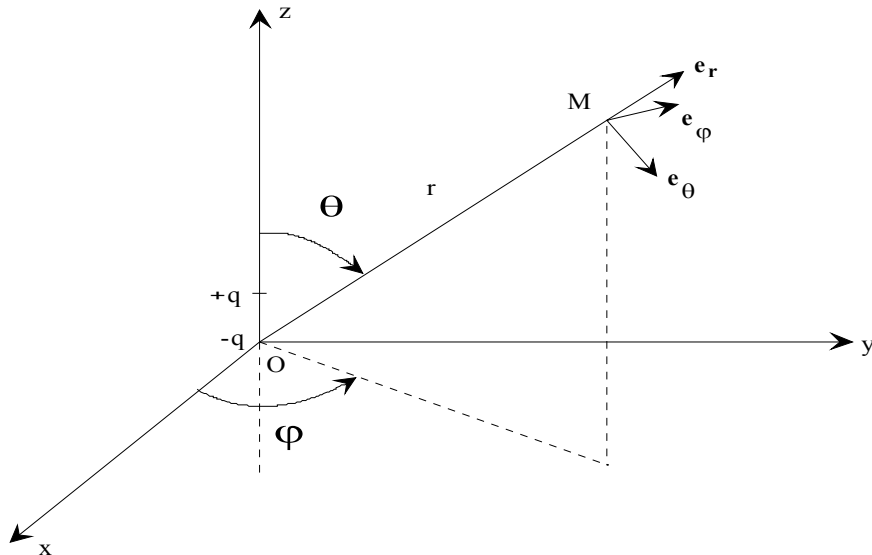


figure 2

On se place dans les conditions où  $r \gg a$  et  $\lambda \gg a$  ;  $\lambda$  est la longueur d'onde associée à l'onde électromagnétique émise.

### 1.1. Potentiels

#### 1.1.1.

1.1.1.α. Commenter qualitativement les deux inégalités :  $r \gg a$  et  $\lambda \gg a$  .

1.1.1.β. Exprimer le moment dipolaire électrique  $\mathbf{p} = p(t)\mathbf{e}_z$  associé au doublet  $(-q,+q)$ .

1.1.2. On admet l'expression du potentiel vecteur  $\mathbf{A}(M, t)$  en  $M$  :  $\mathbf{A}(M, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\dot{\mathbf{p}}(t - \frac{r}{c})}{r} \mathbf{e}_z$  où

$\dot{\mathbf{p}}(t) = \frac{d\mathbf{p}}{dt}$  . Interpréter la présence du terme en  $t - \frac{r}{c}$  dans l'expression de  $\mathbf{A}(M, t)$  .

1.1.3. Déterminer l'expression du potentiel scalaire en utilisant la condition de jauge de Lorentz :

$$\operatorname{div}\mathbf{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \text{ et en ne conservant que les termes qui contiennent } t - \frac{r}{c}.$$

## 1.2. Champs.

On conduit l'étude dans la zone de rayonnement :  $r \gg \lambda$ .

1.2.1. Etablir que le champ magnétique  $\mathbf{B}(M, t)$  s'écrit dans ce domaine :

$$\mathbf{B}(M, t) = \frac{1}{c} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\ddot{\mathbf{p}}(t - \frac{r}{c})}{r} (\mathbf{e}_z \wedge \mathbf{e}_r). \text{ On pourra par exemple utiliser la formule :}$$

$$\operatorname{rot}(f\mathbf{G}) = f \operatorname{rot}\mathbf{G} + \operatorname{grad}f \wedge \mathbf{G}.$$

1.2.2. Etablir de même que le champ électrique  $\mathbf{E}(M, t)$  vaut :

$$\mathbf{E}(M, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\ddot{\mathbf{p}}(t - \frac{r}{c})}{r} (\mathbf{e}_z \wedge \mathbf{e}_r) \wedge \mathbf{e}_r.$$

1.2.3. Décrire qualitativement la structure locale de cette onde électromagnétique.

## 1.3. Aspect énergétique.

1.3.1. Montrer que l'expression de la puissance rayonnée au voisinage du point M, par unité d'angle solide dans la direction définie par les angles  $(\theta, \varphi)$  s'écrit :

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{\mu_0}{16\pi^2 c} \left( \ddot{\mathbf{p}}(t - \frac{r}{c}) \right)^2 \sin^2 \theta, \text{ avec } d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi.$$

1.3.2. Donner l'allure du diagramme de rayonnement.

1.3.3. Déterminer l'expression de la puissance totale rayonnée par ce dipôle à travers la sphère de centre O et de rayon  $r \gg \lambda$ . On rappelle que  $\int_0^\pi \sin^3 \theta d\theta = \frac{4}{3}$ .

## 2. Rayonnement par une antenne.

### 2.1. Antenne élémentaire.

2.1.1. Justifier que le dipôle variable est équivalent, pour l'étude du champ dans la zone de rayonnement, à un élément de courant de hauteur  $h = 2a$  parcouru par un courant d'intensité

$$I(t) = \frac{1}{h} \frac{dp}{dt}.$$

2.1.2. On suppose que  $I = I_0 \cos(\omega t)$ . Déterminer la puissance **moyenne** totale  $P_r$  rayonnée par ce dipôle à travers la sphère de centre O et de rayon  $r \gg \lambda$ .

2.1.3. On définit la résistance de rayonnement  $R_r$  par la relation  $P_r = R_r \frac{I_0^2}{2}$ . Donner l'expression de  $R_r$  en fonction de  $\mu_0$ ,  $c$ ,  $h$  et  $\lambda$ . Expliquer l'intérêt de cette notion.

#### 2.1.4. Applications numériques.

On étudie le champ électromagnétique rayonné par un téléphone portable de type GSM 900. La fréquence d'émission est de 900 MHz, il est muni d'une antenne de hauteur  $h = 2$  cm et sa puissance moyenne totale rayonnée est  $P_r = 2$  W.

2.1.4.α. Comparer  $h$  et la longueur d'onde  $\lambda$ . Conclure.

2.1.4.β. Estimer la distance à partir de laquelle on se situe dans la zone de rayonnement.

2.1.4.γ. Déterminer la résistance de rayonnement.

2.1.4.δ. Estimer l'ordre de grandeur de l'amplitude maximale du vecteur champ électrique à une distance de 3 m.

#### 2.2. Antenne demi-onde.

On considère une antenne de longueur  $2l$ , orientée suivant l'axe des  $z$ , et schématisée sur la figure 3.

Cette antenne est une antenne demi-onde, c'est-à-dire que l'on a  $l = \frac{\lambda}{4}$ .

On admet qu'elle est parcourue par un courant d'intensité  $I = I_1 \cos\left(2\pi \frac{z}{\lambda}\right) \cos(\omega t)$ .

On étudie le champ électromagnétique rayonné en un point  $M$  repéré par les coordonnées sphériques  $(r, \theta, \varphi)$ .

On se place en un point  $M$  tel que  $r \gg l$ .

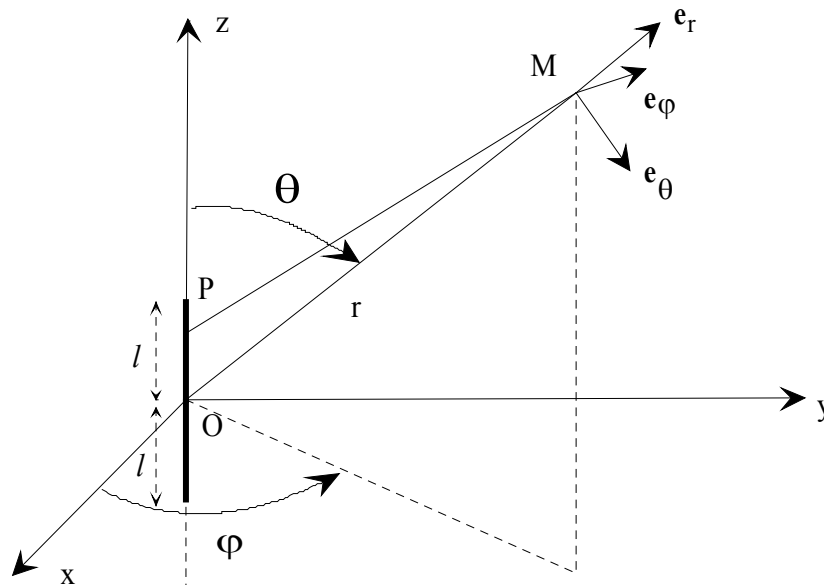


figure 3

2.2.1. Commenter la structure du courant  $I$  qui parcourt cette antenne.

#### 2.2.2. Structure des champs.

2.2.2.α. Soit  $P$  un point de l'antenne repéré par sa coordonnée  $z$ , exprimer  $\|\mathbf{PM}\|$  en fonction de  $r$ ,  $z$  et  $\theta$ .

**2.2.2.β.** En utilisant les résultats des questions **B.1.2.2.** et **B.2.1.1.**, établir que le champ électrique rayonné en M peut s'écrire en notation complexe :

$$\underline{\mathbf{E}}(\mathbf{M}, t) = j \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\omega \sin \theta}{r} e^{j(\omega t - kr)} \int_{-l}^{+l} I_1 \cos\left(2\pi \frac{z}{\lambda}\right) e^{jkz \cos \theta} dz \mathbf{e}_\theta \text{ avec } k = \frac{\omega}{c} \text{ et } l = \frac{\lambda}{4}.$$

Après calcul, on **admet** que  $\underline{\mathbf{E}}(\mathbf{M}, t)$  s'écrit  $\underline{\mathbf{E}}(\mathbf{M}, t) = j \frac{\mu_0 c}{2\pi} \frac{I_1}{r} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} e^{j(\omega t - kr)} \mathbf{e}_\theta$ .

**2.2.2.γ.** En supposant que l'onde est localement plane, déterminer de même l'expression du champ magnétique en notation complexe :  $\underline{\mathbf{B}}(\mathbf{M}, t)$ .

### 2.2.3. Etude énergétique.

**2.2.3.α.** Déterminer la puissance moyenne totale rayonnée  $P_r$  par cette antenne. On donne

$$\int_0^\pi \frac{\cos^2\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} d\theta \approx 1,22.$$

**2.2.3.β.** Par analogie avec la question **B.2.1.3.** déterminer la résistance de rayonnement de cette antenne. Evaluer numériquement cette résistance.

**2.2.3.γ.** L'antenne d'une station de base d'une cellule de radiotéléphonie mobile est assimilée, pour simplifier, à une antenne demi-onde. La fréquence de l'onde émise est 900 MHz, la puissance rayonnée est égale à 20 W. En déduire les valeurs numériques de l'amplitude du courant électrique  $I_1$  et de l'ordre de grandeur de l'amplitude maximale du champ électrique à une distance de 500m de la station de base.

### 2.3. Réception d'un signal en téléphonie mobile.

On désire étudier de manière simple les difficultés de la réception d'un signal en téléphonie mobile. Pour simplifier l'étude, l'onde émise par la station de base sera considérée comme plane et polarisée rectilignement suivant l'axe des z.

Son champ électrique s'écrit en notation complexe :  $\underline{\mathbf{E}}_i(\mathbf{M}, t) = E_0 e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})} \mathbf{e}_z$ ,  $\omega$  représente la pulsation,  $\lambda$  la longueur d'onde et  $f$  la fréquence. On prendra  $f = 900$  MHz.

Un immeuble situé en  $x = L$  réfléchit l'onde sans l'atténuer et sans modifier sa polarisation.

La figure 4 schématise la situation étudiée.

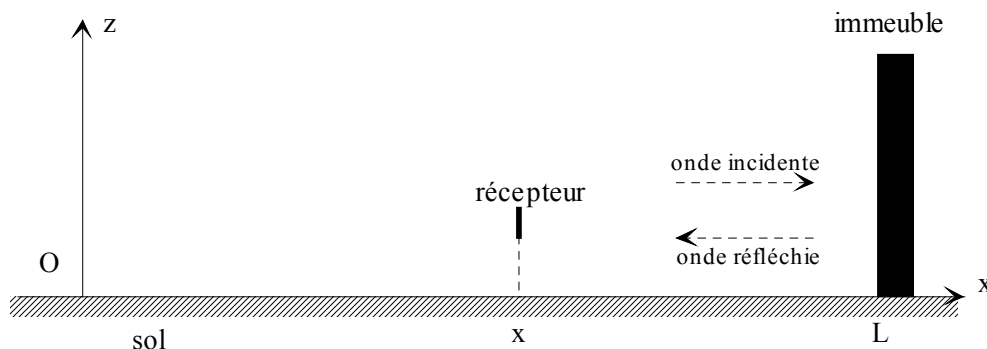


figure 4

### 2.3.1. Champ électrique résultant.

2.3.1.α. On admet que le champ électrique de l'onde réfléchie s'écrit :

$$\underline{\mathbf{E}}_r(M, t) = E_0 e^{j(\omega t + \frac{2\pi(x-2L)}{\lambda} + \phi)} \mathbf{e}_z \text{ où } \phi \text{ est une constante. Commenter cette expression.}$$

2.3.1.β. Ecrire le champ électrique de l'onde résultante :  $\underline{\mathbf{E}}(M, t)$ .

2.3.1.γ. Caractériser l'onde résultante.

### 2.3.2. Etude énergétique.

On admet que la puissance  $P$  reçue par le récepteur ( téléphone mobile ) est proportionnelle à la valeur moyenne dans le temps du carré du champ électrique.

On suppose de plus qu'il existe une puissance  $P_s$  en dessous de laquelle la réception d'un signal est impossible. On suppose également que la moyenne suivant  $x$  de  $P$  est égale à  $10P_s$ .

2.3.2.α. Le téléphone mobile, porté par un piéton, se déplace à la vitesse de 4 km/h suivant l'axe des  $x$ . Déterminer la durée moyenne des coupures.

2.3.2.β. Déterminer la durée moyenne des coupures dans le cas d'un téléphone mobile utilisé par un passager d'une automobile qui se déplace à la vitesse de 40 km/h.

2.3.2.γ. Commenter ces deux déterminations.

2.3.3. En milieu urbain, les retards des trajets réfléchis par rapport aux trajets directs sont de l'ordre de 1  $\mu$ s. On suppose toujours que la moyenne suivant  $x$  de  $P$  est égale à  $10P_s$ .

2.3.3.α. Quelle est la valeur typique de  $L - x$  associée à ce retard ?

2.3.3.β. On suppose que pour cette valeur typique de  $L - x$  et pour la fréquence  $f$ , le signal reçu par le mobile de la part de la station de base a une puissance nulle. On augmente alors la fréquence de  $f$  à  $f + \delta f$ . Déterminer numériquement la valeur minimale à donner à  $\delta f$  pour obtenir une puissance supérieure à  $P_s$ .

2.3.4. En vous appuyant sur les questions précédentes, proposer quelques méthodes permettant de lutter contre « l'évanouissement » des signaux dans les communications avec les téléphones mobiles.

### 3. Diffusion d'une onde électromagnétique par un atome.

Une onde électromagnétique plane incidente est caractérisée par son champ électrique qui s'écrit en

notation complexe :  $\underline{\mathbf{E}}_{in} = E_0 e^{j(\omega t - kx)} \mathbf{e}_z$ , avec  $k = \frac{\omega}{c}$  et  $E_0$  une constante réelle.

Elle interagit avec l'électron d'un atome placé en  $O$ . On utilisera un modèle classique de l'atome dans lequel le noyau est supposé immobile en  $O$  et l'électron est repéré depuis  $O$  par le vecteur  $\mathbf{r}_e$ ,  $\|\mathbf{r}_e\|$  est supposée petite devant la longueur d'onde  $\lambda$  de l'onde électromagnétique incidente.

Dans le cadre de ce modèle, l'électron est soumis aux actions suivantes :

- une force de rappel élastique :  $- m_e \omega_0^2 \mathbf{r}_e$ ,
- une action d'amortissement visqueux :  $-\frac{m_e}{\tau} \frac{d\mathbf{r}_e}{dt}$ .

On note  $m_e$  la masse de l'électron et  $-e$  sa charge électrique ;  $\omega_0$  et  $\tau$  sont deux constantes.

### 3.1. Onde électromagnétique rayonnée.

#### 3.1.1.

3.1.1.α. Commenter l'inégalité  $\|\mathbf{r}_e\| \ll \lambda$ .

3.1.1.β. Que modélisent les forces de rappel et d'amortissement visqueux ?

3.1.1.γ. Pourquoi peut-on négliger l'action du champ magnétique sur l'électron ?

3.1.2. Déterminer en régime forcé l'amplitude complexe du vecteur moment dipolaire induit par l'onde électromagnétique incidente.

3.1.3. On étudie l'onde électromagnétique rayonnée en un point M par ce dipôle induit tel que  $\mathbf{OM} = r\mathbf{e}_r$ . L'étude est conduite dans la zone de rayonnement, on pourra se référer à la figure 2. En utilisant les résultats de la partie B.1., donner l'expression de la puissance

**moyenne** rayonnée par unité d'angle solide au voisinage du point M :  $\frac{dP_r}{d\Omega}$  avec

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi.$$

On **admet** que la puissance moyenne  $P_r$  totale rayonnée par le dipôle à travers la sphère de centre O et

de rayon  $r \gg \lambda$  s'écrit : 
$$P_r = \frac{\mu_0}{12\pi c m_e^2} \frac{e^4 E_0^2 \omega^4}{\left( (\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \frac{\omega^2}{\tau^2} \right)}$$

3.1.4. Evaluer la puissance moyenne rayonnée par unité de surface  $I_{in}$  par l'onde électromagnétique **incidente** en fonction de  $E_0$ ,  $\mu_0$  et  $c$ .

3.1.5. On définit la section efficace de diffusion par la relation  $\sigma(\omega) = \frac{P_r}{I_{in}}$  et on pose  $\sigma_T = \frac{8\pi}{3} r_0^2$

avec  $r_0 = \frac{\mu_0 e^2}{4\pi m_e}$ .

3.1.5.α. Justifier le terme de section efficace.

3.1.5.β. Evaluer numériquement  $\sigma_T$ .

3.1.5.γ. On pose  $\sigma(\omega) = \sigma_T \cdot f(\omega)$  où  $f(\omega)$  est une fonction de la pulsation  $\omega$ . Donner l'expression de la fonction  $f$  en fonction de  $\omega$ ,  $\omega_0$  et  $\tau$ .

3.1.5.δ. Donner l'allure de  $f(\omega)$  dans le cas où  $\omega_0\tau \gg 1$ .

### 3.2. Polarisation par diffusion.

L'onde incidente n'est plus polarisée, on suppose que l'on peut la décrire comme la superposition de deux ondes sinusoïdales se propageant suivant  $x$ , polarisées rectilignement, l'une suivant  $\mathbf{e}_z$ , l'autre suivant  $\mathbf{e}_y$ , de même amplitude  $E_0$  et incohérentes entre elles.

L'étude est conduite en un point M du plan  $xOy$ , que l'on appellera plan de diffusion, et dans la zone de rayonnement. On note  $\alpha$  l'angle entre les vecteurs  $\mathbf{e}_x$  et  $\mathbf{e}_r$ .

**3.2.1.** Donner l'expression de la puissance **moyenne** rayonnée par unité d'angle solide au voisinage du point M due à la composante de l'onde incidente ayant une polarisation perpendiculaire au plan de diffusion :  $\left(\frac{dP_r}{d\Omega}\right)_\perp$ .

**3.2.2.** Donner de même la puissance **moyenne** rayonnée par unité d'angle solide au voisinage du point M due à la composante de l'onde incidente ayant une polarisation parallèle au plan de diffusion :  $\left(\frac{dP_r}{d\Omega}\right)_\parallel$ .

**3.2.3.**

**3.2.3.α.** Justifier le nom, taux de polarisation, donné à la quantité  $\tau_p = \frac{\left(\frac{dP_r}{d\Omega}\right)_\perp - \left(\frac{dP_r}{d\Omega}\right)_\parallel}{\left(\frac{dP_r}{d\Omega}\right)_\perp + \left(\frac{dP_r}{d\Omega}\right)_\parallel}$ .

**3.2.3.β.** Exprimer  $\tau_p$  en fonction de l'angle  $\alpha$  et tracer la courbe représentant  $\tau_p$  en fonction de l'angle  $\alpha$ .

**3.2.3.γ.** Décrire qualitativement la polarisation de l'onde rayonnée en M pour certaines valeurs caractéristiques de l'angle  $\alpha$ .

**3.2.3.δ.** Décrire une situation expérimentale permettant d'illustrer ce phénomène.

### 3.3. Application à l'atmosphère terrestre.

On suppose que l'atmosphère terrestre est constituée de  $n_0$  molécules par unité de volume. Les différentes molécules sont soumises à l'action de la lumière venant du soleil et se comportent comme des dipôles rayonnants. On note  $x$  la direction de propagation de la lumière émise par le soleil. Pour une longueur d'onde  $\lambda$ , la puissance totale moyenne rayonnée par unité de volume de l'atmosphère situé à la cote  $x$  s'écrit  $n_0 \sigma(\omega) I_{in,\lambda}(x)$  ;  $I_{in,\lambda}(x)$  représente la puissance moyenne par unité de surface transportée par l'onde électromagnétique incidente en  $x$ .

**3.3.1.** Pour l'atmosphère terrestre on donne  $\omega_0 = 1,25 \cdot 10^{16} \text{ rad.s}^{-1}$ ,  $\tau = 10^{-9} \text{ s}$  et on se place dans le domaine du visible. En utilisant la question **B.3.1.5.γ.**, justifier que  $\sigma(\omega) \approx \sigma_T \frac{\omega^4}{\omega_0^4}$ .

**3.3.2.** En effectuant un bilan de puissance sur un cylindre élémentaire de longueur  $dx$  et de surface de base  $S$  perpendiculaire à  $Ox$ , établir que  $I_{in,\lambda}(x) = I_{in,\lambda}(0) e^{-\frac{x}{D_\lambda}}$  ; on exprimera  $D_\lambda$ .

**3.3.3.** Déterminer les valeurs  $D_\lambda$  pour  $n_0 = 2,70 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$  et successivement  $\lambda = 450 \text{ nm}$ ,  $\lambda = 520 \text{ nm}$  et  $\lambda = 650 \text{ nm}$ . Commenter qualitativement ces résultats sachant que l'épaisseur équivalente de l'atmosphère terrestre est de l'ordre de 8 km.

### 3.4. Cas d'un milieu dilué.

On suppose que le milieu diffusant est constitué de  $N$  atomes identiques fixes situés au voisinage de l'origine  $O$ . On note  $\mathbf{R}_i$  le vecteur position associé à l'atome numéro  $i$ . L'onde électromagnétique incidente a les mêmes caractéristiques qu'au début de la partie **B.3.**, son amplitude complexe est  $\underline{\mathbf{E}}_{in} = E_0 e^{j(\omega t - kx)} \mathbf{e}_z$ . On étudie l'onde rayonnée en un point M tel que  $\mathbf{r} = \mathbf{OM} = r \mathbf{e}_r$ .

L'étude est toujours conduite dans la zone de rayonnement, à une distance grande devant la taille  $L$  du milieu et on suppose de plus que  $r \gg \frac{L^2}{\lambda}$ . On pose  $\mathbf{k} = k\mathbf{e}_x$ ,  $\mathbf{K} = k\mathbf{e}_r$  et  $\mathbf{Q} = \mathbf{K} - \mathbf{k}$ .

- 3.4.1.** On note  $\underline{\mathbf{E}}_i(\mathbf{r}, t)$  l'amplitude complexe du vecteur champ électrique rayonné en  $M$  par l'atome  $i$ . On note de même  $\underline{\mathbf{E}}_{\text{ref}}(\mathbf{r}, t)$  celle que rayonnerait en  $M$  un atome situé en  $O$ . Etablir que  $\underline{\mathbf{E}}_i(\mathbf{r}, t) = \underline{\mathbf{E}}_{\text{ref}}(\mathbf{r}, t)e^{(j\mathbf{Q}\cdot\mathbf{R}_i)}$  compte tenu des approximations.
- 3.4.2.** En déduire que l'expression de la puissance **moyenne** rayonnée par les  $N$  atomes, par unité d'angle solide, au voisinage du point  $M$  s'écrit  $\frac{dP_r}{d\Omega} |S(\mathbf{Q})|^2$  avec  $S(\mathbf{Q}) = \sum_{i=1}^N \exp(j\mathbf{Q}\cdot\mathbf{R}_i)$ ,  $\frac{dP_r}{d\Omega}$  étant défini à la question **B.3.1.3**.
- 3.4.3.** On suppose que les atomes sont disposés de manière aléatoire que  $N$  est grand et que  $L \gg \lambda$ , donner alors une expression simple de  $|S(\mathbf{Q})|^2$  et commenter.

## PARTIE C : Propagation guidée, fibres optiques.

Après avoir étudié le phénomène de réflexion totale à l'interface entre deux diélectriques, cette partie aborde le guidage des ondes électromagnétiques dans des fibres optiques à saut d'indice puis s'intéresse à deux causes de dispersion d'un signal dans une fibre optique.

Les milieux diélectriques étudiés dans cette partie sont supposés linéaires homogènes, isotropes, non absorbants, non magnétiques et isolants. La permittivité diélectrique du milieu est notée  $\epsilon$  et son indice  $n$ .

On considère  $R$  un référentiel **galiléen**, il est rapporté à trois axes orthogonaux  $Ox, Oy, Oz$ .  $(\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z)$  est la base orthonormée directe associée.

On rappelle que des données utiles à la résolution de certaines questions sont fournies au début du problème.

### 1. Le phénomène de réflexion totale.

On considère un dioptré plan ( $Oyz$ ) qui sépare deux milieux diélectriques d'indices différents  $n_1$  et  $n_2$ .

Une onde incidente plane, progressive, monochromatique, polarisée rectilignement perpendiculairement au plan d'incidence est caractérisée par son vecteur champ électrique qui s'écrit en notation complexe :  $\underline{\mathbf{E}}_i = E_0 e^{j(\omega t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r})} \mathbf{e}_y$  où  $\omega$  est la pulsation de l'onde,  $\lambda$  la longueur d'onde  **dans le vide**,  $\mathbf{k}_1 = k_{1x} \mathbf{e}_x + k_{1z} \mathbf{e}_z$  son vecteur d'onde et  $j^2 = -1$ . Comme l'indique la figure 5 le vecteur d'onde de l'onde incidente fait un angle  $\theta_1$  avec la normale  $\mathbf{e}_x$  au dioptré.

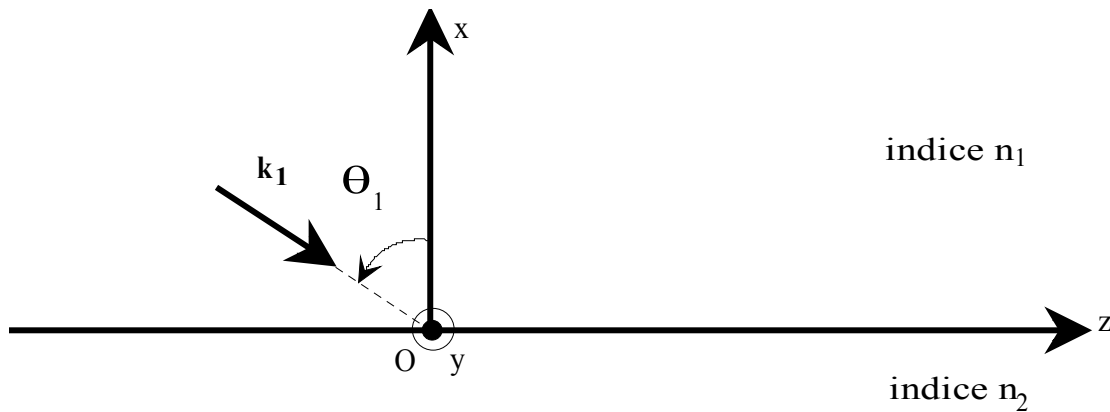


figure 5

Cette onde donne naissance à deux ondes :

- dans le milieu d'indice  $n_2$ , une onde transmise dont le vecteur champ électrique s'écrit en notation complexe :  $\underline{\mathbf{E}}_t = t_{\perp} E_0 e^{j(\omega t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r})} \mathbf{e}_y$  avec  $\mathbf{k}_2 = k_{2x} \mathbf{e}_x + k_{2z} \mathbf{e}_z$  et  $t_{\perp}$  le coefficient de transmission en amplitude complexe;
- dans le milieu d'indice  $n_1$ , une onde réfléchie dont le vecteur champ électrique s'écrit en notation complexe :  $\underline{\mathbf{E}}_r = r_{\perp} E_0 e^{j(\omega t - \mathbf{k}'_1 \cdot \mathbf{r})} \mathbf{e}_y$  avec  $\mathbf{k}'_1 = k'_{1x} \mathbf{e}_x + k'_{1z} \mathbf{e}_z$  et  $r_{\perp}$  le coefficient de réflexion en amplitude complexe.

## 1.1. Structure des ondes.

1.1.1. Donner les expressions des composantes des champs magnétiques associés aux ondes incidente, transmise et réfléchi en fonction de  $E_0$ ,  $\omega$ ,  $t$ ,  $\mathbf{r}$ ,  $\underline{t}_\perp$ ,  $\underline{r}_\perp$  et des composantes des vecteurs  $\mathbf{k}_1$ ,  $\mathbf{k}'_1$  et  $\mathbf{k}_2$ .

1.1.2. Préciser les expressions de  $k_1^2$ ,  $k_2^2$  et  $k_1'^2$  en fonction de  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $\omega$  et  $c$ .

1.1.3. Expliciter les composantes  $k_{1x}$  et  $k_{1z}$  en fonction de  $n_1$ ,  $\omega$ ,  $c$  et  $\theta_1$ .

1.1.4.

1.1.4.α. En utilisant les relations de continuité à l'interface entre les milieux, exprimer  $k'_{1z}$  et  $k_{2z}$  en fonction de  $n_1$ ,  $\omega$ ,  $c$  et  $\theta_1$ .

1.1.4.β. Donner les expressions de  $k'_{1x}$ ,  $\underline{t}_\perp$  et  $\underline{r}_\perp$  en fonction de  $k_{1x}$  et  $k_{2x}$ . Dans cette question on ne cherchera pas à déterminer  $k_{2x}$ .

## 1.2. Etude de la réflexion totale.

Rappeler la condition sur  $n_1$ ,  $n_2$  et  $\theta_1$  pour que l'on observe le phénomène de réflexion totale.

**On suppose cette condition satisfaite dans toute la suite de la question C.1.**

## 1.3. Etude de l'onde transmise dans le cas de la réflexion totale.

1.3.1. Déterminer  $k_{2x}$  en fonction de  $j$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $\omega$ ,  $c$  et  $\theta_1$ . On justifiera avec soin le choix du signe sachant que le milieu d'indice  $n_2$  occupe le demi-espace des  $x$  négatifs.

1.3.2. Décrire avec précision la structure de l'onde transmise.

1.3.3. Application numérique. Définir et évaluer une grandeur typique qui mesure l'atténuation de l'amplitude de l'onde transmise. On prendra  $n_1 \sin \theta_1 = 1,445$ ;  $n_2 = 1,443$  et  $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ .

1.3.4. Décrire une expérience qui met en évidence l'onde transmise.

## 1.4. Etude de l'onde réfléchi dans le cas de la réflexion totale.

1.4.1. Donner l'expression du coefficient de réflexion  $\underline{r}_\perp$  en amplitude complexe en fonction de  $j$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  et  $\theta_1$ .

1.4.2. Déterminer  $|\underline{r}_\perp|$  et  $\varphi_r = \arg(\underline{r}_\perp)$ . Tracer les courbes représentatives de ces deux grandeurs en fonction de  $\theta_1$  pour  $n_1 = 1,447$  et  $n_2 = 1,443$ . Précisez la valeur de  $\varphi_r$  pour  $n_1 \sin \theta_1 = 1,445$ .

## **2. Onde électromagnétique guidée dans une fibre optique.**

On va maintenant étudier la propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu tel que celui décrit au début de la PARTIE C, de forme cylindrique et d'axe  $Oz$ .

Parmi les divers modes de propagation possibles : transverses électriques ( T.E. ), transverses magnétiques ( T.M. ) et hybrides ( H.E. ou E.H. ), on se limitera dans un premier temps à l'étude des modes ( T.E. ).

## 2.1. Onde transverse électrique.

Dans le cas d'une onde ( T.E. ), le champ électrique  $\mathbf{E}$  est partout perpendiculaire à Oz. Il s'écrit en notation complexe :  $\underline{\mathbf{E}} = \mathbf{E}_s(r, \varphi) e^{j(\omega t - \beta z)}$  avec  $\mathbf{E}_s(r, \varphi) \cdot \mathbf{e}_z = 0$ . Par contre le champ magnétique  $\mathbf{B}$  n'est pas transverse, il s'écrit en notation complexe :  $\underline{\mathbf{B}} = \mathbf{B}_s(r, \varphi) e^{j(\omega t - \beta z)} + B_z(r, \varphi) \mathbf{e}_z e^{j(\omega t - \beta z)}$  avec  $\mathbf{B}_s(r, \varphi) \cdot \mathbf{e}_z = 0$  et  $j^2 = -1$ .

Un point M est repéré par ses coordonnées cylindriques ( r, φ, z), on pourra se référer à la figure 1 du début de l'énoncé du problème. On précise que β est réel positif et  $\mu_0 \epsilon \omega^2 \neq \beta^2$ . ω est la pulsation de l'onde et λ sa longueur d'onde **dans le vide**.

2.1.1. En utilisant les équations de Maxwell, ainsi que les formules d'analyse vectorielle rappelées dans les données regroupées au début du problème, établir les relations :

$$\mathbf{E}_s = j \frac{\omega \mathbf{e}_z \wedge \mathbf{grad} B_z}{\mu_0 \epsilon \omega^2 - \beta^2} \quad \text{et} \quad \mathbf{B}_s = -j \frac{\beta \mathbf{grad} B_z}{\mu_0 \epsilon \omega^2 - \beta^2}.$$

2.1.2. En utilisant l'équation de propagation relative à  $\mathbf{B}$  projetée selon z, montrer que  $B_z$  vérifie l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial B_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 B_z}{\partial \varphi^2} + \left( -\beta^2 + \frac{\omega^2 n^2}{c^2} \right) B_z = 0.$$

2.1.3. On cherche une solution à l'équation précédente sous la forme  $B_z = F(r)G(\varphi)$  ; F(r) est une fonction de la variable r et G(φ) une fonction de la variable φ. Montrer que F(r) vérifie

$$\text{l'équation différentielle} \quad \frac{d^2 F}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF}{dr} + \left( -\frac{m^2}{r^2} - \beta^2 + \frac{\omega^2 n^2}{c^2} \right) F = 0 \quad \text{où } m \text{ est un entier}$$

naturel. Préciser la structure de la fonction G(φ).

## 2.2. Etude d'une fibre optique à saut d'indice.

On désire appliquer les résultats précédents à l'étude d'une fibre optique à saut d'indice formée d'un cœur diélectrique cylindrique de rayon a, d'indice  $n_1$  et d'une gaine diélectrique de grand rayon, d'indice  $n_2$  légèrement inférieur à  $n_1$ . Elle est décrite sur la figure 6.

gaine d'indice  $n_2$

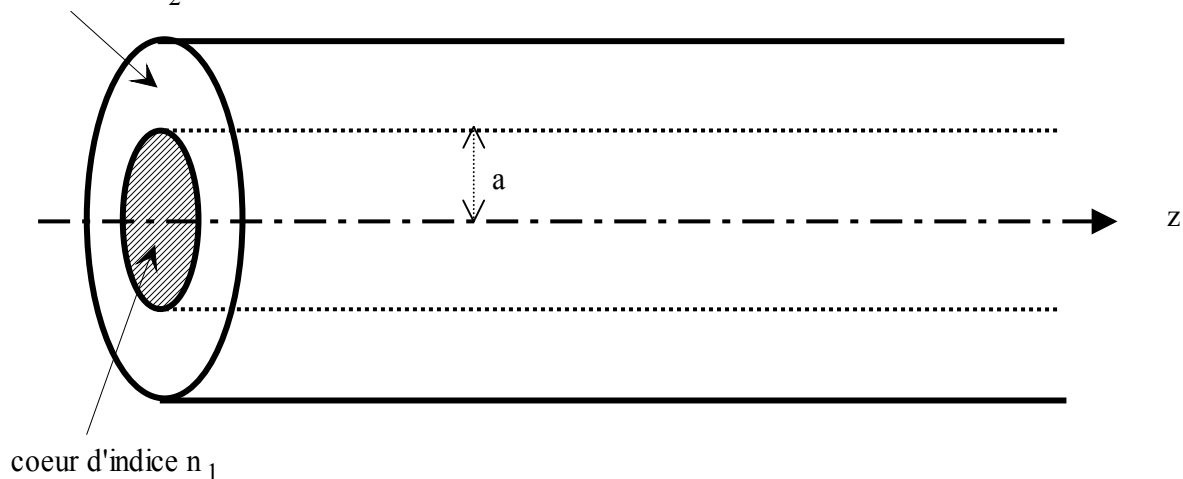


figure 6 ( l'échelle transversale n'est pas respectée )

Une onde électromagnétique est guidée si  $\frac{\omega^2 n_1^2}{c^2} - \beta^2 > 0$  et  $\frac{\omega^2 n_2^2}{c^2} - \beta^2 < 0$ .

On pose  $\frac{u^2}{a^2} = \frac{\omega^2 n_1^2}{c^2} - \beta^2$ ,  $\frac{v^2}{a^2} = \beta^2 - \frac{\omega^2 n_2^2}{c^2}$  et  $V^2 = u^2 + v^2$ .  $V$ ,  $u$  et  $v$  sont des quantités

positives.

Par analogie avec les notations précédentes, les champs électromagnétiques sont définis de la manière suivante :

- dans le cœur ( $r < a$ ) :

$$\underline{\mathbf{E}}_1 = \mathbf{E}_{S1}(r, \varphi) e^{j(\omega t - \beta z)} \text{ et } \underline{\mathbf{B}}_1 = \mathbf{B}_{S1}(r, \varphi) e^{j(\omega t - \beta z)} + B_{z1}(r, \varphi) \mathbf{e}_z e^{j(\omega t - \beta z)} \text{ avec}$$

$$\mathbf{E}_{S1}(r, \varphi) \cdot \mathbf{e}_z = 0, \mathbf{B}_{S1}(r, \varphi) \cdot \mathbf{e}_z = 0.$$

- dans la gaine ( $r > a$ ) :

$$\underline{\mathbf{E}}_2 = \mathbf{E}_{S2}(r, \varphi) e^{j(\omega t - \beta z)} \text{ et } \underline{\mathbf{B}}_2 = \mathbf{B}_{S2}(r, \varphi) e^{j(\omega t - \beta z)} + B_{z2}(r, \varphi) \mathbf{e}_z e^{j(\omega t - \beta z)} \text{ avec}$$

$$\mathbf{E}_{S2}(r, \varphi) \cdot \mathbf{e}_z = 0, \mathbf{B}_{S2}(r, \varphi) \cdot \mathbf{e}_z = 0.$$

**2.2.1.** Vérifier que  $B_{z1}(r, \varphi) = B_{01} J_m(u \frac{r}{a}) \cos(m\varphi)$  est solution de l'équation différentielle de la question **C.2.1.2.** écrite pour le cœur d'indice  $n_1$ .  $J_m(x)$  est la fonction de Bessel de première espèce d'ordre  $m$  dont quelques propriétés sont rappelées dans les données regroupées au début du problème.

On **admet** de même que  $B_{z2}(r, \varphi) = B_{02} K_m(v \frac{r}{a}) \cos(m\varphi)$  est solution de l'équation différentielle de la question **C.2.1.2.** écrite pour la gaine d'indice  $n_2$ .  $K_m(x)$  est la fonction de Bessel modifiée de deuxième espèce d'ordre  $m$  dont quelques propriétés sont rappelées dans les données regroupées au début du problème.

**2.2.2.** Analyse des relations de passage à l'interface gaine - cœur.

**2.2.2.α.** Rappeler les relations de passage relatives au vecteur champ électrique en  $r = a$ . On ne cherchera pas à calculer explicitement les composantes des vecteurs champs électriques.

**2.2.2.β.** Rappeler de même celles relatives au vecteur champ magnétique en  $r = a$ . On ne cherchera pas à calculer explicitement les composantes des vecteurs champs magnétiques.

On **admet** alors que l'on peut déduire de ces relations que  $m = 0$  et que  $u$  et  $v$  vérifient la relation

suivante :

$$\frac{1}{u} \frac{J_1(u)}{J_0(u)} = -\frac{1}{v} \frac{K_1(v)}{K_0(v)}.$$

### 2.2.3. Notion de mode.

Les courbes de la figure 7 représentent d'une part la fonction  $\frac{1}{u} \frac{J_1(u)}{J_0(u)}$  et d'autre part la fonction

$$-\frac{1}{\sqrt{V^2 - u^2}} \frac{K_1(\sqrt{V^2 - u^2})}{K_0(\sqrt{V^2 - u^2})} \text{ pour } V = 12,9.$$

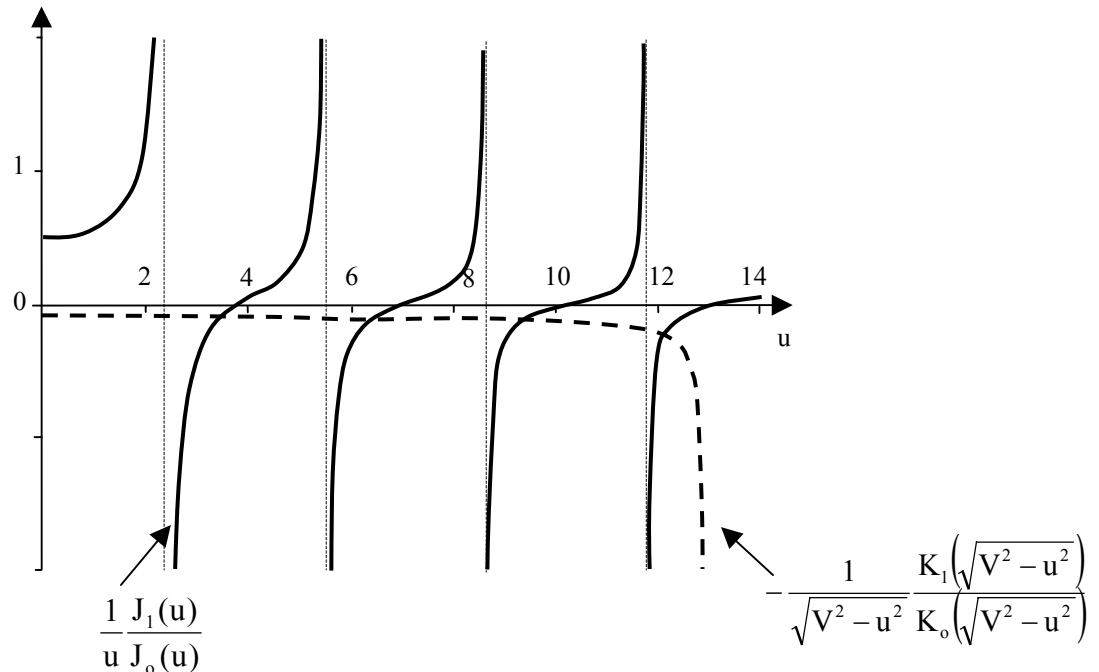


figure 7

**2.2.3.α.** Déterminer la valeur de  $a$  sachant que  $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$  ;  $n_1 = 1,447$  et  $n_1 - n_2 = 4 \cdot 10^{-3}$ .

**2.2.3.β.** Dénumérer le nombre de modes ( T.E. ) possibles dans cette fibre.

**2.2.3.γ.** En remarquant que l'on a toujours  $u$  inférieure à  $V$ , montrer qu'il existe une longueur d'onde de coupure  $\lambda_C$  au dessus de laquelle la propagation d'un mode ( T.E. ) est impossible.

**2.2.3.δ.** Calculer  $\lambda_C$  pour  $a = 4,5 \mu\text{m}$  ;  $n_1 = 1,447$  et  $n_1 - n_2 = 4 \cdot 10^{-3}$ . On utilise cette fibre avec une longueur d'onde  $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ , calculer  $V$  et conclure.

### 3. Dispersion dans une fibre optique.

Les fibres optiques permettent d'acheminer des signaux électromagnétiques. Elles sont très utilisées dans le domaine des télécommunications et des propriétés comme l'atténuation et la dispersion sont très importantes.

Nous nous proposons d'aborder dans cette question l'étude de deux causes de dispersion.

On admet qu'il existe un mode de propagation dit hybride noté  $HE_{11}$ , qui existe à toute longueur d'onde ( alors que tous les autres modes possèdent une longueur d'onde de coupure ).

Une relation de structure semblable mais différente de celle de la question C.2.2.2. relie  $u$  et  $v$ , grandeurs définies à la question C.2.2. On ne cherchera pas à établir cette relation.

On se place dans le cas où seul le mode  $HE_{11}$  est susceptible de se propager, la fibre est alors dite monomode.

### 3.1. Définition de la dispersion.

3.1.1. Définir la vitesse de phase de l'onde électromagnétique en fonction de  $\omega$  et  $\beta$ .

3.1.2. Définir de même la vitesse de groupe  $v_g$  en fonction de  $\omega$  et  $\beta$ . En donner la signification physique.

Dans une fibre optique de longueur  $L$ , le temps de propagation de groupe  $\tau_g = \frac{L}{v_g}$  est le temps mis par un signal quasi monochromatique pour parcourir la longueur  $L$  de la fibre. On définit alors le coefficient de dispersion  $D$  de la fibre par la relation :  $D = \frac{1}{L} \frac{d\tau_g}{d\lambda}$ .

### 3.2. Dispersion due au matériau.

Pour évaluer la dispersion  $D_m$  due au matériau diélectrique, on suppose que  $\beta \approx \frac{2\pi}{\lambda} n_1$ . L'indice  $n_1$  du cœur de la fibre dépend de la longueur d'onde  $\lambda$  dans le vide de l'onde électromagnétique.

3.2.1. Expliciter la vitesse de groupe en fonction de  $c$ , vitesse la lumière dans le vide,  $\lambda$ ,  $n_1$  et  $\frac{dn_1}{d\lambda}$ .

3.2.2. En déduire l'expression de  $D_m$  en fonction de  $c$ ,  $\lambda$  et  $\frac{d^2n_1}{d\lambda^2}$ .

3.2.3. Evaluer numériquement  $D_m$  pour de la silice pure sachant que, pour  $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ ,  $\frac{d^2n_1}{d\lambda^2} = -7,5 \cdot 10^8 \text{ m}^{-2}$ . On donnera  $D_m$  en  $\text{ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ .

### 3.3. Dispersion due au guide.

On suppose dans cette question que les indices  $n_1$  et  $n_2$  ne dépendent pas de la longueur d'onde  $\lambda$  dans le vide.

On pose  $B = \frac{v^2}{V^2}$ ,  $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_2}$ ,  $\frac{u^2}{a^2} = \frac{\omega^2 n_1^2}{c^2} - \beta^2$ ,  $\frac{v^2}{a^2} = \beta^2 - \frac{\omega^2 n_2^2}{c^2}$  et  $V^2 = u^2 + v^2$ .

On suppose  $\Delta \ll 1$ .

3.3.1. Etablir la relation :  $\beta \approx \frac{2\pi}{\lambda} n_2 (1 + B\Delta)$ . On pourra commencer par évaluer  $B$ .

3.3.2. En déduire que  $\frac{1}{v_g} \approx \frac{n_2}{c} \left( 1 + \Delta \frac{d(VB)}{dV} \right)$ .

3.3.3. Donner enfin l'expression de la dispersion  $D_G$  due au guide en fonction de  $c$ ,  $\lambda$ ,  $n_1 - n_2$  et  $V \frac{d^2(VB)}{dV^2}$ .

**3.3.4.** Evaluer numériquement  $D_G$  en  $\text{ps.km}^{-1}.\text{nm}^{-1}$  pour  $n_1-n_2 = 4.10^{-3}$ ,  $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$  en sachant que  $V = 2,32$  et  $V \frac{d^2(\text{VB})}{dV^2} \approx 0,24$ .

### **3.4. Conclusion**

On étudie une liaison par fibre optique d'une longueur de  $L = 100 \text{ km}$ , la source lumineuse est une diode laser de longueur d'onde  $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$  et de largeur spectrale  $\Delta\lambda = 0,1 \text{ nm}$ .

**3.4.1.** Dans le cas où l'on ne prend en compte qu'une seule cause de dispersion, évaluer le débit maximal de cette liaison. On l'exprimera en bit/s.

**3.4.2.** Que peut-on espérer pouvoir réaliser en prenant en compte ces deux causes de dispersion ?

## Rapport sur la composition de physique

Le thème de la composition de physique porte cette année sur l'électromagnétisme. Il est illustré par de nombreuses applications. Dans son esprit, cette épreuve est toujours celle d'une « longue question de cours » qui vise à valoriser le travail de synthèse des connaissances fait par les candidats pendant l'année de préparation au concours.

Les notions abordées recouvrent largement les thèmes de plusieurs leçons de physique, telle que celles concernant le rayonnement dipolaire électrique, la réflexion d'une onde électromagnétique à la surface de séparation entre deux milieux diélectriques ou la propagation dans un milieu dispersif. Seule, une préparation méthodique à l'épreuve orale intitulée « leçon de physique » permet d'aborder avec succès les questions abordées au cours de la composition de physique.

Par sa progressivité, cette épreuve permet de « bien » classer les candidats. Elle révèle cette année que certains d'entre eux n'ont qu'une connaissance très superficielle de l'électromagnétisme et que d'autres maîtrisent bien l'essentiel des questions.

Le barème de l'épreuve valorise de manière significative les questions où des commentaires qualitatifs doivent être formulés. Nous invitons donc les candidats à bien rédiger ce type de questions, et à montrer leur aptitude à exprimer et à traduire une pensée à l'aide de phrases et non uniquement à l'aide d'équations.

Enfin, certaines questions permettent aussi de juger l'aptitude à conduire un calcul. Lorsque la réponse est fournie, afin de permettre aux candidats de continuer la suite du problème, le jury est très attentif à la démarche utilisée pour établir le résultat donné. Il est important que les candidats fassent preuve de rigueur et d'honnêteté et évitent d'oublier tel ou tel terme gênant dans l'expression d'un champ ou d'un potentiel.

### • **Partie A : Electromagnétisme et relativité.**

D'une façon générale, cette partie montre qu'un certain nombre de candidats maîtrise mal les opérateurs comme la divergence ou le gradient. En particulier, il arrive souvent que l'expression de la divergence d'un champ ne soit pas connue, même en coordonnées cartésiennes.

**1.1.** Il faut ici évoquer clairement le principe d'inertie.

**1.2.** On note beaucoup d'erreurs dans l'expression du champ électrique en fonction des potentiels.

**2.1.** Si l'expression de la force de Lorentz est bien connue, la formule élémentaire de transformation des vitesses donne lieu à de fréquentes fautes de signe. Les lois de transformation des champs s'obtiennent en utilisant l'invariance de la force en mécanique galiléenne.

**2.2.** On note beaucoup d'erreurs de signe dans la relation entre  $x'$  et  $x$  mais également et de manière plus surprenante des fautes dans celle liant  $ct'$  à  $ct$ , fautes qui remettent ainsi en cause le caractère universel du temps en mécanique galiléenne.

L'étude de l'éventuelle invariance des équations de Maxwell-Gauss et de Maxwell relative au flux magnétique, nécessite la prise en compte simultanée de la transformation des champs et de celle des coordonnées d'espace.

**2.3.** Pour les calculs des champs électrique et magnétique, il est souhaitable d'utiliser les théorèmes de Gauss et d'Ampère après analyse des symétries.

L'utilisation simultanée des lois de l'électromagnétisme et de la mécanique conduit à conclure à l'existence de difficultés.

**3.1.** L'énoncé du principe de relativité doit explicitement contenir l'idée de l'invariance des lois de la physique par changement de référentiel galiléen. Beaucoup d'erreurs, de signe en particulier, ont été relevées à propos de la transformation de Lorentz-Poincaré.

Les invariances des équations de Maxwell sont rarement étudiées correctement.

Il est nécessaire de conclure que l'utilisation de la transformation de Lorentz-Poincaré permet de lever les difficultés précédentes.

Dans la question **3.2.3.β.** les candidats évoquent souvent à bon escient la « contraction des longueurs » mais en font une présentation confuse.

## • **Partie B : Rayonnement dipolaire et applications.**

### **1. Etude du rayonnement du dipôle électrique.**

Dans d'assez nombreux cas, les commentaires qualitatifs des inégalités  $r \gg a$  et  $\lambda \gg a$  manquent de pertinence.

Les calculs, qui peuvent être menés avec rigueur et sans lourdeur excessive, donnent lieu à des développements laborieux, souvent faux et parfois volontairement tronqués. Pour le calcul des champs, l'importance relative de chaque terme doit être évaluée en tenant compte de l'inégalité  $r \gg \lambda$  ( zone de rayonnement ). Enfin les candidats qui utilisent l'opérateur symbolique nabla «  $\nabla$  » doivent en connaître les règles d'utilisation en coordonnées sphériques.

L'étude énergétique est dans l'ensemble bien commencée à l'aide du vecteur de Poynting mais beaucoup d'erreurs sont commises ensuite pour établir l'expression de  $\frac{dP}{d\Omega}$ .

Rappelons que le vecteur de Poynting sert, par son flux, à évaluer la puissance rayonnée.

L'allure du diagramme de rayonnement est souvent correcte.

### **2. Rayonnement par une antenne.**

**2.1.** La démonstration de la relation entre  $I(t)$  et  $p(t)$  se limite trop souvent à une analyse dimensionnelle. Un traitement correct utilise la notion d'élément de courant en A.R.Q.S.

Les applications numériques relatives au champ rayonné par un téléphone portable donnent parfois des valeurs surprenantes : par exemple un champ électrique de  $400 \text{ kV.m}^{-1}$  !

**2.2.** L'expression du champ électrique de la question **2.2.2.β.** est rarement établie de manière pleinement satisfaisante. Il est nécessaire d'étudier l'amplitude, la direction et la phase de l'onde. Pour le terme de phase, il faut garder l'ordre 1 en  $\frac{Z}{r}$  du développement limité de  $\|\mathbf{PM}\|$  et justifier la possibilité de négliger l'ordre 2.

Le caractère stationnaire de l'onde résultant de l'interférence entre l'onde incidente et l'onde réfléchi par un immeuble est fréquemment reconnu. Mais la séparation effective des variables spatiale et temporelle est rarement effectuée correctement.

L'étude des difficultés liées à la réception d'un signal en téléphonie mobile est peu abordée.

### **3. Diffusion d'une onde électromagnétique par un atome.**

**3.1.** Les questions qualitatives sont souvent mal traitées. Notons par exemple que :

- l'inégalité  $\|\mathbf{r}_e\| \ll \lambda$  permet de supposer que le champ électromagnétique est uniforme à l'échelle de l'atome ;
- les champs électrique et magnétique sont des grandeurs de nature différente. La seule comparaison de leurs intensités ne permet pas de conclure quant à l'importance des effets de l'un ou de l'autre ;
- on ne peut pas se limiter à une analyse dimensionnelle pour interpréter le terme et la notion de section efficace.

**3.2.** La polarisation par diffusion est rarement correctement traitée. Mais de nombreux candidats savent décrire une expérience illustrative.

**3.3.** Si l'application à l'étude de l'atmosphère terrestre est parfois abordée de façon satisfaisante, les commentaires qualitatifs sont rarement pertinents.

**3.4.** Cette partie un peu délicate sur l'étude d'un milieu dilué n'est pratiquement jamais abordée avec profit.

## **• Partie C : Propagation guidée, fibres optiques.**

### **1. Le phénomène de réflexion totale.**

Il s'agit de préciser la structure des champs dans le phénomène de réflexion totale. Plusieurs candidats indiquent qu'ils ne comprennent pas pourquoi on s'intéresse alors au champ de l'onde transmise !

1.1. Une interprétation correcte nécessite l'introduction d'un vecteur  $\mathbf{k}_2$  complexe. En revanche, l'introduction d'un angle de réfraction  $\theta_2$  n'est pas judicieuse.

1.2. La condition attendue est une inégalité.

1.3. Les questions quantitatives sont rarement abordées de manière exacte. De nombreux candidats citent l'existence d'une onde évanescente et décrivent correctement une expérience de réflexion frustrée.

## 2. Onde électromagnétique guidée dans une fibre optique.

2.1. La question 2.1.1. est un peu délicate. Elle nécessite en effet une bonne maîtrise des opérateurs vectoriels et une étude méthodique des directions des grandeurs vectorielles qui apparaissent à chaque étape des calculs. Elle n'est pratiquement jamais traitée.

La question 2.1.3. est fréquemment abordée par les candidats de manière superficielle. Pour la traiter de manière satisfaisante, il faut, sous une forme ou sous une autre, séparer les variables  $r$  et  $\varphi$  et invoquer la périodicité de la fonction  $G(\varphi)$ .

2.2. Cette partie vise à introduire la notion de mode de propagation dans une fibre optique à saut d'indice. Les deux premières questions sont fréquemment traitées de manière trop rapide : la vérification de la solution n'est alors pas bien conduite et les relations de passage contiennent de fréquentes erreurs ou imprécisions.

## 3. Dispersion dans une fibre optique.

Les deux premières questions sont souvent traitées avec succès montrant que les notions de vitesses de phase et de groupe sont bien connues. En revanche, le reste de cette partie est rarement abordé.

### • Conclusion

La composition de physique à l'agrégation est une épreuve longue, mais de difficulté très graduelle et parfaitement accessible à un candidat bien préparé. Il est donc indispensable que les futurs candidats effectuent un travail de synthèse de leurs connaissances. Ce n'est qu'à cette condition que l'année de préparation leur permettra d'aborder avec succès l'épreuve de composition de physique.

Enfin, le jury tient à souligner qu'il a eu le plaisir de corriger d'excellentes copies, bien rédigées et contenant des commentaires physiques pertinents.

4354-A

**28532**  
repère à reporter sur la copie

**SESSION DE 2003**

**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.*

**Tournez la page S.V.P.**

*Cette épreuve traite de quelques aspects de la chimie du soufre : elle est constituée de parties complètement indépendantes.*

*Du papier millimétré est mis à la disposition des candidats.*

## **Données numériques :**

*Constantes fondamentales :*

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

Constante d'Avogadro :  $N_A = 6,023.10^{23} \text{ mol}^{-1}$

On prendra :  $\frac{R.T}{F} \ln 10 = 0,06V$  à  $25^\circ\text{C}$

$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$

*Grandeur de référence :*

Pression standard :  $P^\circ = 1 \text{ bar} = 1,0.10^5 \text{ Pa}$

*Masses molaires atomiques :*

Élément	C	S	Fe	Cu
Masses molaires atomiques ( $\text{g.mol}^{-1}$ )	12,00	32,06	55,85	63,55

*Grandeurs thermodynamiques :*

On donne la température de fusion, et à 900K l'enthalpie libre standard de formation, et l'enthalpie de formation des composés suivants :

	Cu	CuO	Cu <sub>2</sub> O	CuSO <sub>4</sub>	CuS	Cu <sub>2</sub> S	O <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
$T_F(\text{K})$	1356	1599	1508			1373		
$\Delta_f G^\circ (\text{kJ.mol}^{-1})$	0	-75	-103	-438	-47	-101	0	-296
$\Delta_f H^\circ (\text{kJ.mol}^{-1})$	0	-151	-168	-820	-113	-130	0	-362

*Potentiels standard d'oxydo-réduction :*

	O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	H <sup>+</sup> (aq)/H <sub>2</sub>	I <sub>3</sub> <sup>-</sup> /I <sup>-</sup>	S <sub>4</sub> O <sub>6</sub> <sup>2-</sup> /S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
$E^\circ(\text{V})$	1,23	0,00	0,54	0,08

*Constantes d'acidité:*

CO<sub>2</sub>            pKa<sub>1</sub> = 6,2        pKa<sub>2</sub> = 10,3  
H<sub>2</sub>S             pKa<sub>1</sub> = 7,0        pKa<sub>2</sub> = 12,9

## Partie A

### Le soufre et les sulfures

#### I. Le soufre

Le soufre, le sélénium, le tellure et le polonium font partie de la même famille que l'oxygène dans la classification périodique. On donne les numéros atomiques :

Elément	O	S	Se	Te	Po
Z	8	16	34	52	84

I.1. Donner les configurations électroniques du soufre et du sélénium.

I.2. Les composés hydrogénés de ce groupe ont des températures de fusion qui sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub> Se	H <sub>2</sub> Te
T <sub>F</sub> (°C)	0	-85,5	-65,7	-49

- Comment justifier la grande différence des valeurs de T<sub>F</sub> entre H<sub>2</sub>O et H<sub>2</sub>S ?
- Comment justifier l'augmentation de la température de fusion de H<sub>2</sub>S à H<sub>2</sub>Te ?

I.3. Les éléments de ce groupe peuvent se combiner aux halogènes : on connaît en particulier SF<sub>4</sub>, SeF<sub>4</sub>, TeF<sub>4</sub>, alors que l'oxygène ne peut pas donner OF<sub>4</sub>. Expliquer ce résultat. Donner un schéma de Lewis pour SF<sub>4</sub> et proposer une géométrie, en la justifiant.

Le soufre possède plusieurs formes allotropiques. La forme stable au-dessous de 98°C est le soufre α. Il est soluble dans le sulfure de carbone CS<sub>2</sub> sous forme de molécules S<sub>x</sub> (constituées de x atomes de soufre), dont on peut déterminer la formule par ébulliométrie.

I.4. *Principe de la méthode :*

- Dans un système thermodynamique fermé, sans réaction chimique, G représentant la fonction enthalpie libre, H la fonction enthalpie, démontrer la relation de Gibbs-Helmholtz:

$$\left( \frac{\partial \left( \frac{G}{T} \right)}{\partial T} \right)_P = -\frac{H}{T^2}$$

- En déduire la relation suivante, où μ<sub>i</sub> représente le potentiel chimique du constituant A<sub>i</sub> dans un mélange, et H<sub>i</sub> son enthalpie molaire partielle :

$$\left( \frac{\partial \left( \frac{\mu_i}{T} \right)}{\partial T} \right)_{P, n_i} = -\frac{H_i}{T^2}$$

- c. Soit une solution liquide *diluée* de B dans un solvant A, en équilibre à la température T avec A vapeur sous une pression  $P^\circ = 1\text{ bar}$  (on négligera la présence de B dans la vapeur). On donne pour le solvant A sa température d'ébullition  $T_a$  et  $\Delta_{\text{vap}}H^\circ$ , son enthalpie molaire standard de vaporisation. En écrivant l'égalité du potentiel chimique de A dans les deux phases, et en appelant  $x_B$  la fraction molaire de B dans le mélange supposé idéal, montrer que :

$$x_B \approx \frac{\Delta_{\text{vap}}H^\circ}{R T_a^2} (T - T_a)$$

I.5. *Application* : On dissout 3,795g de soufre  $S_x$  dans 100,00g de sulfure de carbone  $CS_2$ . On donne pour ce solvant:  $T_a = 46,30^\circ\text{C}$  et  $\Delta_{\text{vap}}H^\circ = 25,08\text{ kJ/mol}$ . Cette solution bout à  $46,66^\circ\text{C}$  sous 1 bar.

Quelle est la formule de la molécule de soufre en solution ?

## II. Les sulfures : structure de la chalcopyrite

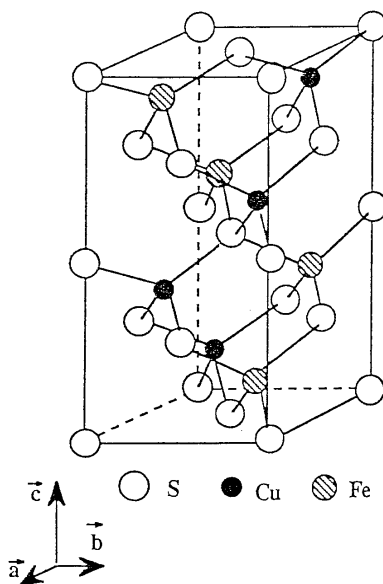
La chalcopyrite est un sulfure de fer et de cuivre ; c'est l'un des principaux minerais du cuivre. Sa structure dérive de celle de la blende  $ZnS$ .

II.1. Donner la configuration électronique du cuivre ( Cu : Z = 29 ) .

II.2. Quels sont les ions les plus courants du fer (Fe : Z = 26) ? Donner leur configuration électronique.

II.3. Expérimentalement, quelle méthode utilise-t-on pour déterminer les paramètres de maille d'une structure cristalline ?

II.4. La structure de la chalcopyrite est la suivante:

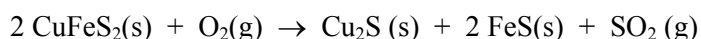


- Quelle est la coordinence de chaque ion du réseau ?
- Montrer que la formule de la chalcopyrite est  $CuFeS_2$ .
- Quels sont les ions constitutifs de la chalcopyrite ? Montrer que les deux solutions ( $FeS + CuS$ ) et  $\frac{1}{2} (Cu_2S + Fe_2S_3)$  sont compatibles avec la formule de la chalcopyrite.

- d. Les paramètres de maille sont :  $a = b = 529 \text{ pm}$  et  $c = 1042 \text{ pm}$ . Calculer la masse volumique.
- e. Sachant que les ions sulfure ont un rayon de  $180 \text{ pm}$ , la structure formée par les anions est-elle compacte ?
- f. Quel est le rayon maximal d'un cation s'insérant dans un site tétraédrique du réseau d'ions sulfure, en considérant ce dernier comme parfaitement cubique ?

### III. Grillage des sulfures

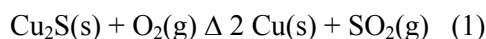
La première opération de la métallurgie du cuivre est le grillage de la chalcopirite, qui s'écrit:



III.1. En utilisant un raisonnement basé sur les nombres d'oxydation, montrer que cette réaction ne permet pas de déterminer la nature des ions du cuivre et du fer dans la chalcopirite (voir question II.4.c.).

III.2. On s'intéresse désormais au grillage de  $\text{Cu}_2\text{S}$ . L'étude de cette opération est complexe en raison de l'existence de nombreuses réactions possibles entre le cuivre, le soufre et l'oxygène. Le diagramme représentant  $\log P(\text{SO}_2)$  en fonction de  $\log P(\text{O}_2)$  pour différents équilibres entre espèces solides du cuivre,  $\text{O}_2$  gazeux et  $\text{SO}_2$  gazeux est fourni en annexe ( annexe I) pour une température de  $900\text{K}$ . Les pressions sont mesurées en bar, et les phases solides sont supposées non-miscibles.

- a. On étudie tout d'abord le couple  $\text{Cu}_2\text{S}/\text{Cu}$ , pour lequel on peut écrire la réaction :



Quelle est la variance de cet équilibre ? Commenter la valeur obtenue.

- b. Déterminer la constante de l'équilibre (1).  
En déduire l'équation numérique de la droite représentant les variations de  $\log P(\text{SO}_2)$  en fonction de  $\log P(\text{O}_2)$ .
- c. Montrer que cette droite sépare le diagramme en deux domaines d'existence pour les espèces solides : quelle est l'espèce stable au-dessus de cette droite (1) ? (une démonstration précise est attendue).

III.3. Les autres espèces présentes dans ce diagramme simplifié sont  $\text{CuO}$  et  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuS}$  et  $\text{CuSO}_4$ .

- a. Justifier les valeurs des pentes pour les équilibres (2) :  $\text{CuS}/\text{Cu}_2\text{S}$  ; (3) :  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}$  ; (4) :  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}_2\text{S}$  ; (5) :  $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CuSO}_4$ .
- b. Identifier les espèces A, B, C, D, E, F sur le diagramme fourni en annexe I.

III.4. Un des procédés possibles pour le grillage de  $\text{Cu}_2\text{S}$  est le "grillage sulfatant" : le but est d'obtenir du sulfate de cuivre, soluble dans l'eau, qui sera traité ensuite par hydrométallurgie.

- a. Sachant que la pression de l'oxygène est  $P(\text{O}_2) = 0,2 \text{ bar}$ , estimer la pression de  $\text{SO}_2$  correspondant à l'obtention de  $\text{CuSO}_4$ .
- b. Dans l'hydrométallurgie, comment obtient-on ensuite le cuivre métallique ? (On donnera une réponse succincte)

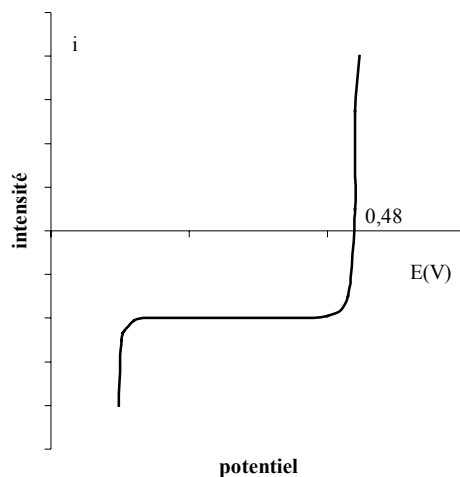
III.5. Le diagramme montre qu'il est possible d'obtenir du cuivre à partir de  $\text{Cu}_2\text{S}$  et  $\text{Cu}_2\text{O}$ .

- a. Ecrire la réaction correspondante (on fera intervenir un nombre stœchiométrique de 1 pour  $\text{SO}_2$ .)
- b. Déterminer, par lecture sur le diagramme, la pression de  $\text{SO}_2$  à l'équilibre.
- c. Quelle est l'influence de la température sur l'équilibre ?
- d. Sur quel(s) autre(s) facteur(s) peut-on jouer pour favoriser la formation de cuivre ?
- e. Dans la pratique, on travaille un peu au-dessus de  $1356 \text{ K}$ : pourquoi ?

#### IV. Dosage par le thiosulfate :

IV.1. Les solutions de  $I_3^-$  peuvent être titrées par le thiosulfate en utilisant une méthode électrochimique, dont on se propose d'étudier le principe.

On considère le couple  $I_3^-/I^-$ . La courbe intensité-potential enregistrée pour ce couple à l'aide d'une électrode de platine plongeant dans une solution aqueuse de diiode  $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$  préparée dans une solution de KI à  $1 \text{ mol/L}$  est représentée ci-dessous. Par convention, l'intensité du courant est comptée positivement si l'électrode de platine fonctionne en anode, et négativement si elle fonctionne en cathode.

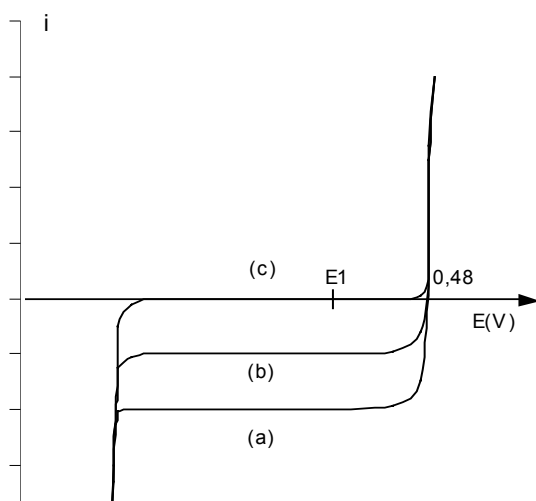


- Déterminer le potentiel d'équilibre de la solution au départ.
- Quelles sont les espèces susceptibles d'être oxydées si l'électrode fonctionne en anode ? Quelles sont les espèces susceptibles d'être réduites si l'électrode fonctionne en cathode ?
- Interpréter l'allure de cette courbe (pour  $i > 0$  et pour  $i < 0$ ). Pourquoi n'observe-t-on pas de palier sur la partie droite de la courbe ? Que peut-on dire de la rapidité du système  $I_3^-/I^-$  sur électrode de platine ?

IV.2. Lors du titrage de la solution de  $I_3^-$  par le thiosulfate, on enregistre les courbes intensité-potential à différents stades du dosage, pour différents volumes  $v'$  de solution de thiosulfate versé ; on obtient le réseau de courbes ci-dessous obtenues pour :

- $v' = 0$
- $v' = v'_{\text{éq}}/2$
- $v' = v'_{\text{éq}}$

en notant  $v'_{\text{éq}}$  le volume versé à l'équivalence. On précise que le système  $S_4O_6^{2-}/S_2O_3^{2-}$  est un système lent :  $S_4O_6^{2-}$  n'est pas électroactif, et  $S_2O_3^{2-}$  n'est oxydé en  $S_4O_6^{2-}$  qu'à un potentiel d'environ  $0,6 \text{ V}$ .



- Justifier l'allure de ces trois courbes.
- Quelle serait l'allure des courbes après le point équivalent ?
- On peut réaliser un dosage ampérométrique consistant à imposer une différence de potentiel entre l'électrode de travail en platine et une électrode de référence. Soit  $E_1$  le potentiel de l'électrode de platine. Tracer dans ce cas l'allure de la courbe  $i = f(v')$ , où  $v'$  est le volume de thiosulfate ajouté.
- On peut également réaliser une potentiométrie à intensité nulle : on mesure la différence de potentiel entre l'électrode de travail en platine et une électrode de potentiel sensiblement constant. Donner l'allure de la courbe  $\Delta E = f(v')$ .

## **V. Les tellures**

Certains sulfures et tellures sont utilisés dans la micro-électronique. Cette partie aborde certains aspects de l'oxydo-réduction des tellures en solution aqueuse.

On considère le tellure solide, soit  $\text{Te(s)}$ , et ses ions  $\text{Te}_2^{2-}$  et  $\text{Te}^{2-}$ .

On donne les potentiels standard des systèmes rédox du tellure :

$$E^\circ(\text{Te(s)}/\text{Te}_2^{2-}) = -0,84 \text{ V} \quad E^\circ(\text{Te}_2^{2-}/\text{Te}^{2-}) = -1,02 \text{ V}$$

Les  $\text{pK}_a$  de  $\text{H}_2\text{Te}$  et  $\text{HTe}^-$  ont pour valeur respectivement : 2,5 et 11,0.

V.1. On se propose de construire le diagramme potentiel-pH du tellure pour une concentration totale en atomes de tellure dissous  $c = 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$ . Sur les droites frontière entre espèces dissoutes, la convention choisie est une égalité des concentrations en élément Tellure (par exemple, à la frontière entre  $\text{Te}_2^{2-}$  et  $\text{Te}^{2-}$  on écrira :  $2[\text{Te}_2^{2-}] = [\text{Te}^{2-}]$ ).

- Etablir les équations des droites frontière pour le système  $\text{Te(s)} / \text{Te(-I)}$ , c'est-à-dire pour l'élément tellure aux nombres d'oxydation 0 / -I.
- Etablir de même les équations des droites frontière pour le système  $\text{Te(-I)} / \text{Te(-II)}$ .
- Tracer le diagramme sur le papier millimétré fourni. On prendra pour échelle : 4cm pour 1 V, et 1 cm par unité de pH.
- Préciser les conditions de stabilité en solution aqueuse de l'ion  $\text{Te}_2^{2-}$ .

V.2. Les ions mercuriques  $\text{Hg}^{2+}$  forment avec les ions tellure un composé peu soluble  $\text{HgTe}$ . Sur le même diagramme, porter les variations en fonction du pH du potentiel du système formé par le couple  $\text{Hg(II)} / \text{Hg}$  en présence d'ions  $\text{Te}^{2-}$  à  $10^{-3} \text{ mol/L}$ , la solution étant saturée en tellure mercurique  $\text{HgTe}$ .

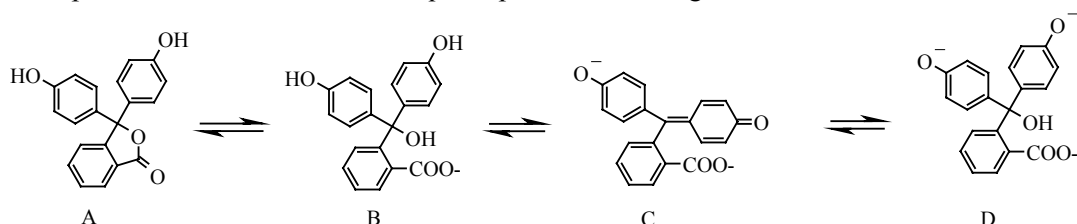
On donne :  $E^\circ(\text{Hg}^{2+}/\text{Hg}) = 0,85 \text{ V}$        $\text{pK}_s(\text{HgTe}) = 69,6$

V.3. Proposer une méthode expérimentale permettant d'obtenir un précipité de tellure mercurique à partir de mercure et d'ions ditellure  $\text{Te}_2^{2-}$ .

## Partie B

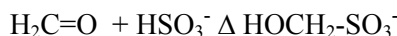
### Les ions sulfite et hydrogénosulfite

- On se propose d'étudier quelques propriétés des ions sulfite.
  - Donner le schéma de Lewis des ions sulfite  $\text{SO}_3^{2-}$  et hydrogénosulfite  $\text{HSO}_3^-$ .
  - L'acide sulfureux  $\text{H}_2\text{SO}_3$  est un diacide faible dont les  $\text{pK}_a$  sont :  $\text{pK}_1 = 1,8$  ;  $\text{pK}_2 = 7,2$ . On envisage le titrage de  $v = 10$  mL de solution d'acide sulfureux de concentration  $c = 10^{-3}$  mol/L par de la soude de concentration  $c' = 0,01$  mol/L. Tracer l'allure de la courbe  $\text{pH} = f(v')$ ,  $v'$  étant le volume de soude versé. On calculera en particulier le  $\text{pH}$  pour  $v' = 0$  mL ; 0,5 mL ; 1,5 mL. (on négligera la dilution).
- Le titrage peut être réalisé à l'aide d'un indicateur coloré comme la phénolphtaléine ; celle-ci peut subir plusieurs transformations lorsque le  $\text{pH}$  du milieu augmente :



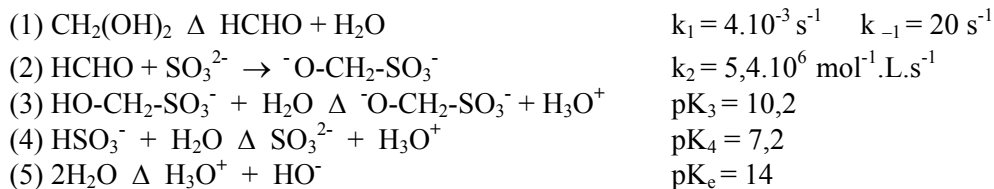
Sachant que le changement de couleur attendu est incolore  $\rightarrow$  rose ( zone de virage :  $8 < \text{pH} < 10$ ), quelle est la forme responsable de la couleur rose ? Justifier la réponse.

- On étudie l'action des ions  $\text{HSO}_3^-$  en solution aqueuse sur le formaldéhyde (ou méthanal)  $\text{HCHO}$ . Le bilan de la réaction peut s'écrire :



$\text{HOCH}_2\text{-SO}_3^-$  est l'hydroxyméthylsulfonate et sera noté  $\text{HMS}^-$ . Cette réaction est couramment appelée "combinaison bisulfite".

Cette réaction, lente, est complexe. En solution aqueuse, le méthanal est sous forme hydratée  $\text{CH}_2(\text{OH})_2$  à plus de 99,9%. On fait réagir en solution aqueuse du méthanal, un mélange de  $\text{HSO}_3^-$  et  $\text{SO}_3^{2-}$  et on ajoute un peu de phénolphtaléine. La fin de la réaction se traduit par une brutale augmentation de  $\text{pH}$ , et donc l'apparition de la couleur rose de la phénolphtaléine. Le mécanisme proposé pour la réaction est le suivant, avec les constantes de vitesse associées ( $k_i$ ) et les constantes d'équilibre ( $K_i$ ):



Les équilibres (3), (4), (5) s'établissent instantanément.

L'expérience est menée de la façon suivante : à l'instant  $t = 0$ , on réalise un mélange de méthylène glycol  $\text{CH}_2(\text{OH})_2$  à la concentration  $a$ , d'hydrogénosulfite de sodium  $\text{NaHSO}_3$  à la concentration  $b$ , et de sulfite de sodium  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  à la concentration  $c$ .

$$\begin{aligned} a &= [\text{CH}_2(\text{OH})_2]_0 = 1,41.10^{-2} \text{ mol.L}^{-1} \\ b &= [\text{HSO}_3^-]_0 = 1,12.10^{-3} \text{ mol.L}^{-1} \\ c &= [\text{SO}_3^{2-}]_0 \quad b/c = 14,7 \end{aligned}$$

- Quel est le  $\text{pH}$  initial de la solution ?

- b. L'apparition de la couleur rose correspond à un  $\text{pH} = 8,4$ . Quelles sont les espèces majoritaires à ce  $\text{pH}$  ? Montrer, en écrivant des équations classiques de conservation, que l'on peut alors estimer que  $[\text{HMS}^-] = b$
- c. A quelles conditions peut-on appliquer l'approximation de l'état quasi-stationnaire (A.E.Q.S) à une espèce intervenant dans le mécanisme ? Montrer que c'est le cas pour HCHO.
- d. Exprimer la vitesse de formation de  $\text{HMS}^-$  en fonction de  $[\text{CH}_2(\text{OH})_2]$ , de  $[\text{SO}_3^{2-}]$  et des constantes de vitesse. Quelle est l'étape qui détermine la formation de  $\text{HMS}^-$  ?
- e. Comment se simplifie alors l'expression de la vitesse de formation de  $\text{HMS}^-$  ?
- f. Exprimer  $[\text{HMS}^-] = f(t)$ .
- g. Déterminer la date d'apparition de la couleur rose.

## Partie C

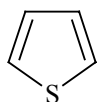
### Quelques composés soufrés en chimie organique

#### I.Substitution électrophile aromatique (S.E.A)

I.1. S.E.A. sur le benzène :

- Ecrire le bilan de la réaction de sulfonation du benzène, en précisant les conditions expérimentales.
- Indiquer les principales étapes du mécanisme de la réaction.
- Représenter les formules mésomères de l'intermédiaire de Wheland, et indiquer la géométrie de l'environnement de chaque carbone du cycle.
- Quelle est la particularité de la réaction de sulfonation par rapport aux autres S.E.A. sur le benzène ? Quelle peut en être l'application en synthèse organique ?

I.2. Montrer que le thiophène :

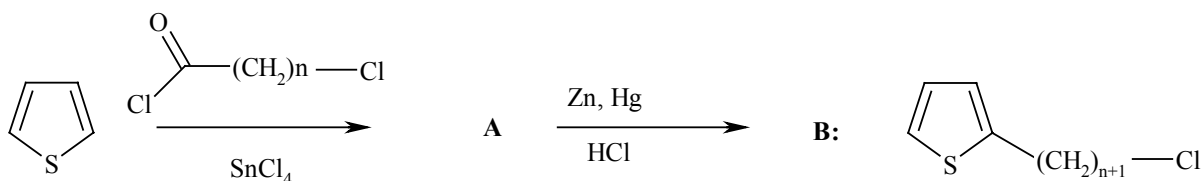


est un composé aromatique.

I.3. Une substitution électrophile sur le thiophène est-elle plus ou moins rapide que sur le benzène ? Justifier la réponse.

I.4. Montrer que la substitution se fera majoritairement sur le carbone lié au soufre.

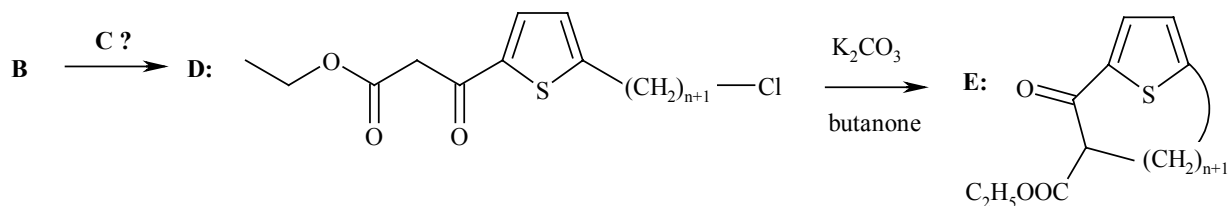
I.5. Une méthode de synthèse des cétones macrocycliques passe par l'utilisation du thiophène. On



effectue la suite de réactions suivantes:

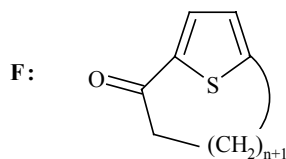
- Donner la formule de **A**, sachant que  $\text{SnCl}_4$  joue un rôle analogue à celui de  $\text{AlCl}_3$  dans les S.E.A.
- Montrer que la réaction **A**→**B** est une oxydo-réduction en écrivant les couples rédox correspondants.

I.6. **B** subit ensuite les transformations suivantes:

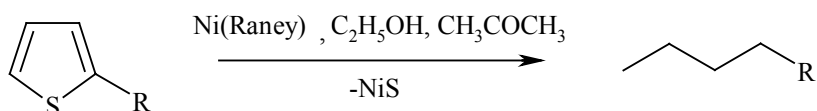


- Préciser la formule du composé **C**.

- Dans la transformation D→E, quel est le rôle du milieu basique ? Pourquoi n'a-t-on pas utilisé HO<sup>-</sup> ?
- Ecrire le mécanisme de cette transformation.
- Donner les différentes étapes permettant de passer de E à F.

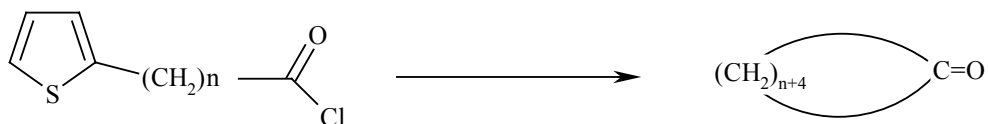


I.7. La dernière étape est une désulfuration. Si l'on traite un dérivé du thiophène par du nickel de Raney on a la réaction :



Quel composé obtient-on si on traite F par le nickel de Raney dans les mêmes conditions ?

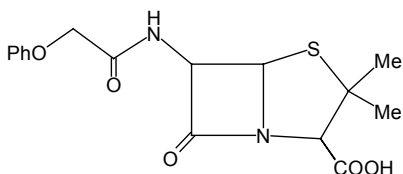
I.8. Une autre méthode d'obtention de composés de ce type est de partir de chlorure d'acyle thiophénique :



- Préciser les différentes étapes de cette transformation.
- Dans la pratique, on travaille à forte dilution ; quel en est l'intérêt ?

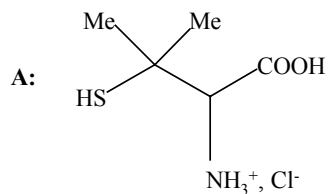
## II. La pénicilline

II.1. La pénicilline est un antibiotique possédant un groupement sulfure, dont la découverte et l'étude ont valu le prix Nobel de médecine à Fleming, Florey et Chain en 1945. Nous allons nous intéresser à quelques aspects de sa synthèse. La pénicilline V a pour formule :

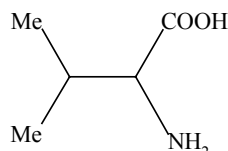


- Quels groupements fonctionnels autres que le groupement sulfure reconnaît-on sur cette formule ?
- Combien de stéréoisomères de configuration de la pénicilline V existe-t-il ?

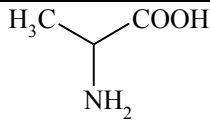
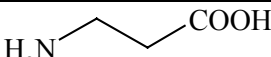
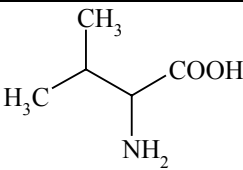
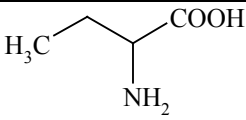
II.2. Un des intermédiaires nécessaires est le composé **A** :



Ce composé **A** a été synthétisé à partir de la (±)valine:



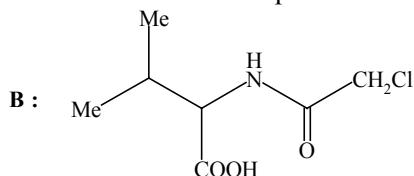
- Que signifie le symbole (±)?
- On donne en annexe II le spectre RMN  $^1\text{H}$  de 4 acides aminés :

Alanine	$\beta$ -Alanine	Valine	Acide 2-aminobutanoïque
			

Ces spectres ont été réalisés en présence d'une petite quantité de  $\text{D}_2\text{O}$  : cela permet de supprimer les signaux relatifs à N-H et O-H par suite d'échanges rapides avec  $\text{D}_2\text{O}$  ; par contre il apparaît un pic (large) correspondant à H-OD.

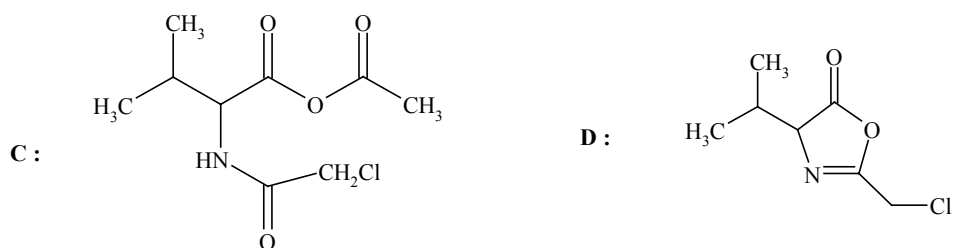
Attribuer à chaque spectre l'acide aminé correspondant, en justifiant la réponse. Aucune table de déplacement chimique n'est nécessaire pour répondre à cette question.

II.3. La valine subit une acylation de la fonction amine pour obtenir **B** :



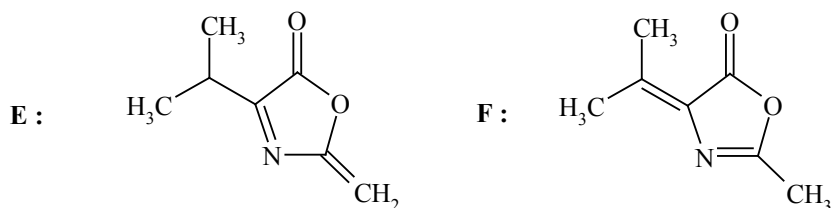
- Quel réactif a-t-on utilisé ? Ecrire l'équation bilan, donner le mécanisme de cette réaction.
- Quelle autre réaction aurait-on pu envisager ?

II.4. La fonction acide carboxylique est ensuite traitée par l'anhydride acétique pour donner **C** (aucune justification n'est demandée). **C** subit ensuite une transformation pour donner de l'acide éthanoïque et **D** :



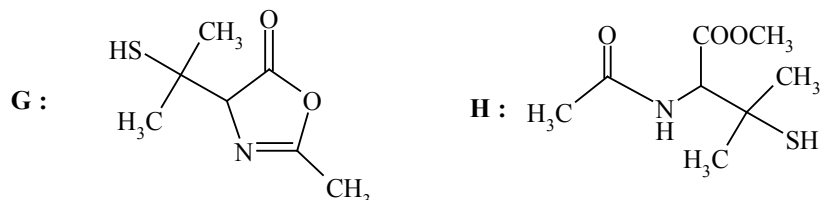
Montrer que, dans **D**, l'hydrogène porté par le carbone en  $\alpha$  de  $\text{C}=\text{O}$  est légèrement acide.

II.5. Traité par une base, **D** donne **E** qui s'isomérise spontanément en **F** :



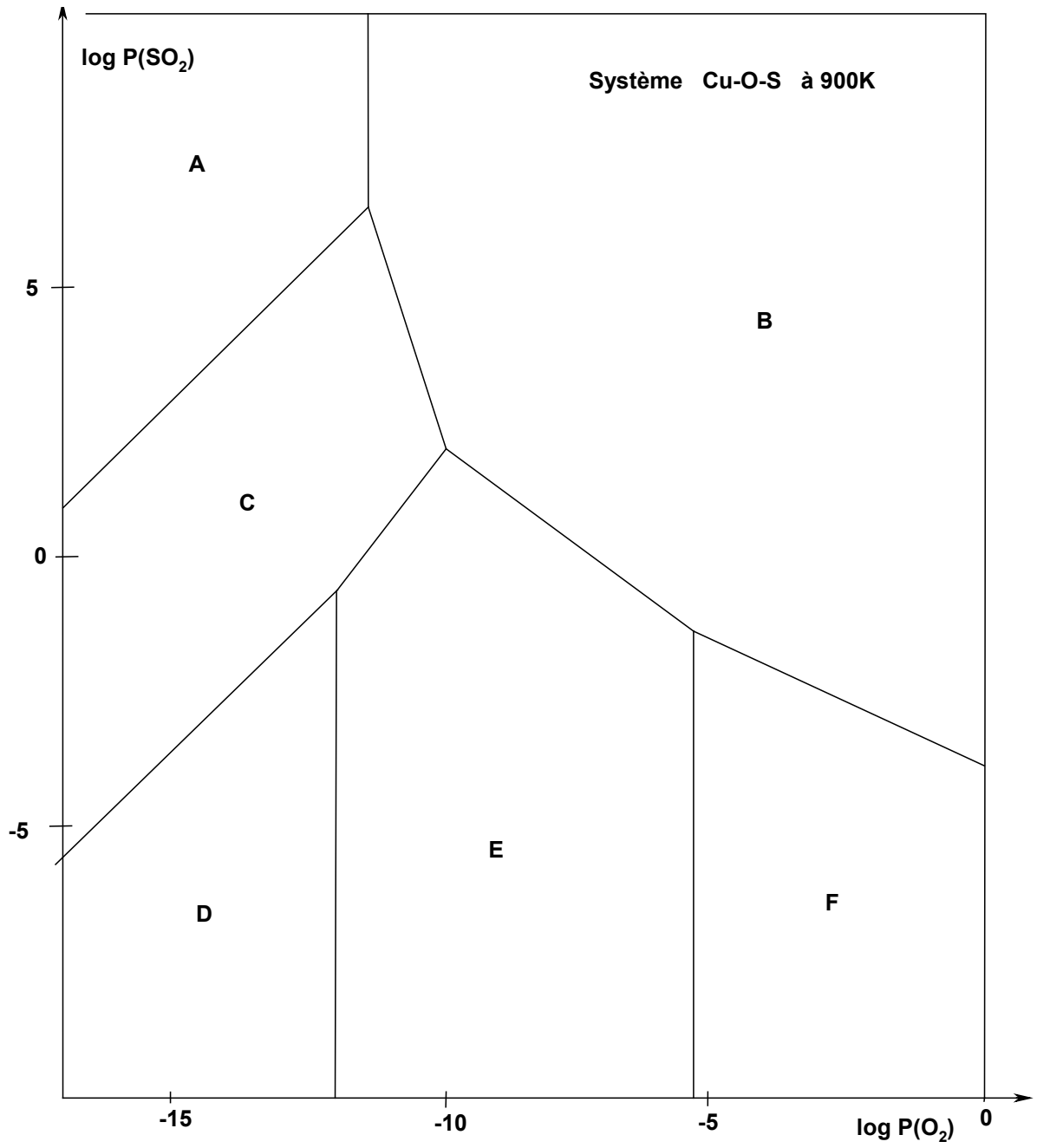
- A quel type de réactions appartient la transformation **D**  $\rightarrow$  **E** ? En donner le mécanisme.
- Comment justifier l'isomérisation spontanée de **E** en **F** ?
- 

II.6. Dans le méthanol, le composé **F** est traité par de l'hydrogénosulfure de sodium. L'action de  $\text{HS}^-$  sur **F** donne **G**, qui est ensuite traité par du méthanolate de sodium pour donner **H**.

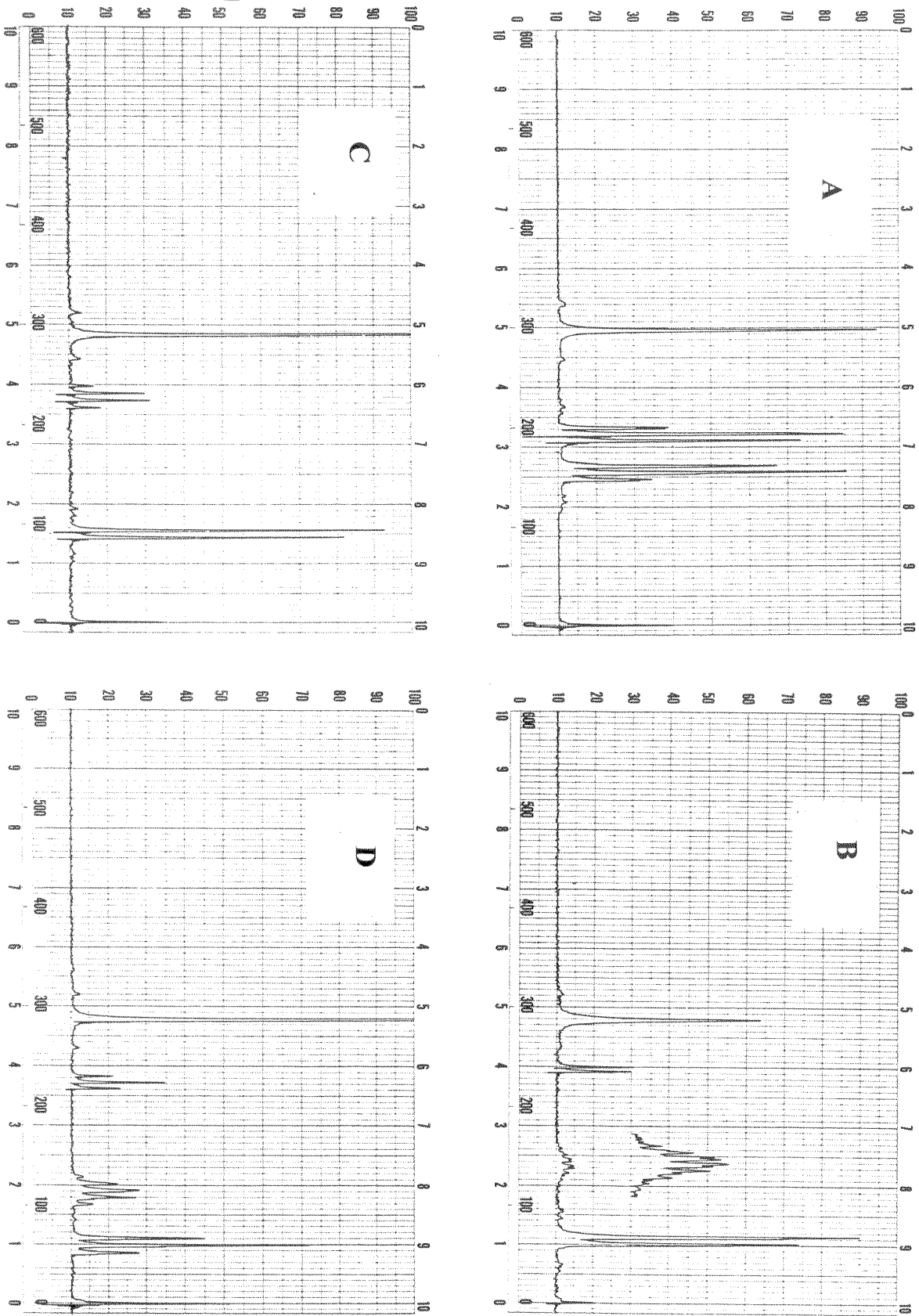


- Comparer les propriétés nucléophiles de  $\text{HS}^-$  et  $\text{HO}^-$  dans le méthanol.
- Montrer que dans **F** le carbone en  $\beta$  de  $\text{C}=\text{O}$  possède un caractère électrophile. Proposer alors un mécanisme pour la transformation **F**  $\rightarrow$  **G**.
- Comment pourrait-on passer de **H** à **A** ?
- Quelle méthode proposeriez-vous pour séparer les énantiomères de **A** ?

# Annexe I



Annexe II



## Rapport sur la composition de chimie

Le sujet aborde d'assez nombreux domaines de la chimie du soufre. Il comporte trois parties indépendantes : A concerne l'élément soufre et les sulfures (atomistique, cristallographie, thermodynamique, électrochimie) ; B étudie une cinétique en solution aqueuse et C envisage la synthèse organique de composés soufrés.

- **Remarques générales.**

La première partie, notamment l'étude de la chalcopyrite, est largement abordée. La deuxième est souvent délaissée par les candidats et l'étude de la cinétique rarement menée au bout. La chimie organique, quand elle est traitée, révèle souvent une bonne maîtrise des mécanismes réactionnels et donne l'impression d'une amélioration globale des connaissances dans ce domaine.

Au total, l'épreuve permet de bien classer les candidats : les notes s'échelonnent entre 0 et 20 et la moyenne est de 7,7.

Le jury a eu le plaisir de lire de nombreuses bonnes copies. Mais il lui faut insister une fois encore sur l'importance de la rédaction. C'est ainsi que les correcteurs ont parfois l'impression que le candidat comprend la question mais qu'il leur laisse le soin de terminer le raisonnement. Trop souvent aussi, la conclusion n'est pas tirée, le résultat numérique (qui est correct) n'est pas commenté ; il arrive également que la réponse apportée ne corresponde pas à la question posée. Une rédaction trop elliptique laisse le correcteur perplexe et n'incite pas à l'indulgence. Cela apparaît en particulier en thermodynamique : la lecture du diagramme (comment le candidat lit-il la pression demandée ?) et la détermination des pentes des droites soulèvent bien des interrogations.

Enfin le soin apporté à l'écriture, l'orthographe, la présentation et à la rédaction est une qualité particulièrement appréciée.

- **Remarques concernant les différentes parties :**

- **Partie A :**

Il est difficile de savoir s'il s'agit simplement d'une rédaction embrouillée. Mais la liaison hydrogène dans l'eau semble mal connue, et les confusions avec la liaison covalente OH sont fréquentes. L'effet de la « taille » des atomes ou molécules est mal traité.

La non-existence de la molécule  $\text{OF}_4$  est souvent attribuée au fait que les électronégativités de O et F sont trop peu différentes. L'explication donnée est parfois que l'oxygène ne possède pas d'orbitales d : or celles-ci existent mais elles sont trop loin en énergie ! La géométrie de  $\text{SF}_4$  (avec le doublet correctement placé) est rarement donnée.

Les relations de l'ébulliométrie sont rarement démontrées avec rigueur (ne pas préciser les bornes d'intégration ou la constante d'intégration revient à oublier le sens physique de la démarche). Le fait d'obtenir, pour le nombre d'atomes de la molécule de soufre, un résultat non entier gêne certains candidats qui arrondissent celui-ci à 9 au lieu de 8 (aujourd'hui, l'existence de la molécule  $\text{S}_8$  ne fait plus partie de la culture des étudiants).

Les structures électroniques de l'atome de cuivre et des ions du fer sont souvent incorrectes ; en particulier, celle donnée pour  $\text{Fe}^{2+}$  au nom du « demi-remplissage plus stable » :  $3d^5 4s^1$  est fautive.

Le raisonnement sur les nombres d'oxydation pour la chalcopyrite n'est que rarement fait.

Le calcul de la variance est souvent correct, mais les commentaires ne sont pas appropriés et ils ne sont quasiment jamais mis en relation avec le diagramme étudié.

Les raisonnements sur les domaines d'existence des solides sont souvent confus. Pourtant, la comparaison du quotient de réaction à la constante d'équilibre (conformément à ce qui est demandé dans le nouveau programme de Terminale) donne lieu à des développements corrects.

La partie électrochimie est soit presque entièrement bien traitée et comprise, soit totalement incomprise. Seule la question IV 2 d relative à la potentiométrie à intensité nulle n'est quasiment jamais traitée correctement : les candidats ne semblent pas faire le lien avec les dosages d'oxydo-réduction courants.

La convention de concentrations choisie pour les droites frontières du diagramme E-pH de l'élément tellure gêne beaucoup les candidats :

- les équations de conservation sur la frontière sont mal écrites (l'atomicité n'est prise en compte que dans l'une des deux équations !)
- le tracé primitif est correct mais l'exploitation rare (vis-à-vis de l'eau comme de la dismutation)
- le cas du mercure est très rarement abordé

Cette question engendre des calculs qui n'aboutissent pas toujours ; elle est souvent mal réussie.

#### ▪ **Partie B :**

Cette partie est celle qui est le moins souvent traitée ; quand elle l'est, c'est la moins réussie.

Dans les formules de Lewis, le doublet sur le soufre est souvent oublié.

Le dosage de l'acide sulfureux donne lieu à des courbes étonnamment variées et même fantaisistes. C'est ainsi que le tracé comporte souvent une ondulation au début car il faut passer coûte que coûte par  $\text{pH} = \text{pK}_a = 1,8$  à la première demi-équivalence ; on observe également parfois 1 ou 2 sauts de pH ou même un pH continûment décroissant. Pour beaucoup de candidats, les courbes de dosage ne semblent obéir qu'à une seule loi : le pH est égal au pKa à la demi-équivalence. Et l'acide de force moyenne dont le pH au départ est supérieur à son pKa est inconnu de la grande majorité des candidats.

L'écriture des relations de conservation de matière ou de charge électrique ne semble pas inspirer beaucoup ceux-ci.

L'approximation des états quasi-stationnaires (AEQS) est correctement écrite, mais rares sont les candidats qui intègrent correctement l'équation différentielle qui en résulte. Beaucoup considèrent que la concentration en  $\text{CH}_2(\text{OH})_2$  reste constante ; d'autres ne tiennent pas compte des conditions initiales ou confondent réactif et produit de réaction.

#### ▪ **Partie C :**

Cette partie n'est pas toujours abordée. Quand elle l'est, le traitement en est assez satisfaisant mais il amène plusieurs remarques.

Le bilan, les conditions opératoires et le mécanisme de la réaction de sulfonation sont souvent mal connus.

La reconnaissance des fonctions organiques usuelles (II.1) pose des problèmes : un amide est souvent identifié comme une cétone + une amine.

Le symbole ( $\pm$ ) pour la valine est fréquemment interprété comme représentant le zwitterion de l'acide aminé.

Un certain nombre de candidats comptent les atomes d'azote trisubstitués de la pénicilline comme centres stéréogènes.

On constate un manque de rigueur dans l'utilisation du formalisme des flèches : rappelons que la flèche doit partir d'un doublet d'électrons, non de la charge  $\ominus$ . Bien utilisé, ce formalisme est un très bon outil de logique et de pédagogie. Par ailleurs les différentes étapes élémentaires doivent être séparées : dans un mécanisme AN + E, par exemple, on ne peut pas tout représenter en une seule fois !

La comparaison des propriétés nucléophiles des ions  $\text{HO}^-$  et  $\text{HS}^-$  doit tenir compte du fait que le solvant est le méthanol : l'existence des liaisons hydrogène fait que  $\text{HO}^-$ , plus solvaté, est un moins bon nucléophile.

La RMN est assez bien connue, l'attribution des spectres grâce aux couplages est généralement bien faite.

Il est un peu inévitable que ce rapport souligne les principales erreurs relevées dans les copies.

Le jury a toutefois plaisir à insister sur le fait que la chimie, en particulier la chimie organique, est très correctement maîtrisée par un grand nombre de candidats.

4355

**28533**  
repère à reporter sur la copie

**SESSION DE 2003**

---

---

**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.*

**Tournez la page S.V.P.**

# Les planètes extra – solaires

## Introduction

Depuis la découverte, en 1995, de la première planète extra - solaire autour d'une étoile très analogue à notre Soleil, Pégase 51, les détections se sont multipliées pour atteindre maintenant plus d'une centaine d'objets, de propriétés très diverses. Après une première partie consacrée aux caractéristiques de l'interaction gravitationnelle à deux corps, nous examinerons diverses méthodes de détection des planètes extra - solaires et leurs limitations. La dernière partie du problème sera consacrée à l'examen des propriétés des planètes extra - solaires détectées.

Une grande attention sera portée aux applications numériques, pour lesquelles nous recommandons d'utiliser les unités familières aux astronomes, telles que le parsec, ou l'unité astronomique, bien adaptées aux ordres de grandeur du problème, dont les définitions et les valeurs en unités du système international sont données ci-après (les résultats exprimés en unités SI ne seront évidemment pas pénalisés pour autant).

## Données numériques

unité astronomique : $1 \text{ ua} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$
parsec : $1 \text{ pc} = 3,1 \cdot 10^{16} \text{ m}$
vitesse de la lumière : $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$
constante de gravitation : $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$
constante de Stefan : $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
masse du Soleil : $M_{\odot} = 2,0 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
rayon du Soleil : $R_{\odot} = 7,0 \cdot 10^8 \text{ m}$
masse de la Terre : $M_T = 6,0 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
masse de Jupiter : $M_J = 2,0 \cdot 10^{27} \text{ kg}$
période de Jupiter : $P_J = 12 \text{ ans}$

## Rappels concernant les ellipses

En coordonnées polaires avec origine au foyer, l'équation d'une ellipse peut se mettre

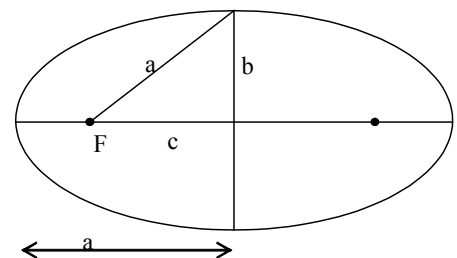
sous la forme :  $r = \frac{p}{1 + e \cos \theta}$  où  $p$  est le paramètre de

l'ellipse et  $e$  son excentricité.

$$a^2 = b^2 + c^2$$

$$e = \frac{c}{a} \text{ et } p = \frac{b^2}{a}$$

L'aire de l'ellipse est :  $S = \pi ab$



## Rappels de cinématique

Pour un mouvement à accélération centrale, on peut établir une formule de Binet donnant l'accélération en coordonnées polaires :

$$\vec{a} = -\frac{C^2}{r^2} \left( \frac{d^2}{d\theta^2} \left( \frac{1}{r} \right) + \frac{1}{r} \right) \vec{u}_r, \text{ où } C \text{ désigne la constante des aires.}$$

## 1. Interaction gravitationnelle à deux corps

On considère un système isolé constitué de deux points matériels  $M_1$  et  $M_2$  de masses  $m_1$  et  $m_2$ , de centre de masse  $G$ , repérés par les vecteurs  $\overrightarrow{OM_1}$  et  $\overrightarrow{OM_2}$ ;  $O$  étant une origine fixe de l'espace. On note :  $\vec{r}_1 = \overrightarrow{GM_1}$  et  $\vec{r}_2 = \overrightarrow{GM_2}$

Les deux points matériels sont en interaction ; on désigne par  $E_p(r)$  l'énergie potentielle d'interaction correspondante, en notant :  $r = \|\vec{r}\| = \|\vec{r}_2 - \vec{r}_1\|$ .

### 1.1 Mouvement dans un potentiel central

Donner les équations différentielles donnant accès au mouvement des deux masses. Montrer qu'il est possible de découpler ces deux équations de telle sorte que l'une traduise une loi de conservation que l'on précisera et que l'autre soit l'équation du mouvement d'un point particulier dont on précisera les caractéristiques. Connaissant les conditions initiales du mouvement, montrer que la détermination de  $\vec{r}(t)$  permet de connaître les positions de  $M_1$  et  $M_2$  à tout instant.

### 1.2 Première et deuxième lois de Kepler

Soit la grandeur  $\vec{C} = \vec{r} \times \dot{\vec{r}}$  où  $\dot{\vec{r}} = \frac{d\vec{r}}{dt}$  et où le symbole  $\times$  désigne le produit vectoriel.

Vérifier que cette grandeur est constante. On notera  $C = \|\vec{C}\|$  la constante des aires. A quelle loi de conservation est associée cette constante ? Quelles sont les conséquences géométriques et horaires sur le vecteur  $\vec{r}(t)$  ?

### 1.3 Cas particulier du potentiel gravitationnel

On se place désormais dans le cadre d'un potentiel de gravitation ; par ailleurs, on se limite à des états liés. Etablir que la trajectoire  $\vec{r}(t)$  est une ellipse et préciser le lien entre le paramètre de l'ellipse  $p$ , la constante des aires  $C$  et les paramètres physiques du problème.

Quelle relation lie l'aire de l'ellipse et la période  $P$  du mouvement ? En déduire la relation liant la période  $P$  du mouvement au demi - grand axe  $a$  de l'ellipse, connue sous le nom de troisième loi de Kepler.

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G(m_1 + m_2)}{4\pi^2}$$

### 1.4 Cas des orbites circulaires

Dans le cas simplifié où la courbe  $\vec{r}(t)$  est un cercle, établir les caractéristiques (rayon et vitesse) des trajectoires des deux points  $M_1$  et  $M_2$  dans le référentiel barycentrique. Les résultats seront exprimés en fonction des masses  $m_1$  et  $m_2$  et de la période  $P$  du mouvement. Faire un schéma représentant les deux points à un instant donné, le centre de masse, les trajectoires et les vecteurs vitesse.

### 1.5 Applications numériques

Pour les deux couples (Soleil, Terre) et (Soleil, Jupiter), et dans l'hypothèse de trajectoires circulaires, donner les valeurs des rayons des trajectoires et des vitesses dans leur référentiel barycentrique.

## 2. Détection des planètes extra - solaires par observation directe

### 2.1 Définition et valeur du parsec

On appelle parsec (symbole pc) la distance  $d$  à laquelle le rayon moyen de l'orbite terrestre autour du Soleil  $a$  (appelé unité astronomique, symbole ua) est vu sous un angle  $\theta$  de 1 seconde d'arc. Exprimer  $d$  en fonction de  $a$  et  $\theta$ . Quelle approximation est-il raisonnable de faire ? En déduire la valeur du parsec en mètres et en ua.

### 2.2 Séparation angulaire entre l'étoile et sa planète

On considère une planète située à la distance  $a$  de son étoile. Quelle est la séparation angulaire  $\theta$  entre les deux objets pour un observateur situé à la distance  $D$  du système telle que  $D \gg a$  ? Calculer et exprimer en secondes d'arc la valeur de  $\theta$  pour un système de type Soleil - Terre ( $a = 1$  ua) puis pour un système de type Soleil - Jupiter ( $a = 5$  ua), situés l'un et l'autre à  $D = 10$  pc de l'observateur.

### 2.3 Puissance rayonnée par l'étoile

L'étoile, assimilée à une sphère de rayon  $R^*$ , rayonne comme un corps noir de température  $T^*$ . Exprimer la puissance  $L^*$  qu'elle émet (on note  $\sigma$  la constante de Stefan).

### 2.4 Puissance interceptée par la planète

La planète est assimilée à une sphère de rayon  $R$ , située à la distance  $a$  de l'étoile. On suppose qu'elle intercepte la puissance émise par l'étoile comme un disque de rayon  $R$ , perpendiculaire à l'axe étoile - planète et uniformément éclairé. Quelle est la puissance  $L$  ainsi interceptée ?

Calculer la fraction  $L/L^*$  de puissance stellaire interceptée par une planète de type Jupiter ( $R = 0,1 R^*$ ,  $a = 5$  ua) et par une planète de type Terre ( $R = 0,01 R^*$ ,  $a = 1$  ua).

### 2.5 Température d'équilibre de la planète

La planète réfléchit une fraction  $A$  (appelée albédo) de la puissance incidente. On suppose qu'elle se comporte comme un corps noir de température  $T$ . Exprimer  $T$  en fonction de  $T^*$ . Pour une étoile de type solaire,  $T^* = 6000$  K ; en prenant  $A = 0,3$  calculer  $T$  pour une planète de type Jupiter et pour une planète de type Terre.

### 2.6 Maximum d'émission de la planète

Le maximum d'émission de l'étoile se situe à la longueur d'onde  $\lambda^* = 0,5 \mu\text{m}$ , quelles sont alors les longueurs d'onde du maximum d'émission d'une planète de type Jupiter et d'une planète de type Terre ?

### 2.7 Limitations observationnelles

Qu'appelle-t-on la résolution spatiale d'un instrument d'optique ?

Rappeler, sans démonstration, l'expression du diamètre angulaire  $\beta$  de la tache centrale de diffraction à l'infini d'une pupille circulaire de diamètre  $b$ , éclairée par un rayonnement de longueur d'onde  $\lambda$ . Pourquoi considère-t-on qu'un télescope de diamètre  $b$  a une résolution spatiale  $\beta$  ?

Calculer les résolutions spatiales d'un télescope de 8m de diamètre lorsqu'il opère dans le visible ( $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ ) et lorsqu'il opère dans l'infrarouge ( $\lambda = 20 \mu\text{m}$ ). A ces longueurs d'onde, un tel instrument peut-il résoudre un système de type Soleil - Jupiter, situé à 10 pc du télescope ? Qu'en est-il d'un système de type Soleil - Terre, à la même distance ?

La deuxième limitation observationnelle provient des détecteurs, qui ne permettent pas actuellement d'atteindre une dynamique (c'est à dire un rapport entre les intensités maximale et minimale détectables) supérieure à  $10^4$ . Comparez cette limite avec le rapport des puissances rayonnées par l'étoile et par la planète. Qu'en concluez-vous sur la détectabilité directe actuelle des systèmes planétaires ? Expliquez pourquoi la détection par observation directe est plus prometteuse en infrarouge qu'en visible.

### **3. Détection indirecte des planètes via le déplacement de l'étoile**

*On suppose désormais que les planètes ont des orbites circulaires autour de leur étoile.*

#### 3.1 Orbite de l'étoile

On note  $m^*$  et  $m$  les masses de l'étoile et de sa planète (avec  $m^* \gg m$ ) et  $P$  la période de leur mouvement relatif. Donner une expression approchée du rayon  $a$  de l'orbite de la planète autour du centre de masse du système, en fonction de  $m^*$  et de  $P$ . Quelle relation peut-on écrire entre  $a$  et le rayon  $a^*$  de l'orbite de l'étoile autour du centre de masse du système ?

#### 3.2 Caractéristiques de la planète déduites par cette méthode

La masse  $m^*$  et la distance de l'étoile à l'observateur,  $D$ , étant connues par ailleurs, montrer que le suivi au cours du temps de la position de l'étoile sur le ciel permet de déterminer la masse  $m$  de la planète et son rayon orbital  $a$ . Cette méthode est-elle applicable quelle que soit l'orientation de l'orbite par rapport à l'observateur ?

#### 3.3 Planètes privilégiées par cette méthode

En termes de masse  $m$  et de rayon orbital  $a$  quel type de planète est-il le plus facile de détecter par cette méthode ?

#### 3.4 Limitations observationnelles

Sur quelle durée faut-il suivre le mouvement d'une étoile de type Soleil pour détecter une planète de type Terre ? Même question pour une planète de type Jupiter ? Expliquer pourquoi cette méthode est, de fait, limitée pour la détection des planètes très distantes de leur étoile.

Calculer le rayon angulaire  $\theta^*$  du mouvement d'une étoile de type Soleil située à la distance  $D = 10 \text{ pc}$  de l'observateur, selon qu'elle est accompagnée d'une planète de type Jupiter ( $a = 5 \text{ ua}$ ,  $m = 10^{-3} m^*$ ) ou d'une planète de type Terre ( $a = 1 \text{ ua}$ ,  $m = 3 \cdot 10^{-6} m^*$ ), la trajectoire étant dans un plan perpendiculaire à la direction d'observation. Ces observations sont-elles accessibles à un télescope de 8m de diamètre ?

Les meilleurs télescopes optiques actuels, fonctionnant en mode interférométrique, permettront d'atteindre dans un avenir proche des résolutions spatiales de 50

microsecondes d'arc. Jusqu'à quelle distance permettront-ils de détecter des planètes de type Jupiter via le mouvement de leur étoile ?

Plusieurs missions spatiales en projet visent à atteindre des résolutions spatiales de l'ordre de la microseconde d'arc. Permettront-elles la mise en évidence de planètes de type Terre via le mouvement de leur étoile ?

#### 4. Détection indirecte des planètes via la vitesse de l'étoile

*On suppose désormais que les planètes ont des orbites circulaires autour de leur étoile.*

##### 4.1 Vitesse orbitale de l'étoile

Exprimer la vitesse  $V$  de la planète sur son orbite en fonction de  $m^*$  et de  $P$  et en fonction de  $m^*$  et de  $a$ . Quelle relation peut-on écrire entre  $V$ , la vitesse  $V^*$  de l'étoile sur son orbite, et le rapport des masses  $m/m^*$  ? Calculer  $V^*$  pour un système de type Soleil – Jupiter ( $a = 5$  ua,  $m = 10^{-3} m^*$ ), puis de type Soleil – Terre ( $a = 1$  ua,  $m = 3 \cdot 10^{-6} m^*$ ).

##### 4.2 Vitesse longitudinale de l'étoile

On note  $i$  l'inclinaison de l'orbite de l'étoile par rapport à l'observateur, c'est à dire l'angle entre la normale à l'orbite et la direction étoile – observateur.

4.2.1 On considère un système étoile - planète vu "par la tranche" (c'est-à-dire correspondant à un angle  $i = 90^\circ$ ). Exprimer en fonction de  $V^*$  et  $P$  la loi de variation temporelle  $U(t)$  de la vitesse longitudinale de l'étoile (c'est-à-dire de la projection de la vitesse orbitale  $V^*$  sur la direction étoile - observateur).

4.2.2 Comment suffit-il de modifier l'expression de  $U(t)$  si le système est vu sous une inclinaison  $i < 90^\circ$  ?

##### 4.3 Effet Doppler longitudinal

Une source émettant un signal de fréquence  $\nu$  et de célérité  $c$  se déplace à la vitesse longitudinale (algébrique)  $U$ , telle que  $|U| \ll c$ , en direction d'un observateur. On note  $\nu'$  la fréquence perçue par l'observateur.

Etablir l'expression du décalage Doppler  $\Delta\nu = \nu' - \nu$ , en accompagnant le calcul d'un schéma clair, où apparaîtront les positions relatives de l'observateur et de la source, ainsi que l'orientation des grandeurs algébriques utilisées.

##### 4.4 Caractéristiques de la planète déduites par cette méthode

Le spectre d'une étoile de type solaire présente des raies de fréquences au repos bien connues si bien qu'il est possible d'en déterminer avec précision le décalage Doppler.

La masse de l'étoile étant connue par ailleurs, montrer que le suivi au cours du temps du décalage Doppler du spectre de l'étoile permet de déterminer son rayon orbital  $a$  et une *limite inférieure* de la masse de la planète. Cette méthode est-elle applicable quelle que soit l'orientation  $i$  de l'orbite par rapport à l'observateur ?

#### 4.5 Planètes privilégiées par cette méthode

Donner l'expression approchée de la vitesse orbitale  $V^*$  de l'étoile en fonction des masses  $m^*$  et  $m$  (avec  $m^* \gg m$ ) et du rayon orbital  $a$  de la planète.

En termes de masse, de rayon orbital et d'inclinaison de l'orbite, quel type de planète est-il le plus facile de détecter par cette méthode ?

### 5. Limitations des détections par mesure de l'effet Doppler du spectre stellaire

La détection des variations de vitesse radiale de l'étoile représente actuellement la méthode la plus efficace de recherche de planètes extra - solaires. Nous allons examiner ici les principaux facteurs, instrumentaux et intrinsèques, qui limitent cette méthode.

#### 5.1 Résolution du spectrographe

5.1.1 Les spectrographes utilisés pour la recherche des planètes extra - solaires ont des pouvoirs de résolution de l'ordre de 50000. Quel effet Doppler en longueur d'onde,  $\Delta\lambda$ , permettent-ils de mesurer dans le domaine visible ( $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ ) ? A quelle amplitude de variation de la vitesse longitudinale de l'étoile cela correspond-il ?

5.1.2 Pour améliorer significativement la résolution de la mesure, la détermination de l'effet Doppler ne se fait pas sur une raie unique du spectre stellaire mais par la comparaison simultanée, par une méthode de corrélation croisée, d'un très grand nombre de raies stellaires avec un spectre de référence. En effectuant ainsi  $N \gg 1$  mesures indépendantes de l'effet Doppler, par quel facteur améliore-t-on la précision de la mesure ? Combien de raies faut-il observer simultanément pour mesurer une variation de vitesse stellaire de  $10 \text{ m s}^{-1}$  ?

#### 5.2 Limitation intrinsèque à l'étoile

5.2.1 Certaines étoiles sont animées d'un mouvement de pulsation interne, responsable d'une variation périodique de leur rayon, avec des périodes de l'ordre de quelques mois. En supposant que le rayon d'une étoile varie suivant une loi sinusoïdale entre les valeurs extrêmes  $R^* - \delta R^*$  et  $R^* + \delta R^*$  avec une période  $\tau$ , quelle est la loi de variation de la vitesse radiale  $V_r$  de la surface de l'étoile ?

5.2.2 Quel est l'effet de ce mouvement de pulsation sur les raies stellaires ? Dans le cas où  $\delta R^* = 0,01 R^*$  et  $\tau = 30$  jours, ce phénomène peut-il se confondre avec l'effet perturbateur d'une planète ?

5.2.3 Lors de ces pulsations, la température  $T^*$  (définie en 2.3) varie peu. Qu'en est-il de la puissance  $L^*$  rayonnée par l'étoile ? Que peut-on vérifier pour éviter de chercher des planètes autour d'étoiles pulsantes ?

### 6. Transit de la planète devant son étoile

#### 6.1 Condition de transit

Lorsque le mouvement orbital de la planète l'amène à passer intégralement entre l'étoile et l'observateur, on dit qu'il y a *transit* de la planète devant l'étoile. On note toujours  $i$  ( $0 \leq$

$i \leq 90^\circ$ ) l'inclinaison de l'orbite (supposée circulaire) de la planète par rapport à l'observateur. A quelle condition sur  $a$ ,  $i$ ,  $R$ ,  $R^*$ , y-a-t-il transit ?

## 6.2 Probabilité de transit

Si l'orientation de l'orbite planétaire est aléatoire, quelle est la probabilité qu'elle présente une inclinaison supérieure ou égale à une valeur  $i_0$  donnée ? En déduire la probabilité d'observer un transit pour un système constitué d'une étoile de type Soleil et d'une planète de type Jupiter ( $R = 0,1 R^*$ ) orbitant à  $a = 0,05$  ua de celle-ci.

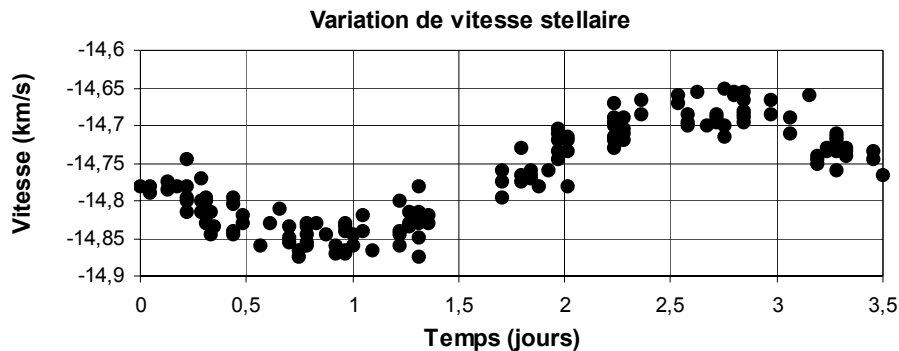
## 6.3 Courbe de lumière de l'étoile lors d'un transit de la planète

On considère un système étoile – planète, vu sous une inclinaison  $i = 90^\circ$ , situé à la distance  $D \gg a$  de l'observateur. Donner l'allure de la variation temporelle de puissance (appelée courbe de lumière de l'étoile) reçue par l'observateur (on ne demande pas de formule exacte). Exprimer en fonction des paramètres  $R$ ,  $R^*$ ,  $a$ ,  $P$ ,  $D$  la fraction maximale de puissance interceptée par la planète lors de son transit, la durée totale  $\tau_t$  du transit et la durée  $\tau_m$  du minimum de la courbe de lumière. Quel paramètre supplémentaire peut-on déduire de l'observation du transit d'une planète déjà caractérisée par la mesure de la vitesse orbitale de l'étoile ?

## 7. Propriétés des planètes détectées

### 7.1 Un « Jupiter chaud » typique : la planète de l'étoile HD209458

7.1.1 Les mesures de vitesse longitudinale de l'étoile HD209458 effectuées en 1999 par trois équipes ont fourni les valeurs représentées dans la *Figure 1*. Quelle est la nature de la courbe que l'on peut ajuster aux données expérimentales ? En déduire la période  $P$  et la vitesse longitudinale  $U$  de l'étoile.

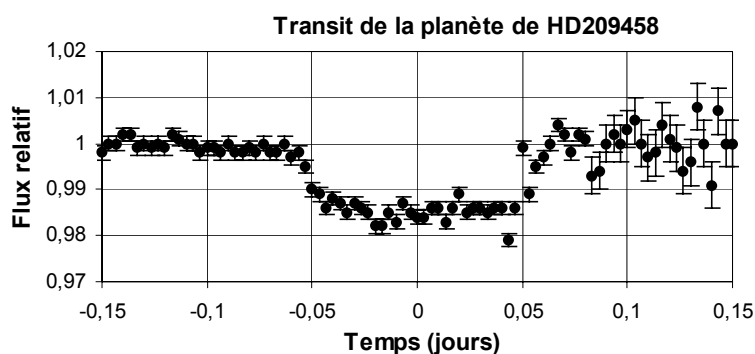


**Figure 1** : Vitesse longitudinale de l'étoile HD209458 en fonction du temps (ramené à une période) (d'après Mazeh et al., 2000).

7.1.2 La masse  $m^*$  de l'étoile HD209458 est estimée à  $1,1 \pm 0,1 M_\odot$ . Que vaut le rayon orbital de sa planète et la masse minimum de celle-ci ? Estimer les incertitudes relatives sur ces valeurs en supposant que la détermination de la vitesse orbitale est effectuée avec une précision de 2% et celle de la période avec une précision de 0,01 %.

7.1.3 Le transit de la planète devant l'étoile HD209458 a pu être observé à plusieurs reprises, conduisant à la courbe de lumière présentée dans la *Figure 2*. Le rayon  $R^*$  de l'étoile HD209458 est estimé à  $1,2 \pm 0,1 R_\odot$ . Expliquer comment déduire de la courbe de

lumière le rayon  $R$  de la planète en supposant que l'inclinaison de l'orbite vaut  $90^\circ$  (en fait, pour ce système, on mesure  $i = 86,1^\circ$ ).



**Figure 2 :** Variation relative au cours du temps du flux de l'étoile HD209458 lors du transit de sa planète (d'après Charbonneau et al., 2000).

7.1.4 En déduire la masse volumique  $\rho$  (supposée uniforme) de la planète. Que peut-on en conclure sur sa nature (solide ou gazeuse) ?

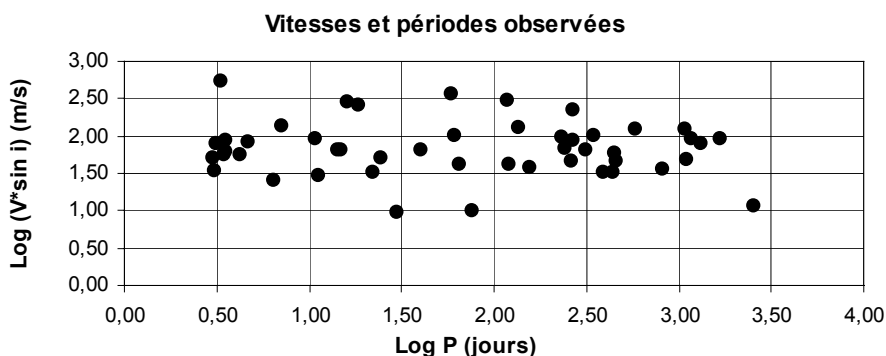
7.1.5 L'étoile HD209458 rayonne comme un corps noir de température  $T^* = 6030 \pm 140$  K. Déterminer la température d'équilibre  $T$  de la planète (en faisant les hypothèses décrites en 2.4 et 2.5).

7.1.6 Pourquoi a-t-on baptisé « Jupiter chaud » ce type de planète ?

## 7.2 Etude statistique des propriétés des 50 premières planètes détectées

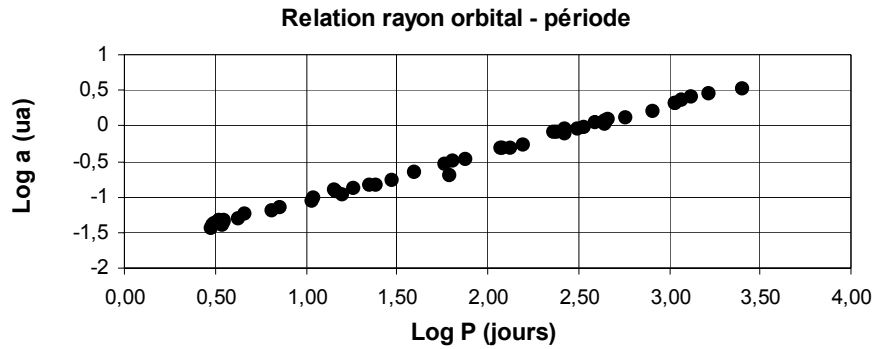
NB : Dans les Figures 3, 4, 5, « Log » désigne le logarithme décimal.

7.2.1 La Figure 3 présente les mesures de vitesses longitudinales et de périodes des 50 premières « étoiles à planètes » détectées. Dans quelles gammes de valeurs  $[V_{\min}, V_{\max}]$  et  $[P_{\min}, P_{\max}]$  se situent ces paramètres ? Quelles sont les zones de ce diagramme qui n'ont pas encore pu être explorées en raison de limitations observationnelles ?



**Figure 3 :** Répartition des vitesses orbitales et des périodes des 50 premières étoiles à planètes observées (d'après Udry 2000).

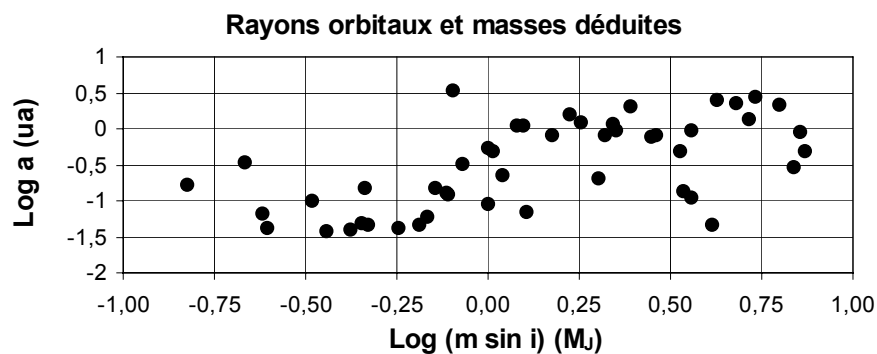
7.2.2 La Figure 4 présente les mesures de période  $P$  et les rayons orbitaux  $a$  calculés pour ces mêmes planètes. Quelle est la signification de la très forte corrélation qui apparaît entre ces deux paramètres ?



**Figure 4 :** Répartition des rayons orbitaux et des périodes des 50 premières étoiles à planètes observées (*d'après Udry 2000*).

7.2.3 La *Figure 5* présente les rayons orbitaux  $a$  et les masses minimales déduits des mesures de vitesses et de périodes.

Comment sont représentées, pour une masse stellaire  $m^*$  donnée, les courbes de vitesse  $V^*$  constante et de période  $P$  constante dans ce diagramme ? En déduire les zones de ce diagramme qui n'ont pas encore pu être explorées en raison de limitations observationnelles ?



**Figure 5 :** Répartition des rayons orbitaux stellaires et des masses planétaires (exprimées en masse de Jupiter) des 50 premières étoiles à planètes observées (*d'après Udry 2000*).

7.2.4 Quels phénomènes peut-on évoquer pour expliquer que l'on n'observe pas de planètes sur des orbites plus petites que  $a_{\min} \approx 0,04$  ua ?

# Rapport sur le problème de physique

Le sujet proposé en 2003 concerne la détection des planètes extra-solaires, l'un des sujets les plus actifs de l'astrophysique contemporaine. Depuis l'annonce, faite en 1995, par Mayor et Queloz, de l'observatoire de Genève, de la détection d'une planète géante autour de Pégase 51, une étoile analogue au Soleil, la recherche de planètes extra-solaires a permis de détecter et de caractériser plus d'une centaines de planètes. Grâce à la mise en service d'instruments spécifiques, cette formidable explosion d'observations, qui révèle des systèmes planétaires aux propriétés très différentes de celles de notre Système Solaire, fournit de nombreuses contraintes, parfois fort dérangementes, aux modèles de formation et d'évolution des systèmes planétaires. L'une des caractéristiques frappantes de ces recherches est le contraste entre la sophistication des techniques expérimentales utilisées pour atteindre les sensibilités ou les résolutions requises et la simplicité des lois physiques mises en jeu : 3<sup>ème</sup> loi de Kepler, effet Doppler longitudinal,...

Le problème aborde des questions très variées de la physique, relevant de la mécanique du point, de la thermodynamique, des ondes, de l'optique. La première partie a pour objectif principal l'établissement de la 3<sup>ème</sup> loi de Kepler, constamment utilisée dans la suite du problème. Elle ne constitue cependant pas une étape obligatoire puisque la loi est donnée dans l'énoncé. Les parties 2, 3, 4, 5, 6 examinent différentes méthodes de détection des planètes extra-solaires et leurs limitations. Le problème se conclut par l'application des résultats obtenus précédemment aux données fournies par les cinquante premières détections de planètes extra-solaires. Cette dernière partie a pour objectif de placer les candidats dans une situation d'interprétation de données tout à fait analogue à celle que connaissent les chercheurs.

A l'exception de la première partie, le problème ne demande que peu de calculs et fait souvent appel à des lois supposées bien connues des candidats. Le jury est donc particulièrement attentif à la clarté des justifications fournies, à l'exactitude des résultats et à la pertinence des valeurs numériques ; les données numériques étant délibérément fournies avec deux chiffres significatifs, le jury sanctionne les précisions abusives des résultats, effet bien connu mais regrettable de l'utilisation des calculatrices. Les formules non homogènes et les résultats numériques absurdes et non commentés sont pris en compte dans le sens négatif ; en revanche, des remarques judicieuses, témoignant de la culture, de l'esprit critique et de la curiosité des candidats, sont positivement appréciées.

L'épreuve a parfaitement rempli son rôle sélectif en étalant les notes sur toute la gamme accessible. Le quart inférieur de la distribution révèle une ignorance inquiétante de la physique classique. Au contraire, une bonne moitié des candidats fait la preuve de la solidité et de la diversité de ses connaissances ainsi que de sa capacité à les mobiliser. Beaucoup témoignent aussi de la bonne pénétration de l'astrophysique dans la culture générale des futurs enseignants.

## • **Remarques à propos des différentes parties du problème**

**La première partie**, consacrée à l'interaction à deux corps, d'abord dans sa généralité, puis dans le cas spécifique de l'interaction gravitationnelle, s'apparente à une question de cours. Elle a été traitée de façon satisfaisante par une majorité de candidats, au moins jusqu'à

l'établissement des lois de Kepler. Pour expliciter, dans le cas d'orbites circulaires, les caractéristiques cinématiques du mouvement des deux points matériels, et plus encore lors des applications numériques, de nombreux candidats font (parfois implicitement) des approximations non justifiées par l'énoncé à ce stade. Comme signalé plus haut, les applications numériques donnent souvent lieu à des débauches de chiffres non significatifs.

**La deuxième partie** examine si l'observation directe des planètes extra-solaires est possible. Elle fait appel à des notions élémentaires de géométrie sphérique, ainsi qu'à la connaissance des lois de la diffraction et du rayonnement du corps noir. Le jury a pu constater que ces notions sont généralement acquises. En revanche, un grand nombre de candidats confond puissance réfléchie et puissance émise par la planète, aboutissant (le plus souvent sans aucun commentaire) à des valeurs peu satisfaisantes pour les températures d'équilibre de la Terre et de Jupiter. La série de questions sur les limitations observationnelles, qui demande des définitions et des justifications sans calculs, est révélatrice de la difficulté que rencontrent de nombreux candidats à expliquer la physique « en mots » plutôt qu'« en calculs ». Il y a probablement là une lacune à combler dans la formation des futurs enseignants (voire des futurs chercheurs).

**La troisième partie** porte sur la détection des planètes via le mouvement orbital induit de l'étoile. De trop nombreux candidats utilisent sans justification la 3<sup>ème</sup> loi de Kepler donnée dans la première partie, confondant implicitement planète et mobile fictif. Seule une très faible fraction des candidats comprend que cette méthode est applicable quelle que soit l'orientation de l'orbite par rapport à l'observateur (la projection d'un cercle est toujours une ellipse, dont le demi-grand axe fournit le rayon du cercle). Dans cette partie comme dans la suivante, le jury est particulièrement attentif à la clarté des explications sur l'enchaînement des raisonnements permettant de déduire, à partir des paramètres observés, les caractéristiques de la planète.

**Les quatrième et cinquième parties** sont consacrées à la méthode effectivement mise en œuvre depuis 1995 pour détecter et caractériser les planètes extra – solaires : la détermination de la vitesse orbitale de l'étoile par la mesure de l'effet Doppler sur les raies stellaires. Elles sont souvent bien traitées. Quelques candidats, adeptes de la méthode Shaddock, éprouvent le besoin d'effectuer un calcul relativiste pour déterminer le décalage Doppler des fréquences des raies. Indépendamment de la méthode utilisée pour l'établir, une fraction non négligeable des candidats fournit des expressions du décalage Doppler non cohérentes avec l'ordre d'approximation utilisé dans le calcul.

**La sixième partie** porte sur l'analyse de la courbe de lumière d'une étoile occultée par sa planète. Elle n'est traitée que par un petit nombre de candidats. Si la condition de transit est souvent correctement établie, en revanche, la probabilité que celui-ci ait lieu n'est généralement pas convenablement calculée, les candidats confondant la distribution des angles et celle des lignes trigonométriques.

**La septième partie** concerne l'application des résultats précédemment établis à des données observationnelles tirées de la littérature scientifique. La longueur volontairement modérée du problème a permis à une fraction significative des candidats d'aborder ces questions, qui en constituent la partie la plus « gratifiante ». Si la plupart d'entre eux sait lire l'abscisse de la courbe de variation de vitesse de l'étoile HD209458 pour en déduire la période de son mouvement orbital, en revanche, plus rares sont ceux qui comprennent que c'est l'amplitude de la modulation sinusoïdale et non la valeur moyenne de la vitesse, qui permet d'accéder à la

vitesse orbitale de l'étoile. L'étude statistique des propriétés des planètes donne souvent lieu à de bonnes analyses des diagrammes présentés. Enfin, il est à remarquer que les candidats font preuve d'autant d'imagination que les astrophysiciens pour expliquer l'absence de planètes très proches de leur étoile.

## EPREUVES ORALES

Les épreuves définitives (pratiques et orales) se sont déroulées au Lycée Marcelin Berthelot de Saint Maur du 17 juin au 21 juillet 2003

Le jury a délibéré immédiatement après la fin des épreuves. Les résultats ont été proclamés le 22 juillet, et le jury a reçu aussitôt les candidats qui le désiraient, afin de commenter leurs épreuves.

### DEROULEMENT DES EPREUVES ORALES

Les candidats admissibles à l'agrégation de physique reçoivent une convocation pour une série d'oral, comportant un tirage au sort et trois épreuves réparties sur 5 ou 6 jours.

Lors du tirage au sort, chaque candidat tire au sort un numéro, auquel correspondent trois enveloppes contenant les sujets :

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

Ces enveloppes sont ouvertes par le candidat au début de chacune des épreuves.

Les épreuves orales d'une série donnée commencent dès le lendemain du tirage au sort de la série, selon l'horaire suivant (attention, les transports en commun ne 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) ;
- 1h 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 transparents, 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. Ils ont également accès aux bibliothèques pendant les deux premiers jours d'épreuve de leur série à 18 h 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, à récupérer impérativement le jour de la proclamation des résultats.

# LEÇONS DE PHYSIQUE

## 2003

1. Utilisation des intégrales premières du mouvement en mécanique. Exemples et applications. (1<sup>er</sup> CU)
2. Contact entre deux solides. Frottement de glissement. Exemples. (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
3. Caractère non galiléen du référentiel terrestre. Conséquences. (PCSI ou 1<sup>er</sup> CU)
4. Mouvement d'un solide autour d'un axe fixe. Equilibrage statique et dynamique. Exemples. (1<sup>er</sup> CU)
5. Approximation gyroscopique. Effets dans les domaines macroscopique et microscopique. (1<sup>er</sup> CU)
6. Utilisation des lois de conservation dans le problème à deux corps. Applications. (MPSI, PCSI ou 1<sup>er</sup> CU)
7. Principes de la cinématique relativiste. Durée propre. Longueur propre. (1<sup>er</sup> CU)
8. Collisions en relativité restreinte : application à l'étude des noyaux et des particules élémentaires. (1<sup>er</sup> CU)
9. Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique indépendant du temps. Applications. (1<sup>er</sup> 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 ou 1<sup>er</sup>CU)
13. Modèle du gaz parfait. Interprétations cinétiques de la pression et de la température. Limitations du modèle. (MPSI, PCSI)
14. Energie interne et échanges énergétiques. (PCSI, 1<sup>er</sup>CU).
15. Exemples de phénomènes irréversibles; bilans d'entropie. (MP ou 1<sup>er</sup> CU)
16. Application des deux premiers principes de la thermodynamique au fonctionnement des machines thermiques. (MPSI, PCSI ou 1<sup>er</sup> 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<sup>er</sup> CU)
19. Notion d'état microscopique. Interprétation statistique de l'entropie. Exemples. (1<sup>er</sup> CU)
20. Facteur de Boltzmann. Applications. (1<sup>er</sup> CU)
21. Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir. Applications. (1<sup>er</sup> CU)
22. Etude d'un phénomène de transport : conduction thermique ou diffusion de particules. Applications. (1<sup>er</sup> CU)
23. Conversion de puissance électromécanique. Exemples et applications. (PSI ou 1<sup>er</sup> CU)
24. Induction électromagnétique. Aspects énergétiques. Applications. (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
25. Systèmes bouclés. Transmittance. Stabilité. Application aux asservissements. (PSI ou 1<sup>er</sup> CU)
26. Traitement d'un signal électrique : filtrage linéaire. Exemples et applications. (PSI ou 1<sup>er</sup> CU)
27. Etude macroscopique de la polarisation, du champ électrique  $\mathbf{E}$  et du vecteur  $\mathbf{D}$  dans les milieux diélectriques. (PC)
28. Utilisation des propriétés de symétrie dans l'étude des champs électromagnétiques. Exemples. (1<sup>er</sup> CU)
29. Exemples simples de phénomènes de propagation unidimensionnels. Ondes progressives, ondes stationnaires. Aspects énergétiques. (1<sup>er</sup> CU)
30. Propagation dans un milieu dispersif : vitesse de phase, vitesse de groupe ; paquets d'ondes planes et évolution. Exemples. (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
31. Dispersion et absorption d'une onde électromagnétique plane dans un milieu diélectrique. Modélisation microscopique. (PC)

32. Réflexion et réfraction d'une onde électromagnétique monochromatique plane à la surface de séparation entre deux milieux diélectriques linéaires homogènes isotropes. (1<sup>er</sup> CU)
33. Effet de peau. Réflexion des ondes électromagnétiques planes à la surface d'un milieu conducteur. (MP ou 1<sup>er</sup> CU)
34. Propriétés et applications du rayonnement dipolaire électrique. (MP, PC)
35. Notion de rayon lumineux. Principe de Fermat. Conséquences. (1<sup>er</sup> 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<sup>er</sup> CU)
37. Obtention d'interférences à deux ondes en optique. Notion de cohérence. (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
38. Interféromètres à division d'amplitude. Applications. (1<sup>er</sup> CU)
39. Diffraction de Fraunhofer. Applications. (1<sup>er</sup> CU)
40. Diffraction par des structures périodiques dans différents domaines spectraux. (1<sup>er</sup> CU)
41. Le photon : la particule et ses interactions avec la matière. (1<sup>er</sup> CU)
42. Absorption, émission spontanée ou induite du rayonnement : coefficients d'Einstein. Applications. (1<sup>er</sup> CU)
43. Dualité onde-corpuscule : Relation de Louis de Broglie ; inégalités d'Heisenberg. Applications. (1<sup>er</sup> CU)
44. Quantification de l'énergie des atomes. (1<sup>er</sup> CU)
45. Puits de potentiel : exemples et applications en physique quantique. (1<sup>er</sup> CU)
46. Effet tunnel. Applications. (1<sup>er</sup> CU)
47. 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<sup>er</sup> CU)
48. Cohésion de la molécule et des solides ; aspects énergétiques. (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
49. Capacités thermiques : description , interprétations microscopiques. ( 1<sup>er</sup> CU)
50. Chaîne linéaire infinie d'oscillateurs harmoniques. Modes propres. Approximation des milieux continus. Aspects énergétiques . (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
51. Paramagnétisme. Approche du ferromagnétisme dans l'approximation du champ moyen. Température critique. (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
52. Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques ; applications. (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
53. Mécanismes de la conduction électrique. Loi d'Ohm. Effet Hall. Applications. (PCSI ou 1<sup>er</sup> CU)
54. Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique. (1<sup>er</sup> CU)
55. Exemples d'effets de non linéarité sur le comportement d'un oscillateur. (MPSI ou 1<sup>er</sup> CU)

# LEÇONS DE CHIMIE 2003

1 - Transformation chimique : équation de la réaction, avancement, bilan de matière.  
(1<sup>ère</sup> scientifique)

2 - Solutions électrolytiques ; mise en solution d'espèces ioniques ou moléculaires.  
(1<sup>ère</sup> scientifique)

3 - La conductimétrie : conductivité d'une solution ionique et application à la détermination de concentrations (dosage volumétrique exclu).  
(1<sup>ère</sup> scientifique)

4 - Réactions d'oxydoréduction en solution aqueuse (dosage exclu).  
(1<sup>ère</sup> scientifique)

5 - Dosages directs par réactions acido-basique et d'oxydoréduction.  
(1<sup>ère</sup> scientifique)

6 - Structure des molécules organiques. Isoméries.  
(1<sup>ère</sup> scientifique)

7 - Oxydation des composés organiques comportant un groupe caractéristique oxygéné.  
(1<sup>ère</sup> scientifique)

8 - Les grandes familles de réactions sur l'exemple des alcools.  
(1<sup>ère</sup> scientifique)

9 - Etude de l'eau de Javel ; obtention ; propriétés ; dosage.  
(Terminale sciences médico-sociales)

10 - Les acides  $\alpha$ -aminés. Synthèse peptidique.  
(Terminale sciences médico-sociales)

11 - Acido-basicité de Brønsted : rôle du solvant ; classification des couples acide-base en solution aqueuse.  
(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 et accumulateurs.  
(Terminale scientifique)

20 - Transformations chimiques forcées : électrolyses.  
(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 : évolution des propriétés physico-chimiques ; illustrations expérimentales.  
(MPSI-PTSI)

27 - Structure électronique 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 : définition, mesure, 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 - Equilibres liquide-vapeur ; applications.

(MP)

37 - Lecture et utilisation des diagrammes d'Ellingham : applications à la pyrométallurgie.

(MP-PSI)

38 - Utilisation des diagrammes potentiel-pH : application à l'hydrométallurgie du zinc (construction de diagramme exclue)

(PSI)

39 - Corrosion humide du fer. Protection du fer par le zinc.

(MP-PSI)

40 - Exemples de mécanismes en chimie organique : substitutions nucléophiles (compétition SN/E exclue).

(PSI)

41 - Exemples de mécanismes en chimie organique : élimination, compétition SN/E.

(PSI)

# MONTAGES 2003

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.

## **Rapport sur la leçon de physique**

Les sujets proposés se rapportent à de nombreux domaines. Une préparation sérieuse à l'épreuve est évidemment nécessaire.

### **• Préparation de l'épreuve de leçon de physique.**

La préparation de la leçon est un travail de fond sur la physique associée à chaque sujet ; elle ne peut évidemment pas se limiter aux quatre heures disponibles le jour de l'oral. Il faut que les candidats prennent le temps de réfléchir aux différents sujets, qu'ils connaissent la bibliographie associée et les expériences de cours envisageables.

### **• Présentation de l'épreuve.**

Le candidat tire au sort un sujet. Il dispose de quatre heures pour préparer sa leçon.

Cela lui permet de mettre en forme ses connaissances sur le sujet. Pour cela, il dispose de tous les livres de la bibliothèque (allant des manuels scolaires aux ouvrages les plus spécialisés). Il a d'ailleurs intérêt à ne pas se perdre dans une multitude de documents : mieux vaut faire une synthèse à partir de quelques ouvrages connus et bien choisis.

Le candidat peut également mettre au point des expériences de cours en utilisant le matériel disponible. Il peut se faire aider par les techniciens. Mais il ne doit pas oublier que c'est lui qui fait les manipulations devant le jury et qu'il en assume intégralement la responsabilité.

Pendant cinquante minutes, le candidat présente sa leçon devant le jury.

Celui-ci pose ensuite et pendant une vingtaine de minutes quelques questions au candidat.

### **• Remarques concernant l'ensemble des leçons**

#### **▪ L'exposé**

Rappelons tout d'abord que l'agrégation est un concours de recrutement d'enseignants. Le jury évalue donc la leçon qui est présentée sous trois angles :

- Le respect du sujet et du niveau imposé par le titre de la leçon.
- La solidité scientifique de l'exposé et la rigueur de l'argumentation.
- La clarté de l'exposé.

Le sujet proposé au candidat comporte un titre et un niveau de référence. Il est évident que le jury attend une leçon qui corresponde à l'un comme à l'autre.

L'ensemble du sujet doit être traité par le candidat qui doit absolument éviter les développements hors sujet.

Le niveau de référence correspond à une leçon en classe préparatoire aux grandes écoles (CPGE) ou en premier cycle universitaire. Le jury ne veut pas de leçon purement descriptive ou de niveau trop faible mais il ne veut pas non plus assister à un exposé d'un niveau dépassant largement les possibilités d'un (très) bon étudiant de premier cycle universitaire.

La durée de la leçon qui est fixée à cinquante minutes doit être scrupuleusement respectée. En effet un exposé trop court correspond en général à un sujet partiellement traité. En revanche un candidat qui n'a pas fini à l'issue de la durée impartie se voit couper la parole.

La leçon doit être construite autour d'un plan clair que le candidat doit noter ( à l'avance ou au cours de la leçon) et qui doit rester présent au tableau.

Le jury est très attentif à la rigueur des arguments utilisés. Les phrases ou formulations vagues et imprécises, les hypothèses mal dégagées sont très mal perçues.

L'épreuve de leçon n'est pas un cours que l'on peut présenter tel quel devant des étudiants. Le candidat peut aller assez vite dans son exposé sans reprendre plusieurs fois le même argument. Mais il ne peut pas non plus rester trop allusif et considérer que le jury comprend à demi-mot et qu'il est possible de sous entendre certaines phases de l'argumentation.

Il peut en revanche gagner du temps sur des parties purement techniques, par exemple en utilisant un transparent. A ce sujet, le jury attire l'attention des candidats sur le soin qu'il doit porter au choix du document extrait de la bibliothèque. Il n'est pas acceptable de présenter une leçon avec certaines notations et projeter à titre d'illustration un document qui en utilise d'autres.

Le jury souhaite vivement que la leçon soit illustrée par des expériences de cours. Celles ci doivent être en rapport direct avec le sujet traité (présenter une expérience hors sujet est sans intérêt). Bien entendu, il ne s'agit pas de l'épreuve de montage. Certaines précisions s'imposent néanmoins :

- Une expérience de cours doit être simple et démonstrative.
- Toutes les phases de la manipulation doivent être comprises par le candidat qui doit être en mesure d'expliquer le mode de fonctionnement de tous les appareils utilisés et leur mode de réglage.
- Le jury n'attend pas une exploitation quantitative aussi précise et aussi fouillée qu'en montage. Mais les mesures doivent être soignées et réalistes. En particulier, le nombre de chiffres significatif ne doit pas être choisi de manière désinvolte.

Un point important doit être souligné : présenter une leçon n'est pas lire un discours et en recopier quelques extraits au tableau. Un enseignant doit pouvoir s'affranchir de ses notes et le jury ne veut pas voir des candidats lisant leurs papiers (qu'ils tiennent à la main) pendant cinquante minutes. Les notes dont l'usage doit être extrêmement limité ne constituent qu'un support qui rassure le candidat qui ne risque pas d'oublier une partie de l'exposé et qui lui permet de retrouver facilement des données nécessaires à l'illustration de la leçon.

Le jury est également sensible à la présentation du tableau.

#### ▪ **Les questions.**

A la suite de la leçon, les candidats se voient poser quelques questions qui ont plusieurs objectifs :

- Préciser un point qui n'était pas clair lors de l'exposé et permettre au candidat de corriger quelques erreurs.
- Contrôler la solidité des connaissances du candidat sur les points abordés lors de la leçon. Cette phase de questions ne doit pas être négligée car elle a une importance dans la note. Un exposé moyen peut être rattrapé par de bonnes réponses et inversement, après un exposé faisant illusion, un candidat peut montrer qu'il n'a pas vraiment compris le sujet traité.

## • Quelques remarques concernant les différentes leçons.

La liste des leçons a été légèrement modifiée en 2003, le jury souhaitant proposer des sujets plus larges permettant au candidat de choisir plus librement les exemples développés et de mieux montrer l'unité des théories utilisées dans différents domaines de la physique.

S'il n'interdit pas aux candidats de s'appuyer sur la démarche d'ouvrages existants (lorsqu'elle est bien comprise), le jury apprécie à sa juste valeur une construction personnelle, originale et cohérente.

**Leçon n° 4 :** L'intérêt des équilibres statique et dynamique ne doit pas se résumer à une suite de calculs indigestes. Il faut dégager l'idée physique qu'on peut amener en raisonnant dans le référentiel en rotation et en présentant l'effet des forces d'inertie sur un solide de forme la plus élémentaire possible. Cette leçon doit être illustrée expérimentalement.

**Leçon n° 6 :** On ne doit pas se complaire dans les calculs en fournissant un catalogue de vecteurs constants

**Leçon n° 8 :** L'étude des collisions doit être menée en utilisant au mieux la notion de quadri-vecteur.

Il est souvent inutile de projeter la relation de conservation de la quantité de mouvement (par exemple pour étudier l'effet Compton).

L'énergie de seuil est une notion importante qu'il est nécessaire de présenter ; le candidat doit être en mesure d'expliquer pourquoi il s'intéresse à la situation où tous les produits de réaction sont immobiles dans le référentiel du centre de masse. En outre, des exemples plus actuels que la création de paires proton anti-proton peuvent être envisagés.

**Leçon n° 9 :** Cette leçon doit être abordée dans le cadre de la relativité.

L'étude du mouvement dans un champ non uniforme est attendue par le jury mais elle ne doit pas se résumer à une débauche de calculs dont l'intérêt physique n'est pas dégagé. Il est en revanche intéressant de mettre en évidence l'effet de piégeage en s'appuyant sur des arguments simples sur les forces magnétiques.

L'utilisation des champs magnétiques en physique des particules est bien connue mais les candidats doivent savoir que des progrès significatifs ont été effectués depuis la mise au point des chambres à bulles et des cyclotrons.

**Leçon n° 10 :** L'équation d'Euler ne constitue pas le sujet central de la leçon et ne doit pas prendre une place excessive.

Diverses expressions du théorème de Bernoulli peuvent être présentées. Il est plus intéressant de présenter des illustrations concrètes ou des applications pratiques que d'exposer une longue suite de formulations.

**Leçon n° 15 :** Cette leçon ne doit pas se résumer à une suite de calculs de variation d'entropie qui conduisent à la conclusion : l'entropie créée est positive. En effet, bien souvent les situations étudiées sont de toute évidence irréversibles.

Par ailleurs, le calcul de la variation d'entropie d'un gaz parfait dans différentes transformations est souvent répétitif et fastidieux. L'entropie est une fonction d'état dont il est possible d'établir l'expression (à une constante additive près) dans certains cas. Ensuite, on peut en calculer la variation, le but de l'opération étant de mettre en évidence les sources de l'irréversibilité et de savoir s'il est possible de passer à des transformations réversibles plus intéressantes.

**Leçon n° 16 :** Au delà de l'exposé classique que l'on trouve toujours, il faut discuter les causes d'irréversibilité : s'agit-il de frottements mécaniques ou de problèmes de diffusion thermique ?

Par ailleurs, les moteurs réversibles ont forcément un fonctionnement lent. : comment peut-on alors récupérer de la puissance avec une telle machine thermique ?

Il est intéressant d'évoquer également la nature des fluides subissant les cycles. Pourquoi certaines machines utilisent-elles des fluides subissant des changements d'état ?

**Leçon n° 17 :** Cette leçon permet d'introduire la notion de travail récupérable.

Il est nécessaire de présenter un exemple montrant clairement que l'on peut éventuellement récupérer du travail lors d'une transformation si celle-ci est bien conduite. Les fonctions d'état  $F$  et  $G$  ne sont pas simplement des cas particuliers de fonctions  $F^*$  et  $G^*$  ; elles ont un intérêt thermodynamique propre et ne doivent pas être confondues avec les potentiels thermodynamiques.

**Leçon n° 25 :** Cette leçon ne doit pas se limiter à la manipulation (même si elle est menée avec virtuosité par un expert en théorie du signal) des transformées de Laplace. Le jury souhaite voir un exposé de niveau raisonnable mettant en évidence les effets du bouclage ainsi que l'existence de problèmes de stabilité.

Cette leçon doit comporter des illustrations expérimentales.

Le titre de cette leçon est modifié pour la session 2004 du concours. Il s'agit de laisser davantage de liberté dans le choix des applications.

**Leçon n° 26 :** Cette leçon qui doit être illustrée expérimentalement ne doit pas se réduire à l'étude du comportement d'un circuit soumis à un signal sinusoïdal. Le jury souhaite voir comment le filtrage transforme un signal électrique quelconque. Ceci suppose une analyse spectrale (fréquences) du signal d'entrée et du signal de sortie. Le candidat doit pouvoir montrer le lien entre la forme du diagramme de Bode du circuit, le comportement de celui-ci (intégrateur dérivateur...) et les propriétés de l'équation différentielle associée.

Une autre remarque s'impose : il n'est pas correct de définir un déphasage à partir d'une tangente ou d'un Arctangente : la fonction argument d'un nombre complexe en revanche correspond bien à la grandeur recherchée.

**Leçon n° 28 :** La leçon ne peut pas se limiter à un exposé débouchant uniquement sur des calculs évidents d'électrostatique et de magnétostatique. Le candidat doit envisager des situations avec des champs dépendant du temps en ARQP ou hors ARQP.

On peut aussi envisager des situations avec milieux matériels.

**Leçon n° 37 :** Cette leçon doit être illustrée expérimentalement, le candidat devant être en mesure de montrer clairement les effets de cohérence spatiale ou temporelle de la source.

**Leçon n° 40 :** La leçon ne peut pas se limiter à une étude du réseau plan en optique. Il faut donc pouvoir dégager les idées importantes assez rapidement pour pouvoir passer à l'étude d'autres domaines.

**Leçon n° 41 :** Les interactions photon matière ne se limitent pas à l'effet photoélectrique et l'effet Compton. On peut aussi s'intéresser à la création de paires.

**Leçon n° 43 :** Cette leçon permet d'introduire la relation  $p=h/\lambda$ . Il ne faut pas oublier la relation entre l'énergie et la pulsation. Par ailleurs ayant construit une onde, on doit se demander quelle est sa vitesse de propagation, quelle est sa vitesse de groupe et en montrer la cohérence avec la mécanique de la particule associée ?

**Leçon n° 44 :** Cette leçon n'est pas une leçon d'histoire des sciences. Le jury attend davantage qu'une présentation de l'atome de Bohr. Au delà du modèle simple, le candidat doit présenter les résultats de la mécanique quantique sans se placer à un niveau de second cycle universitaire.

**Leçon n° 54 :** La leçon porte sur l'étude de phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique. Le candidat ne doit pas se limiter à l'électricité et à la mécanique. Il doit prendre soin de dégager les propriétés communes aux différents exemples présentés. Quel lien y a-t-il entre le circuit RLC et la résonance du sodium ?...

**Leçon n° 55 :** La leçon ne doit pas se limiter à une résolution d'équations différentielles non linéaires.

Une discussion des effets en liaison avec la forme de l'énergie potentielle peut être intéressante.

La présentation d'un oscillateur de van der Pol précâblé sur une plaquette reste trop souvent théorique. En quoi ce système est-il représentatif de problèmes usuels en électronique ?

## Rapport sur la leçon de chimie

Dans cette épreuve, le candidat commence par exposer pendant cinquante minutes une leçon dont l'intitulé se rapporte aux programmes des classes de première scientifique, terminale scientifique (enseignement obligatoire ou de spécialité), terminale SMS, ou des classes préparatoires scientifiques (MPSI, PTSI, MP ou PSI). Ensuite, le jury l'interroge pendant une quinzaine de minutes.

L'épreuve conduit à des prestations de qualité variable, les notes attribuées s'échelonnant de 1 à 20 sur 20. Il en découle un certain nombre de remarques, dont il convient de compléter la lecture par celle des rapports relatifs aux sessions antérieures.

### • **Remarques d'ordre général**

Il s'agit d'un concours de recrutement d'enseignants : lors d'une épreuve de leçon, il est donc naturel d'attendre d'un candidat qu'il mette en valeur ses qualités d'orateur, cherchant avec dynamisme et conviction à transmettre à son auditoire non seulement des connaissances, mais aussi un certain enthousiasme à découvrir de nouvelles notions et l'envie de les approfondir par la suite. Certains candidats y parviennent fort bien ; d'autres se montrent particulièrement timides.

Cette dynamique de présentation doit être servie par un exposé construit logiquement et de manière réfléchi, laissant apparaître un fil directeur à la leçon et comprenant des paragraphes équilibrés. Il n'est pas nécessaire de consacrer une partie entière à des rappels ou des généralités alors que des exemples concrets peuvent être présentés. Trop souvent, l'exposé manque de clarté et les explications sont très confuses. Cela montre que le candidat n'a pas suffisamment approfondi le sujet ou réfléchi à la manière la plus habile de l'expliquer.

Inhérente à cette démarche de construction et quel que soit le thème de la leçon, l'expérience prend une part essentielle dans l'approche et la compréhension des notions abordées. Elle vient le plus souvent en amont de la présentation du phénomène étudié car il s'agit d'adopter la démarche expérimentale du scientifique, qui formule lois, modèles ou théories à la suite de ses observations. Il est particulièrement important que le résultat d'une expérience s'accompagne d'une réflexion sur sa précision, sa validité et, notamment dans le cas des dosages, sa compatibilité avec le résultat attendu. Il est à noter que certains candidats n'accordent aucune confiance à leurs mesures, et les exécutent comme une obligation, sans intention de les utiliser véritablement.

Afin d'optimiser la présentation de la leçon et la gestion du temps, il est conseillé au candidat de préparer avec soin les expériences à présenter. Il est vrai que le jury apprécie de pouvoir évaluer son habileté expérimentale. Mais il est judicieux de trouver un juste milieu : il est donc conseillé au candidat de préparer avant l'arrivée du jury les prises d'essai pour les titrages (il suffira de n'en réaliser qu'une devant le jury), le remplissage des burettes, la pesée des réactifs solides par exemple, et de veiller à présenter une paillasse ordonnée. La maîtrise des techniques expérimentales est évidemment appréciée, tant dans l'aspect pratique que théorique, et la justification du protocole doit être donnée. D'autre part, le candidat ne doit ni se décourager, ni se laisser déconcerter par une réaction ou une expérience non concluante.

L'utilisation de l'outil informatique dans l'exploitation de résultats est un atout qui permet de gagner du temps, à condition d'en maîtriser l'usage. Mieux vaut une courbe correcte tracée à la main qu'un tracé informatique inexploitable. De même, les calculs simples ne doivent pas être effectués à l'aide d'une calculatrice.

La presque totalité des candidats respecte scrupuleusement les consignes de sécurité, parfois même de manière abusive (par exemple le vinaigre, quoiqu'à environ  $1 \text{ mol.L}^{-1}$  en acide

acétique, n'est pas manipulé avec des gants dans la vie courante). Mais on constate que nombre d'entre eux utilisent souvent des quantités excessives de produits ou solutions, sans souci d'économie (ces quantités non utilisées, outre qu'elles sont gâchées, devront en plus être recyclées).

La projection de transparents participe à la dynamique et à l'efficacité de l'exposé. Mais elle doit s'accompagner d'une bonne compréhension de ceux-ci, et de l'appropriation par le candidat de leur contenu si leur élaboration ne relève pas d'une réflexion personnelle. En aucun cas, un exposé ne saurait se limiter à une succession de transparents sans utilisation du tableau.

A la suite de son exposé, le candidat doit rester concentré car il lui faut répondre aux questions que le jury lui pose afin de corriger d'éventuelles erreurs et de s'assurer de ses connaissances sur le sujet.

Ces quelques remarques doivent aider les futurs candidats à construire des leçons équilibrées, dans le respect du programme, et qu'ils exposeront de manière particulièrement claire, pour être compris d'un auditoire qui découvrirait les notions présentées.

### • **Remarques particulières sur quelques leçons**

**Leçon 3 :** il faut concilier l'élaboration d'un conductimètre pour la mise en évidence de l'influence des paramètres physiques, et l'utilisation d'un appareil permettant des mesures fiables.

**Leçon 6 :** la nomenclature ne doit pas être abordée de manière systématique, mais uniquement sur quelques exemples. Il est indispensable d'illustrer les relations entre la structure du squelette carboné et les propriétés physiques, conformément au programme.

**Leçon 10 :** les connaissances générales sur le sujet sont rarement satisfaisantes. Il convient d'expliquer un minimum la synthèse peptidique.

**Leçon 11 :** la détermination expérimentale d'une constante d'acidité doit être effectuée.

**Leçon 13 :** les critères de choix de l'indicateur coloré doivent être clairement donnés et justifiés.

**Leçons comportant des titrages :** plutôt que de titrer une solution de laboratoire par une autre, mieux vaut présenter le titrage d'une espèce contenue par exemple dans un produit de la vie courante.

**Leçon 17 :** la saponification doit être comparée à l'hydrolyse.

**Leçon 18 :** les trois parties méritent un traitement équitable, et la formulation doit être présentée sous un angle chimique.

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

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

**Leçons 24 et 25 :** les protocoles expérimentaux doivent être analysés et compris.

**Leçon 27 :** cette leçon ne se résume pas à l'exposé de la méthode d'écriture des formes de Lewis.

**Leçon 29 :** une illustration expérimentale, au moins, est nécessaire. Il convient, en plus, de réfléchir à plusieurs applications.

**Leçon 31 :** une présentation qualitative ne saurait suffire. Il faut utiliser précisément les constantes de solubilité.

**Leçon 32 :** il est inutile de détailler toutes les définitions et expressions des différentes constantes utilisables.

**Leçon 33 :** la leçon ne consiste pas à donner les différentes expressions de  $E = f\left(\frac{V}{V_{\text{éq}}}\right)$ .

**Leçon 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 36 :** cette leçon ne doit pas se résumer à une présentation qualitative du comportement des mélanges binaires.

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

La liste des nouveaux titres de leçons proposés pour la session 2004 est donnée ci-après. Seuls quelques modifications par rapport à la session 2003 ont été effectuées. Il conviendra de tenir compte des aménagements de programme en MPSI (on tiendra compte du contenu des TP-cours, sans pour autant transformer la leçon en une séance de TP).

## **Rapport sur le montage de physique**

L'épreuve consiste en une présentation pendant 40 minutes d'expériences que le candidat a préparées pendant 4 heures. Le jury pose ensuite des questions destinées à clarifier et approfondir certains points.

Comme les années passées, des montages très réussis portant sur tous les sujets possibles, ont été présentés par des candidats qui s'étaient manifestement très sérieusement préparés à cette épreuve. En revanche, il arrive également que le jury ne voie que de pâles copies d'expériences de cours mal maîtrisées et qui n'occupent qu'une faible fraction du temps imparti : trop de candidats arrivent visiblement sans la préparation nécessaire à l'épreuve.

### **• Remarques générales sur le déroulement de l'épreuve**

Rappelons que pendant l'épreuve de montage, le candidat doit présenter des expériences. Il est bien sûr important qu'il commente les mesures faites, qu'il précise les précautions expérimentales prises et qu'il interprète les phénomènes observés. Mais si le jury comprend l'utilité pour le candidat d'une brève introduction qui l'aide à se mettre en condition, il s'impatiente très vite si elle dure.

Les candidats s'interrogent souvent sur le nombre de manipulations qui doivent être présentées. Il n'y a pas de réponse absolue à cette question, mais, en général, on peut considérer que cinq expériences pertinentes, dont trois donnent lieu à des mesures quantitatives bien interprétées, assurent une bonne note.

Rappelons qu'il est inutile que le candidat répète toute une série de mesures devant le jury ; il est préférable qu'il reprenne seulement un point devant lui, qu'il intègre la mesure ainsi faite à celles qui ont été réalisées pendant la préparation et qu'il présente alors un ensemble cohérent de résultats.

Que faire si ce point ne s'intègre pas harmonieusement aux mesures préalables ? Tout d'abord, insistons sur le fait qu'il est inutile et même nuisible de tenter de camoufler ce désaccord : le jury a eu la possibilité de s'en rendre compte, souvent même avant le candidat. Il est bien plus raisonnable de remarquer le désaccord et d'en chercher l'explication qui est souvent simple. La plus courante est une erreur de calcul ou de lecture ou une banale erreur de branchement, facile à corriger : dans ce cas le jury met généralement le candidat sur la voie. Il peut aussi arriver que la différence soit réelle, causée le plus souvent par la dérive d'un paramètre de contrôle, comme la température ambiante, en particulier au mois de juillet entre 5h et 10h. Il est clair qu'une bonne compréhension des phénomènes en jeu, fruit d'une réflexion qui ne peut qu'avoir été antérieure à l'épreuve, est un guide solide sur lequel le candidat doit pouvoir s'appuyer.

Rappelons une fois de plus qu'une mesure n'a pas de caractère scientifique si elle n'est pas accompagnée de l'estimation honnête de l'incertitude qui l'entache. Celle-ci doit donc impérativement être donnée lors de la présentation du résultat au jury. Nous ne répéterons pas ici les remarques qui ont été faites à ce sujet de nombreuses fois dans les rapports précédents

et qui restent toujours d'actualité. Précisons qu'il n'est pas nécessaire de refaire les calculs en détail : une fois le principe montré, il suffit de préciser les causes d'incertitude prises en compte et de donner le résultat.

Les expériences présentées peuvent être de plusieurs natures. Il existe bien entendu des expériences de démonstration, dont le but est de mettre en évidence l'existence d'un phénomène, et qui peuvent être rigoureuses sans être nécessairement quantitatives. Les autres expériences doivent donner lieu à de véritables mesures. Certaines servent à déterminer la valeur numérique d'une grandeur définie, par exemple la viscosité d'un liquide donné, ou celle de la vitesse du son, valeur qu'on comparera alors utilement à une valeur tabulée ou disponible par ailleurs (on consultera avec profit les rapports des années précédentes). Le candidat s'appuie alors sur une loi physique admise, qui peut se traduire par exemple par une droite dont la pente est reliée à la grandeur étudiée. Il pourrait en principe se contenter dans ce cas d'un seul point, mais faire une série de mesures en faisant varier un paramètre de manière raisonnée présente l'avantage d'améliorer la précision. Parfois il s'agit au contraire de vérifier une loi physique : il faut alors impérativement enregistrer un ensemble de mesures et tracer par exemple la courbe correspondante. Il est dans ce cas souvent souhaitable de ramener la loi illustrée à une relation linéaire : par exemple, lors de l'étude de la traînée aérodynamique  $T$ , on peut enregistrer plusieurs valeurs de celle-ci pour plusieurs valeurs de la vitesse  $v$  et montrer que les points représentant  $T = f(v^2)$  s'alignent mieux que quand on trace  $T = g(v)$ . Répétons ici que les outils informatiques, qui sont à la disposition des candidats sous plusieurs versions, sont une aide très précieuse pour ce genre de manipulation, et que la possibilité d'ajuster une loi à un ensemble de données expérimentales est souvent bien utile (noter à ce sujet que tous les logiciels ne font pas ce genre d'opération avec la même rigueur statistique). À chaque fois que c'est possible, le jury apprécie que les expériences présentées portent sur des domaines et des ordres de grandeurs variés.

### • Remarque à propos des photocopiés et des cédéroms.

Depuis quelques années, bon nombre de centres de préparation accomplissent un considérable travail pour préparer des documents photocopiés, dont plusieurs sont disponibles sous forme de cédérom, généralement très bien faits et qui présentent l'ensemble des montages. Ils proposent pour chaque titre un choix d'expériences adaptées. **Ces photocopiés, disponibles même en dehors des centres de préparation, sont une aide précieuse pour la préparation de l'épreuve de montage pendant l'année qui précède le concours.** Le jury souhaite encourager l'approfondissement de cet effort et la diffusion de ces documents.

Cette année, ces photocopiés ont été mis à la disposition des candidats à la bibliothèque de l'agrégation et étaient donc disponibles lors de l'épreuve. Beaucoup de candidats en ont profité et, pendant les quatre heures de préparation, ils ont largement fait usage des documents en question. Malheureusement, si ceux-ci constituent une très bonne base de travail pour la préparation et l'entraînement à l'épreuve et, comme support initial, pour une réflexion personnelle approfondie (qui seule, rappelons le, peut permettre le succès), ils se sont à l'usage révélés généralement nuisibles aux candidats qui ont cru pouvoir se reposer sur eux pour pallier l'insuffisance de leur préparation initiale. Ces candidats se sont en effet trouvés

absolument incapables d'adapter ou d'expliquer les nombreux "conseils et astuces" qu'ils y ont trouvés, certains d'entre eux allant jusqu'à avouer avoir suivi un protocole sans le comprendre ni même connaître le fonctionnement de ses éléments constitutifs.

Dans ces conditions, **l'utilisation des photocopiés et de leur équivalents sous forme de cédéroms ne sera pas autorisée dès la session 2004.**

### • Remarques diverses sur les montages

L'utilisation de vidéo-projecteurs pour rendre plus lisible les écrans d'ordinateurs est toujours appréciée. Mais, plus généralement, l'ensemble de moyens vidéo actuellement disponibles doit être utilisé plus souvent. Par exemple, il est souhaitable que l'usage des petites caméra style "flexcam" soit étendu : il permet une visualisation bien plus agréable et lisible de nombreux phénomènes et expériences alors que les projections généralement réalisées sont trop souvent pitoyables. Bien sûr, une projection reste nécessaire dans les montages d'optique. Ces images peuvent même servir à des mesures réelles et sérieuses : par exemple, pour la cuve à ondes, la photographie numérique peut remplacer la stroboscopie, et les expériences de dynamique, souvent archaïques, peuvent être rénovées grâce à l'utilisation d'enregistrements vidéo **faits devant le jury**. Et les tables à digitaliser, qui font l'objet d'une utilisation de plus en plus large dans les lycées, couplées à des logiciels adaptés de dépouillement et de modélisation, peuvent avantageusement remplacer les mobiles autoporteurs que l'on voit actuellement : le gain de temps ainsi obtenu autorise une présentation plus riche et une discussion physique plus poussée.

Les Handbooks sont trop souvent absents des salles de montage. C'est pourtant le bon endroit pour chercher une valeur tabulée et prendre conscience de ses possibles variations avec les paramètres de contrôles. Ni les manuels, ni les photocopiés, ne sauraient jouer ce rôle.

La FFT sur oscilloscope numérique ou ordinateur est de plus en plus utilisée. C'est évidemment une bonne chose et dans de nombreux cas, (distorsion du push-pull, spectre d'un signal modulé en amplitude, ...), son usage facilite réellement la compréhension des phénomènes étudiés. En revanche, elle ne saurait se substituer à l'usage du fréquencemètre lorsqu'il s'agit de mesurer avec précision la fréquence d'un signal périodique. Dans tous les cas, les conditions de son utilisation correcte doivent être connues et maîtrisées.

# LEÇONS DE PHYSIQUE 2004

- Utilisation des intégrales premières du mouvement en mécanique. Exemples et applications. (1<sup>er</sup> CU)
- Contact entre deux solides. Frottement de glissement. Exemples. (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
- Caractère non galiléen du référentiel terrestre. Conséquences. (PCSI ou 1<sup>er</sup> CU)
- Mouvement d'un solide autour d'un axe fixe. Equilibrage statique et dynamique. Exemples. (1<sup>er</sup> CU)
- Approximation gyroscopique. Effets dans les domaines macroscopique et microscopique. (1<sup>er</sup> CU)
- Utilisation des lois de conservation dans le problème à deux corps. Applications. (MPSI, PCSI ou 1<sup>er</sup> CU)
- Principes de la cinématique relativiste. Durée propre. Longueur propre. (1<sup>er</sup> CU)
- Collisions en relativité restreinte : application à l'étude des particules élémentaires. (1<sup>er</sup> CU)
- Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique indépendant du temps. Applications. (1<sup>er</sup> CU)
- Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide; validité. Théorèmes de Bernoulli ; limites et applications. (PC)
- Notion de viscosité d'un fluide. Ecoulements visqueux, nombre de Reynolds. Exemples simples. (PC)
- Equations de bilan en mécanique des fluides : exemples et applications. (PC)
- Modèle du gaz parfait. (MPSI ou PCSI)
- Energie interne et échanges énergétiques. (PCSI ou 1<sup>er</sup> CU)
- Exemples de phénomènes irréversibles; bilans d'entropie. (MP ou 1<sup>er</sup> CU)
- Application des deux premiers principes de la thermodynamique au fonctionnement des machines thermiques. (MPSI, PCSI ou 1<sup>er</sup> CU)
- Evolution et condition d'équilibre des systèmes thermodynamiques: potentiels thermodynamiques. (PC)
- Etude thermodynamique d'un système constitué par un corps pur sous plusieurs phases. Exemples. (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
- Notion d'état microscopique. Interprétation statistique de l'entropie. Exemples. (1<sup>er</sup> CU)
- Facteur de Boltzmann. Applications. (1<sup>er</sup> CU)
- Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir. Applications. (MP ou 1<sup>er</sup> CU)
- Etude d'un phénomène de transport : conduction thermique ou diffusion de particules. Applications. (1<sup>er</sup> CU)
- Conversion de puissance électromécanique. Exemples et applications. (PSI ou 1<sup>er</sup> CU)
- Induction électromagnétique. Aspects énergétiques. Applications. (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
- Systèmes bouclés. Applications. (PSI ou 1<sup>er</sup> CU)
- Traitement d'un signal électrique : filtrage linéaire. Etude spectrale. Exemples et applications. (PSI ou 1<sup>er</sup> CU)
- Etude macroscopique des milieux diélectriques. (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
- Utilisation des propriétés de symétrie dans l'étude des champs électromagnétiques. Exemples. (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
- Exemples simples de phénomènes de propagation unidimensionnels. Ondes progressives, ondes stationnaires. Aspects énergétiques. (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
- Propagation dans un milieu dispersif : vitesse de phase, vitesse de groupe ; paquets d'ondes planes et évolution. Exemples. (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
- Dispersion et absorption d'une onde électromagnétique plane dans un milieu diélectrique. Modélisations microscopiques. (PC)
- Réflexion et réfraction d'une onde électromagnétique monochromatique plane à la surface de séparation entre deux milieux diélectriques linéaires homogènes isotropes. (1<sup>er</sup> CU)
- Effet de peau. Réflexion des ondes électromagnétiques planes à la surface d'un milieu conducteur. (MP ou 1<sup>er</sup> CU)
- Propriétés et applications du rayonnement dipolaire électrique. (MP, PC)
- Notion de rayon lumineux. Principe de Fermat. Conséquences. (1<sup>er</sup> 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<sup>er</sup> CU)
37. Obtention d'interférences à deux ondes en optique. Notion de cohérence. (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
38. Interféromètres à division d'amplitude. Applications. (1<sup>er</sup> CU)
39. Diffraction de Fraunhofer. Applications. (1<sup>er</sup> CU)
40. Diffraction par des structures périodiques dans différents domaines spectraux. (1<sup>er</sup> CU)
41. Le photon : la particule et ses interactions avec la matière. (1<sup>er</sup> CU)
42. Absorption, émission spontanée ou induite du rayonnement : coefficients d'Einstein. Applications. (1<sup>er</sup> CU)
43. Dualité onde-corpuscule : Relation de Louis de Broglie ; inégalités d'Heisenberg. Applications. (1<sup>er</sup> CU)
44. Quantification dans les atomes : énergie et moment cinétique. (1<sup>er</sup> CU)
45. Puits de potentiel : exemples et applications en physique quantique. (1<sup>er</sup> CU)
46. Effet tunnel. Applications. (1<sup>er</sup> CU)
47. Le noyau : stabilité, énergie. (1<sup>er</sup> 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<sup>er</sup> CU)
49. Cohésion de la molécule et des solides ; aspects énergétiques. (1<sup>er</sup> CU)
50. Chaîne linéaire infinie d'oscillateurs harmoniques. Modes propres. Approximation des milieux continus. Aspects énergétiques. (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
51. Capacités thermiques : description , interprétations microscopiques. ( 1<sup>er</sup> CU)
52. Paramagnétisme, ferromagnétisme (approximation du champ moyen). (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
53. Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques ; applications. (PC ou 1<sup>er</sup> CU)
54. Mécanismes de la conduction électrique. Loi d'Ohm. Effet Hall. Applications. (1<sup>er</sup> CU)
55. Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique. (1<sup>er</sup> CU)
56. Exemples d'effets de non linéarité sur le comportement d'un oscillateur. (1<sup>er</sup> CU)

## LEÇONS DE CHIMIE 2004

1. Transformation chimique : équation de la réaction, avancement, bilan de matière. (1<sup>ère</sup> scientifique)
2. Solutions électrolytiques ; mise en solution d'espèces ioniques ou moléculaires. (1<sup>ère</sup> scientifique)
3. La conductimétrie : conductivité d'une solution ionique et application à la détermination de concentrations (dosage volumétrique exclu). (1<sup>ère</sup> scientifique)
4. Réactions d'oxydoréduction en solution aqueuse (dosage exclu). (1<sup>ère</sup> scientifique)
5. Dosages directs par réactions acido-basiques et d'oxydoréduction. (1<sup>ère</sup> scientifique)
6. Structure des molécules organiques. Isoméries. Relations structures-propriétés physiques. (1<sup>ère</sup> scientifique)
7. Les grandes familles de réactions en chimie organique sur l'exemple des alcools. (1<sup>ère</sup> scientifique)
8. Etude de l'eau de Javel : obtention, propriétés, dosage. (Terminale Sciences Médico-Sociales)
9. Les acides  $\alpha$ -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.