

Sommaire

1. Composition du jury
2. Avant-propos du président
3. Informations statistiques et réglementation
4. Distributions des notes aux épreuves écrites et orales
 - Épreuves écrites : distribution des notes de l'ensemble des candidats
 - Épreuves écrites : distribution des notes des candidats admissibles
 - Épreuves orales : distribution des notes des candidats admissibles
 - Corrélation entre la moyenne des notes d'écrit et la moyenne des notes d'oral
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 2007
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 2008

1. Composition du jury

FABRE Claude (M)	<i>Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie - Paris 6 Président du Jury</i>
LE BOURHIS Jean-François	<i>Inspecteur Pédagogique Régional de l'académie de Caen Vice-Président du Jury, Secrétaire général</i>
PIETRYK Gilbert	<i>Inspecteur Général de l'Education Nationale Vice-Président du Jury</i>
BESSY Geneviève	<i>Professeur au Lycée Montaigne à Bordeaux</i>
BOUGAULT Catherine	<i>Maître de conférences Université Joseph Fourier Grenoble</i>
BRASSELET Pascal	<i>Professeur au Lycée Hoche à Versailles</i>
CHAUBET Christophe	<i>Professeur à l'Université de Montpellier II</i>
CHOIMET Nicolas	<i>Professeur au Lycée Montaigne à Bordeaux</i>
COTE Denis	<i>Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie - Paris 6</i>
DELEPORTE Emmanuelle	<i>Professeur à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan</i>
DESBIOLLES Pierre	<i>Maître de conférences à l'Université P. et M. Curie - Paris 6</i>
DUBOURG Patrick	<i>Professeur au Lycée Montesquieu au Mans</i>
DUPUIS Gérard	<i>Professeur au Lycée Faidherbe à Lille</i>
GUEST Dominique (Mme)	<i>Professeur au Lycée Louis le Grand à Paris</i>
HOUSSIN Marie	<i>Maître de conférences à l'Université de Provence</i>
JOACHIM Olivier	<i>Professeur au Lycée Buffon à Paris</i>
LEBLANC Anne	<i>Professeur au Lycée Marcelin Berthelot à St Maur</i>
MANASSES CAVELIER Josiane	<i>Professeur au Lycée Chateaubriand à Rennes</i>
NAKATANI Keitaro	<i>Professeur à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan</i>
LOUNIS Brahim	<i>Professeur à l'Université de Bordeaux 1</i>
PARISI Jean-Marie	<i>Professeur au Lycée Loritz à Nancy</i>
REZEAU Laurence	<i>Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie - Paris 6</i>
ROBERT Vincent	<i>Maître de conférences à l'Ecole Normale Supérieure de Lyon</i>
SANZ Marie-Noëlle	<i>Professeur au Lycée Saint Louis à Paris</i>

2. AVANT-PROPOS

Le nombre de postes ouverts au concours 2007 de l'agrégation externe de sciences physiques option physique était identique à celui de 2006. Le cru 2007 s'avère dans ces conditions très semblable au cru 2006, et de même qualité : malgré une légère diminution du nombre de candidats ayant réellement concouru, les barres d'admissibilité et d'admission ont très légèrement progressé, la barre d'admission étant maintenant très proche de 10/20. Un seul chiffre marque une importante variation par rapport à l'année précédente, celui de la proportion des femmes admises au concours, qui passe de 24% à 35%.

Tentons de tracer le portrait robot de l'agrégé de sciences physiques que le jury souhaite recruter : il doit évidemment avoir une excellente maîtrise du programme des classes dans lesquelles il est susceptible d'enseigner, dans le secondaire et dans les classes préparatoires aux grandes écoles, mais il doit aussi avoir une bonne connaissance des sciences physiques en général, pour pouvoir mettre en perspective son enseignement, être à même de faire face aux évolutions des programmes, et pour pouvoir répondre aux questions des élèves. Il doit avoir par-dessus tout la capacité de communiquer sa passion pour la physique et d'éveiller la curiosité des élèves. Il doit leur donner envie de se poser des questions, de comprendre les phénomènes naturels et le fonctionnement des appareils de haute technologie qu'ils utilisent tous les jours, comme une mémoire d'ordinateur, un GPS ... Il doit donc maîtriser les deux aspects indissociables de la physique: son côté expérimental, concret, technique, et son côté théorique, conceptuel, nécessitant l'utilisation d'outils mathématiques élaborés.

Les épreuves écrites permettent une première sélection sur les connaissances des candidats et leur capacité à les utiliser pour aborder et résoudre des questions nouvelles, en liaison avec des sujets tirés de la recherche récente. L'oral quant à lui doit permettre au candidat de faire la preuve des qualités que nous avons énoncées dans le paragraphe précédent. Le graphe inclus à la fin de la partie IV montre qu'il n'existe pas de corrélation forte entre les notes d'écrit et les notes d'oral, et illustre l'aspect complémentaire des qualités testées par les différentes épreuves. Chaque sujet de leçon (de physique ou de chimie) permet au candidat de présenter et d'expliquer des phénomènes (physiques ou chimiques), de présenter le cadre théorique dans lequel ils s'insèrent, de les illustrer par des expériences bien choisies ou des exemples concrets, et d'en montrer si c'est possible des applications. Le jury est évidemment sensible à la qualité de la construction de la leçon, à sa rigueur et sa clarté. Il apprécie l'enthousiasme et la force de conviction. L'épreuve de montage est l'occasion pour le candidat de démontrer son habileté expérimentale, sa rigueur dans la définition et la réalisation du protocole expérimental, sa capacité à exploiter les résultats de mesure et à évaluer leur fiabilité. Répétons le une fois encore : en leçon comme en montage, il n'existe pas de modèle attendu par le jury pour chacun des sujets proposés, et l'originalité est appréciée lorsqu'elle est maîtrisée. D'ailleurs les titres des sujets proposés évoluent progressivement de manière à laisser une plus grande liberté aux candidats dans leur choix de présentation.

Grâce à des efforts constants d'équipement effectués ces dernières années, des outils performants, informatiques et vidéo, sont maintenant à la disposition des candidats : banque d'images et d'animations, logiciels de traitement et de présentation de données. Ces outils sont une aide précieuse : ils permettent une amélioration importante dans la qualité et la visibilité des schémas et dessins présentés. Ils permettent aussi d'illustrer simplement le sujet présenté par des photos ou schémas d'applications. Ils ouvrent aussi de nouvelles possibilités de présentation grâce en particulier aux séquences animées. Ils doivent cependant être utilisés à bon escient, car ils ne garantissent pas

à eux seuls la qualité pédagogique de la présentation. Les candidats doivent en particulier éviter d'utiliser un logiciel qu'ils ne maîtrisent pas bien et qui peut leur faire perdre un temps précieux. En revanche ils ne doivent pas hésiter à utiliser les flexcams qui sont à leur disposition dans chaque salle et qui sont d'une utilisation facile. Elles permettent de présenter sur l'écran une version agrandie des expériences, donc plus facilement compréhensible par l'auditoire.

La session 2007 de l'agrégation de sciences physiques est une preuve que la tendance à la baisse du nombre d'étudiants en physique, constatée en France et dans beaucoup d'autres pays, n'entraîne pas nécessairement la baisse du niveau de ceux pour qui c'est une réelle vocation : le jury a eu le plaisir, cette année comme les années précédentes, d'accueillir au sein du corps des agrégés un nombre important de très bons physiciens, qui dominant à l'évidence leur matière et seront capables de transmettre aux nouvelles générations leurs connaissances et leur passion pour la physique. Le métier de professeur agrégé de physique et chimie n'a rien perdu de son attrait, au contraire : parmi les admis de cette année, on remarque, outre les étudiants issus de M1 ou M2 et les enseignants déjà en poste, un nombre important de titulaires d'une thèse de doctorat ou d'un diplôme d'ingénieur. Ces nouvelles recrues seront précieuses pour renforcer les liens entre la physique telle qu'elle est enseignée dans les établissements, celle qui s'élabore dans les laboratoires de recherche et celle qui est utilisée dans la haute technologie et dans l'industrie.

Le Président du jury

3. INFORMATIONS STATISTIQUES

135 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 des années 2004, 2005 et 2006 étant rappelées à titre de comparaison.

	2007	2006	2005	2004
Inscrits	1691	1785	1666	1378
Présents aux trois épreuves	815	853	875	732
Admissibles	289	290	326	323
Barre d'admissibilité	51,8/120	52/120	45,2/120	43/120
Moyenne générale du candidat classé premier	17,76/20	19,02/20	18,88/20	18,54/20
Moyenne générale du dernier candidat reçu	9,99/20	9,95/20	8,30/20	8,69/20
ADMIS	135	135	180	162

EPREUVES ECRITES

Les épreuves écrites se sont déroulées les 23, 24 et 25 avril 2007.

Moyenne des candidats aux épreuves écrites :

Nature de l'épreuve	Moyenne des candidats ayant composé	Moyenne des candidats admissibles
Composition de physique	7,53	12,20
Composition de chimie	8,48	12,19
Problème de physique	7,16	11,13

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 21 juin au 18 juillet 2007.

Moyenne des candidats aux épreuves orales :

Nature de l'épreuve	Moyenne des candidats présents aux épreuves orales	Ecart-type
Leçon de physique	9,05/20	5,02
Leçon de chimie	9,32/20	4,05
Montage de physique	8,92/20	4,49

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

Répartition par date de naissance des candidats

Année de naissance	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
1985	21	17
1984	67	44
1983	49	26
1982	32	11
1981	19	5
1980	15	4
1979	12	7
1978	13	6
1977	8	2
1976	8	3
1975	8	1
1974	4	0
1973	4	3
1972	3	0
1968 à 1971	19	6
antérieure à 1968	7	0

Répartition par titres et diplômes

Titre ou diplôme	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
Doctorat	30	12
DEA ou M2	20	8
Ingénieur , diplôme grande école	36	17
Maîtrise ou équivalent	182	94
CAPES, PLP	18	2
Autres	3	2

Répartition par profession

Profession	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
Etudiant	138	76
Elèves d'une ENS	49	36
Elève IUFM 1 ^{ère} année	22	4
Certifiés et PLP stagiaires	14	1
Enseignant MEN	42	7
Autres ministères	0	0
Hors fonct publique/sans emploi	12	6
Autres	12	5

Répartition par sexe

	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
Homme	201	87
Femme	88	48

REGLEMENTATION

Programme :

Le programme des épreuves écrites et orales de la session 2007 est décrit dans le BO spécial n° 3 du 27 avril 2006.

Le programme de la session 2007 est identique à celui de la session 2006.

Epreuves :

Les épreuves écrites comportent :

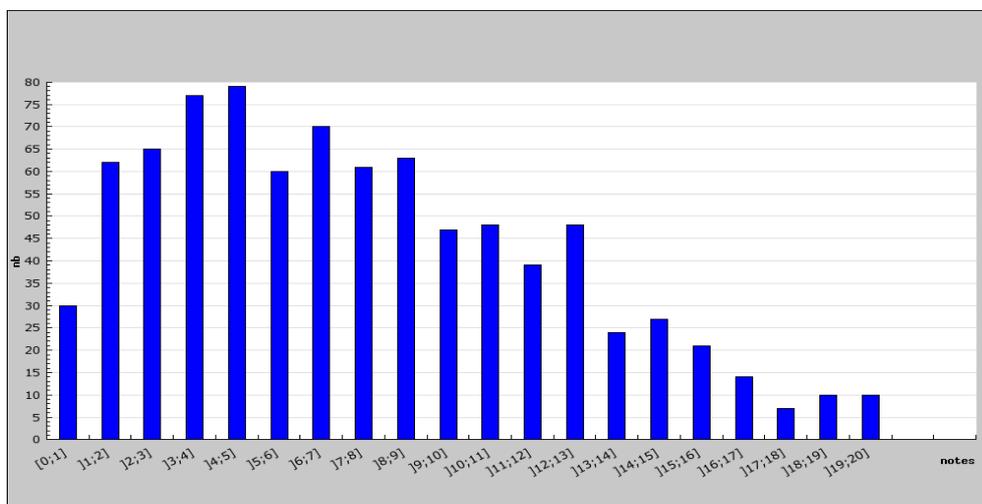
- Une composition de physique de durée 5 h (coefficient 2)
- Une composition de chimie de durée 5 h (coefficient 2)
- Un problème de physique de durée 6 h (coefficient 2)

Les épreuves orales comportent :

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

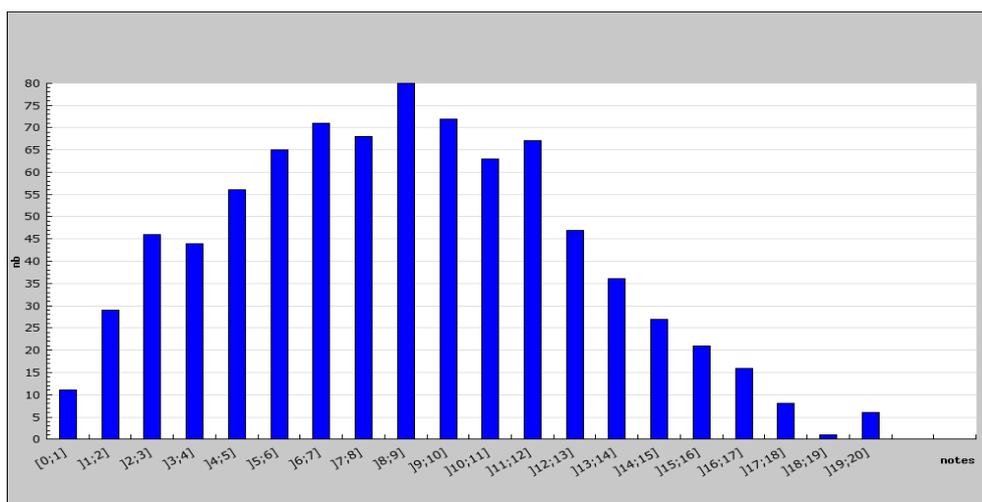
4-1 Distribution des notes pour l'ensemble des candidats aux épreuves écrites

Composition de physique



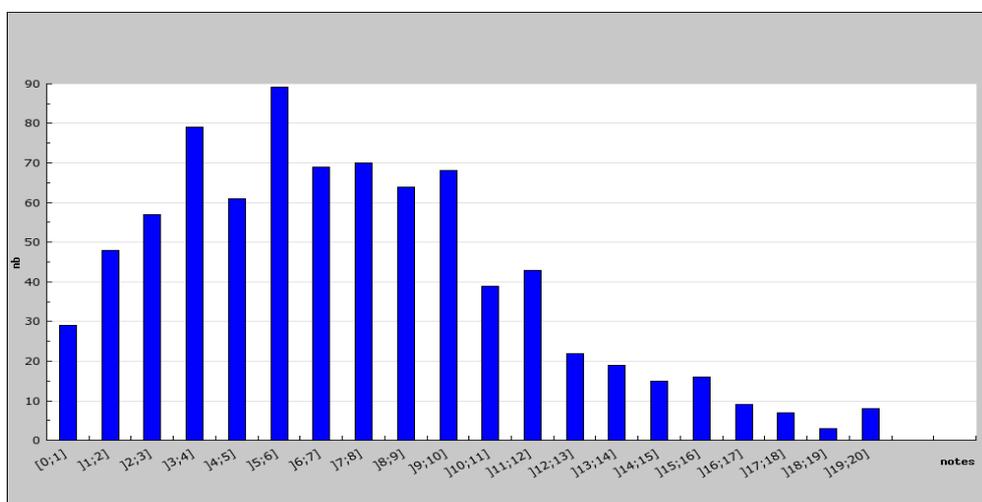
Moyenne :	7,53
Ecart-type :	4,48

Composition de chimie



Moyenne :	8,48
Ecart-type :	4,08

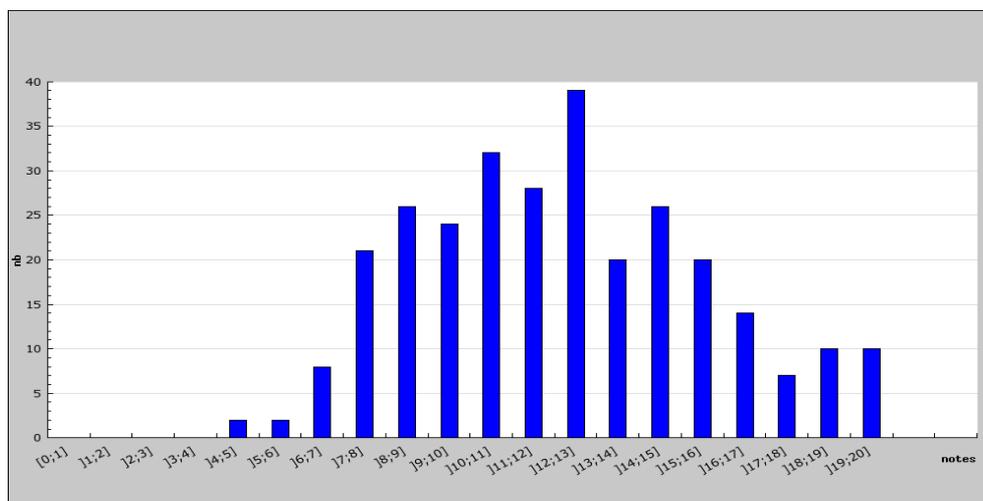
Problème de physique



Moyenne :	7,16
Ecart-type :	4,14

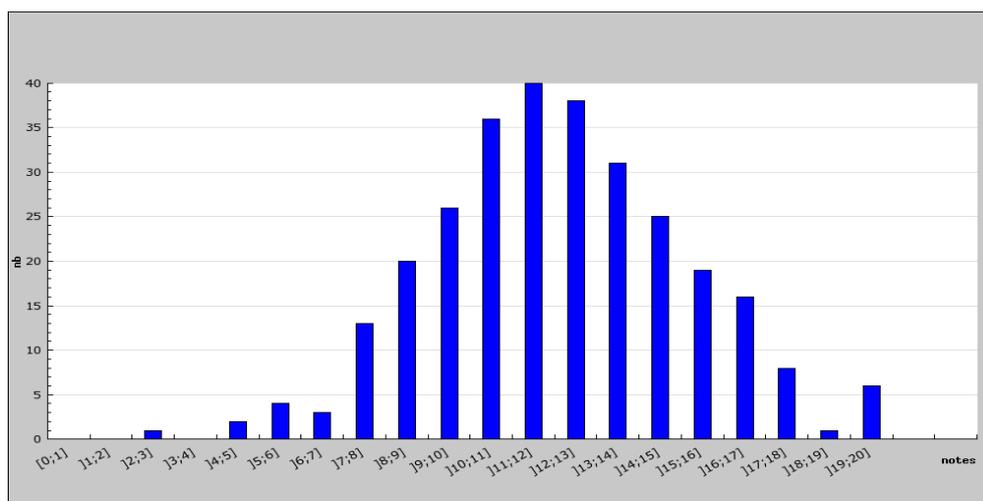
4-2 Distribution des notes pour les candidats admissibles aux épreuves écrites

Composition de physique



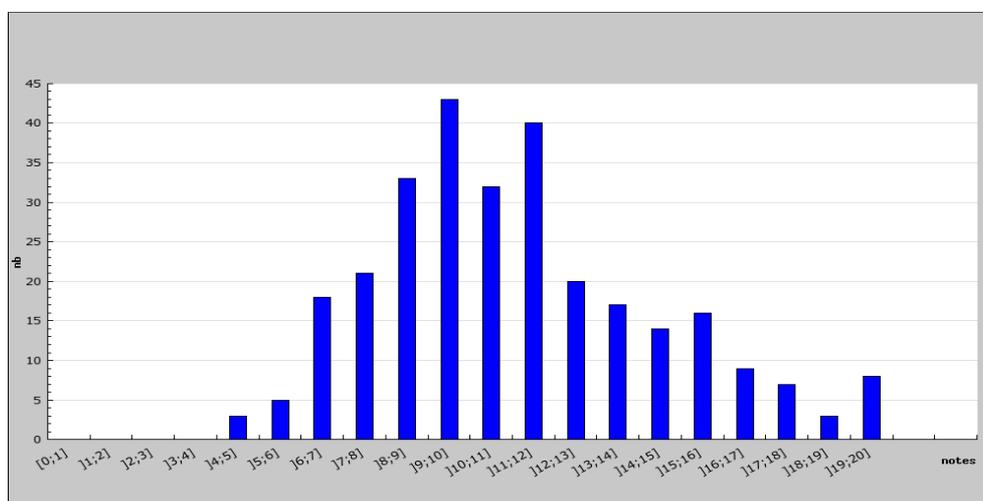
Moyenne :	12,2
Ecart-type :	3,4

Composition de chimie



Moyenne :	12,19
Ecart-type :	3,02

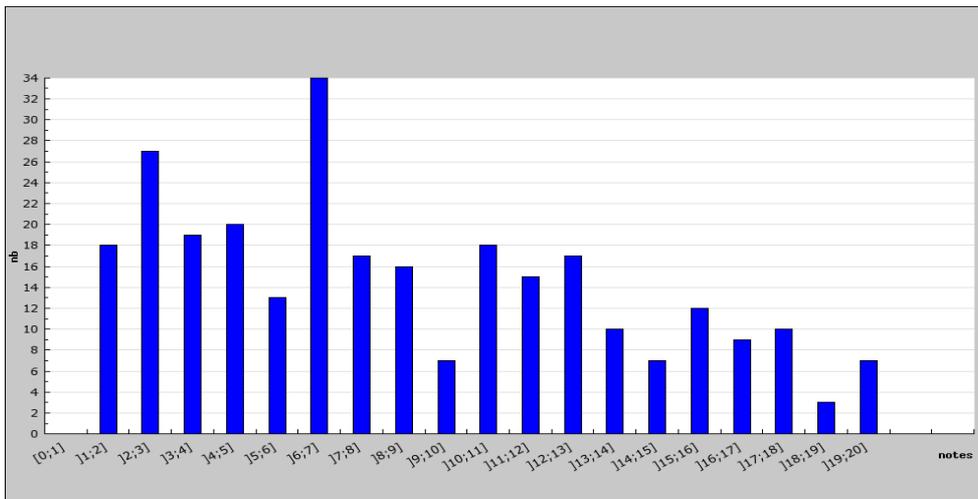
Problème de physique



Moyenne :	11,13
Ecart-type :	3,31

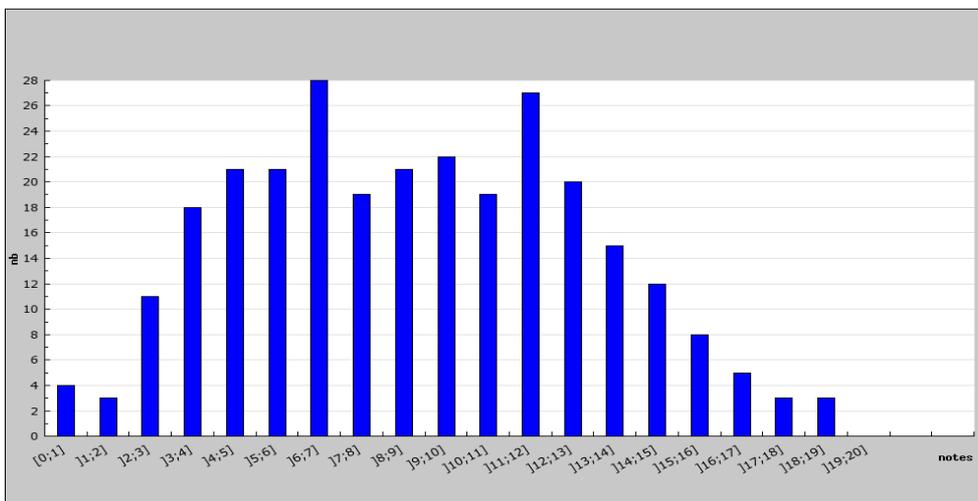
4-3 Distribution des notes aux épreuves orales

Leçon de physique



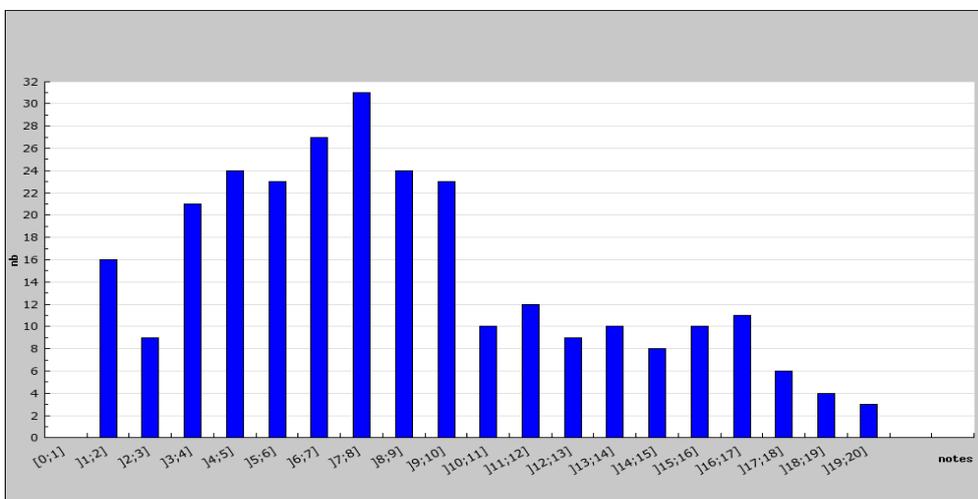
Moyenne :	9,05
Ecart-type :	5,02

Leçon de chimie



Moyenne :	9,32
Ecart-type :	4,05

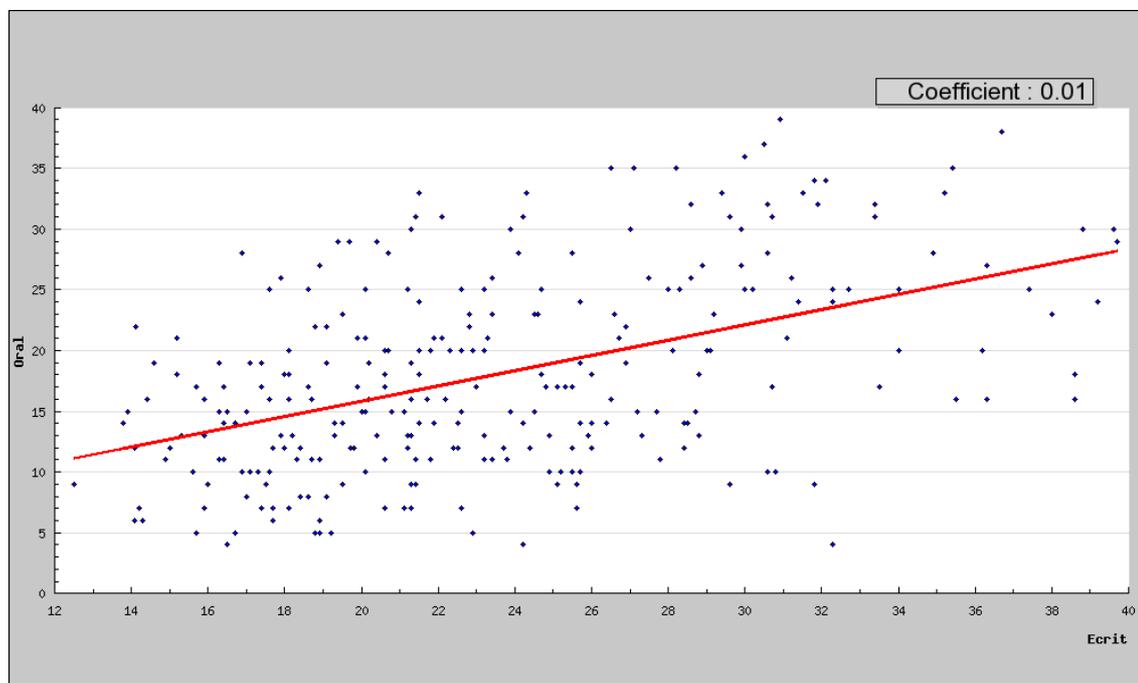
Montage



Moyenne :	8,92
Ecart-type :	4,49

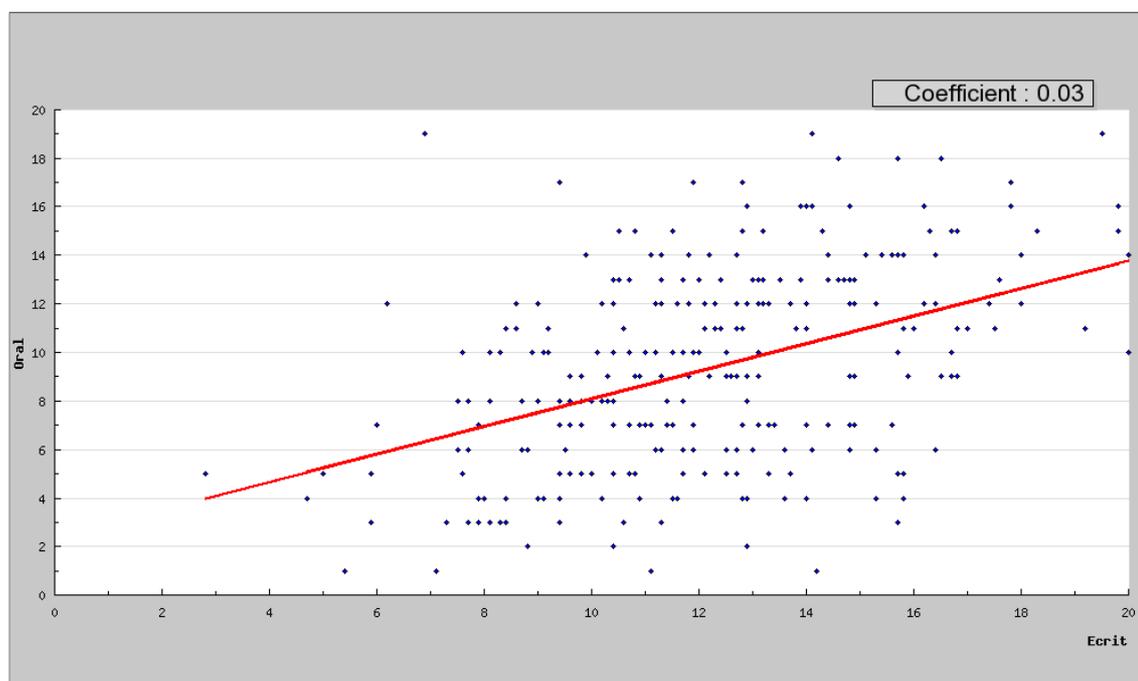
4-4 Corrélation épreuves écrites / épreuves orales

Composition de physique + Problème de physique / Leçon de physique + Montage



Coefficient : coefficient de corrélation

Composition de chimie / Leçon de chimie



Coefficient : coefficient de corrélation

SESSION DE 2007**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.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit..

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

Propagation d'une onde électromagnétique dans le domaine optique

Le sujet traite de quelques aspects des phénomènes de propagation optique dans différents milieux.

La partie I est une introduction à l'optique géométrique qui débouche sur une première étude des fibres optiques à saut puis à gradient d'indice. La partie II est consacrée à l'étude de la propagation d'une onde électromagnétique dans les milieux diélectriques linéaires homogènes et isotropes, avec comme finalité l'application au guidage d'une onde. La partie III traite ensuite de la propagation optique dans les milieux non isotropes uniaxes, et enfin la partie IV aborde l'optique non linéaire.

La partie I est totalement indépendante du reste de la composition. Les autres parties utilisent des définitions communes, mais peuvent être abordées de manière indépendante.

La plus grande importance sera accordée à la qualité de la rédaction et de la présentation, et les réponses aux questions qualitatives devront être claires, argumentées, pouvant s'appuyer sur un ou plusieurs exemples.

On rappelle que la célérité de la lumière dans le vide est $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ et que la permittivité diélectrique du vide est $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ F m}^{-1}$.

Partie I : Optique géométrique

I-1- Définir avec soin l'approximation de l'optique géométrique.

I-2- Définir un « rayon lumineux ». Quelles sont les trois propriétés fondamentales vérifiées par les rayons lumineux dans le cadre de l'optique géométrique ?

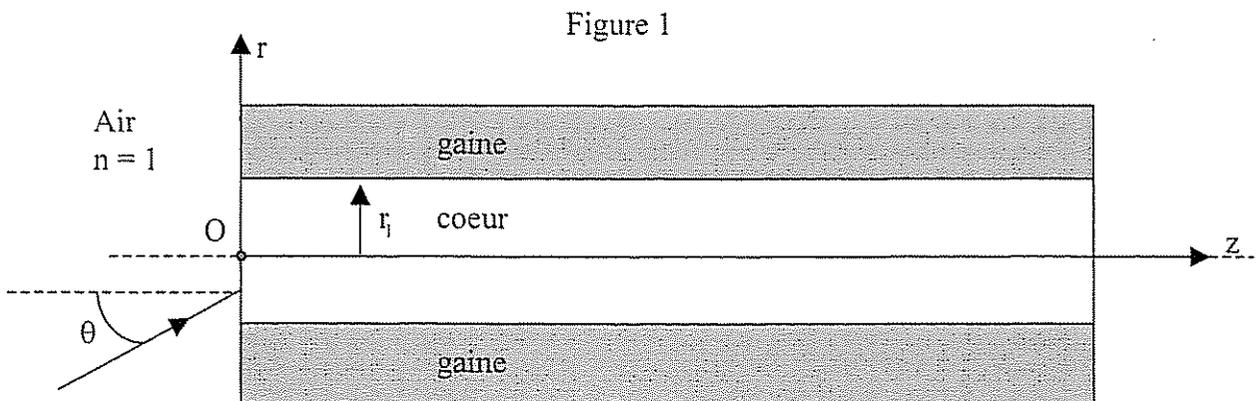
I-3- Principe de Fermat

Considérons un milieu transparent et isotrope, d'indice en un point P quelconque noté $n(P)$, et une courbe \mathcal{C} dans ce milieu joignant deux points A et B. On désigne par ds un élément de longueur de cette courbe.

- a- Donner sommairement la signification de chacun des termes « transparent » et « isotrope ».
- b- Définir le « chemin optique » $L(\mathcal{C})$ le long de la courbe \mathcal{C} , et en donner le sens physique.
- c- Énoncer le principe de Fermat et donner, en argumentant, une expression mathématique de cet énoncé.

I-4- Conséquences du principe de Fermat. Lois de Snell-Descartes

- a- Montrer que le principe de Fermat permet de retrouver la loi de propagation rectiligne dans un milieu homogène, en donnant rapidement la signification du terme « homogène », ainsi que le principe de retour inverse de la lumière.
- b- Considérons un segment rectiligne $[AB]$, dont les extrémités A et B subissent des déplacements élémentaires $d\vec{A}$ et $d\vec{B}$. En notant \vec{u} le vecteur unitaire porté par $[AB]$ et dirigé de A vers B, montrer que : $dAB = \vec{u} \cdot (d\vec{B} - d\vec{A})$
- c- En utilisant le résultat précédent, retrouver à partir du principe de Fermat les première et deuxième lois de Snell-Descartes, aussi bien pour la réflexion que pour la réfraction d'un rayon lumineux à la surface d'un dioptre séparant deux milieux transparents, isotropes et homogènes, d'indices n_1 pour le milieu d'incidence et n_2 pour le milieu de réfraction.
- d- Qu'appelle-t-on « angle de réfraction limite » ? Dans quel cas peut-on envisager un phénomène de réflexion totale ?
- e- **Application : la fibre optique à saut d'indice**



Une fibre optique est fabriquée à base de verres ou de plastiques supposés transparents et isotropes. La fibre à saut d'indice est constituée d'un cœur cylindrique homogène de rayon r_1 , d'indice n_1 et d'axe Oz, et d'une gaine cylindrique d'indice n_2 entourant le cœur et de même axe

(cf figure 1). On introduit $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$. Dans la pratique, n_1 et n_2 ont des valeurs très voisines, et $|\Delta| \approx 10^{-2}$.

On considère, dans l'air d'indice 1, un rayon incident dont le plan d'incidence contient l'axe Oz, et qui arrive sur l'entrée de la fibre avec une incidence θ (voir figure 1).

- α - Comment faut-il choisir n_1 et n_2 pour que la lumière soit guidée, c'est à dire pour que la réflexion totale puisse se produire ?
- β - Montrer alors que, si θ reste inférieur à un angle θ_{\max} , un rayon peut être guidé dans le cœur. On appelle ouverture numérique O.N. la quantité $\sin \theta_{\max}$. Exprimer l'O.N. en fonction de n_1 et Δ . Faire l'application numérique avec $\Delta = 10^{-2}$ et $n_1 = 1,50$.
- γ - Que se passe-t-il si on courbe fortement la fibre ?
- δ - Une impulsion lumineuse arrive à $t = 0$, au point O sur la fibre précédente, sous la forme d'un faisceau conique convergent d'axe Oz, de demi-angle au sommet $\theta_i < \theta_{\max}$. Pour une fibre de longueur L, calculer l'élargissement temporel Δt de cette impulsion à la sortie de la fibre. On donne $L = 10$ m, $\theta_i = 8^\circ$. Faire l'application numérique.

I-5- Extension à un milieu non homogène : loi fondamentale de l'optique géométrique

En utilisant les lois de Snell-Descartes relatives à la réfraction dans un milieu isotrope non homogène, on peut aboutir à la loi fondamentale de l'optique géométrique : $\frac{d(n\bar{u})}{ds} = \overline{\text{grad } n}$ où \bar{u} est le vecteur unitaire tangent au rayon lumineux, n l'indice du milieu et s l'abscisse curviligne le long de ce rayon, en un point donné de ce dernier.

En introduisant \vec{v} , vecteur unitaire porté par la normale principale au rayon et orienté dans sa concavité, et $R > 0$, rayon de courbure de ce rayon au point considéré, on peut montrer que la loi fondamentale de l'optique géométrique permet d'aboutir à l'expression plus simple suivante :

$$\frac{n}{R} = \vec{v} \cdot \overline{\text{grad } n}$$

a- En s'appuyant sur un exemple concret bien choisi, discuter du sens physique de cette dernière formule. Décrire une expérience de laboratoire permettant une illustration simple de ce phénomène.

b- Application : la fibre optique à gradient d'indice

On reprend le cadre de l'application précédente (question I-4-e), mais, afin de remédier en particulier à l'élargissement des impulsions, on remplace le cœur par un milieu inhomogène

d'indice $n(r)$ vérifiant l'équation suivante : $n^2(r) = n_1^2 \left\{ 1 - 2\Delta \left(\frac{r}{r_1} \right)^2 \right\}$ pour $r < r_1$, où r

désigne la distance du point considéré à l'axe Oz. La gaine reste homogène d'indice n_2 , et on a

encore $n_1 = n(r=0) = 1,50$ et $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = 10^{-2}$.

On considère un rayon lumineux pénétrant dans la fibre en O avec l'incidence θ et se propageant dans un plan axial (le plan d'incidence contient l'axe Oz) et dans le cœur.

α - On introduit α , angle formé en un point par le rayon lumineux et l'axe Oz. Que peut-on dire de la quantité $n \cos \alpha$? Établir alors l'équation de la trajectoire de ce

rayon lumineux en fonction de r_1 , $\theta_0 = \text{Arcsin} \left(\frac{\sin \theta}{n_1} \right)$ et Δ . Quelle est la nature de

cette trajectoire ? Montrer que le rayon coupe l'axe (Oz) en des points régulièrement espacés d'une longueur d qu'on exprimera en fonction de r_1 , Δ et θ_0 .

β - Dans les conditions précédentes, quelle est la condition sur θ pour que le rayon se propage effectivement dans le cœur de la fibre ? En déduire l'ouverture numérique en fonction de Δ et n_1 . Faire l'application numérique et commenter.

- γ - En considérant une impulsion lumineuse identique à celle de l'application précédente, l'élargissement $\Delta t'$ de cette impulsion à la sortie d'une fibre à gradient d'indice de longueur L est donné par $\Delta t' = \frac{n_1 L}{c} \left(\frac{1}{2 \cos \theta_0} - 1 + \frac{\cos \theta_0}{2} \right)$. Faire l'application numérique pour $L = 10$ m et $\theta_i = 8^\circ$ et conclure .
- δ - Donner des exemples pratiques d'utilisation de fibres optiques.

Partie II : Propagation dans un milieu diélectrique non magnétique

A- Etude générale macroscopique

II-A-1- Définitions générales

- a- Expliquer ce qu'on entend par « charges libres » et « charges liées » dans un milieu matériel.
- b- Définir un milieu diélectrique et le vecteur polarisation \vec{P} en un point de ce milieu (on n'omettra pas de donner l'unité de cette grandeur).
- c- Dans un milieu diélectrique non magnétique, rappeler sans justification les relations qui relient le vecteur polarisation \vec{P} et les densités volumiques de charges et de courants liés (notés respectivement $\rho_{\text{liées}}$ et $\vec{j}_{\text{liées}}$) en un point de ce milieu.
- d- Rappeler les équations de Maxwell dans un tel milieu en introduisant le vecteur déplacement électrique \vec{D} dont on donnera la définition et l'unité.
- e- On considère deux milieux diélectriques non magnétiques, séparés par une surface Σ . Ecrire sans démonstration les relations de passage entre ces deux milieux, concernant les champs électrique \vec{E} , magnétique \vec{B} et le vecteur \vec{D} .

II-A-2- Cas particulier d'un milieu diélectrique parfaitement isolant, non magnétique, linéaire, homogène et isotrope

Dans toute la suite, on appellera (\mathcal{M}) un tel milieu.

Un milieu est dit parfaitement isolant si les densités de charges et de courants libres sont nulles en tout point et pour tout temps : $\rho_{\text{libres}} = 0$, $\vec{j}_{\text{libres}} = \vec{0}$.

- a- Donner la signification de chacun des termes « linéaire », « homogène » et « isotrope ». Pourquoi est-il judicieux d'étudier un tel milieu en réponse sinusoïdale, en utilisant la notation complexe ?
- b- Donner la définition et l'unité de la susceptibilité diélectrique complexe $\chi_e(\omega)$ et de la permittivité diélectrique complexe $\underline{\epsilon}(\omega)$ à la pulsation ω . Quelle relation relie ces deux grandeurs ?

II-A-3- Propagation des ondes électromagnétiques dans (\mathcal{M})

Nous allons nous intéresser ici à la propagation, dans (\mathcal{M}) de permittivité diélectrique complexe $\underline{\epsilon}(\omega)$, d'une onde électromagnétique plane progressive harmonique décrite en notation complexe par les champs électrique $\vec{E}(M, t) = \vec{E}_0(M) \exp(-i\omega t)$ et magnétique $\vec{B}(M, t) = \vec{B}_0(M) \exp(-i\omega t)$, en un point M du milieu et à l'instant t. On rappelle que $i^2 = -1$.

- a- Déterminer les équations de propagation des champs complexes $\vec{E}(M, t)$ et $\vec{B}(M, t)$ dans ce milieu (équations découplées vérifiées séparément par $\vec{E}(M, t)$ et $\vec{B}(M, t)$).
- b- En déduire, en précisant la forme choisie pour les fonctions $\vec{E}_0(M)$ et $\vec{B}_0(M)$, la relation de dispersion dans ce milieu (on introduira un vecteur d'onde \vec{k} a priori complexe).
- c- Définir l'indice complexe $\underline{n}(\omega) = n_r(\omega) + i n_i(\omega)$. Donner l'interprétation physique de $n_r(\omega)$ et de $n_i(\omega)$. Caractériser les zones du spectre où (\mathcal{M}) est transparent.
- d- Quelle est la structure du champ électromagnétique dans le milieu ? $\vec{E}(M, t)$ et $\vec{B}(M, t)$ sont-ils nécessairement en phase ?
- e- Déterminer la valeur moyenne temporelle du vecteur de Poynting \vec{R} dans ce milieu. Commenter le résultat obtenu.

B- Réflexion et réfraction d'une onde plane à la surface de séparation de deux milieux $(\mathcal{M})_1$ et $(\mathcal{M})_2$ transparents

Une onde plane monochromatique, polarisée rectilignement et de pulsation ω_i , est incidente à la surface de séparation Σ entre deux milieux diélectriques linéaires homogènes isotropes parfaitement isolants non magnétiques $(\mathcal{M})_1$ et $(\mathcal{M})_2$, transparents, d'indices réels respectifs n_1 pour le milieu d'incidence $(\mathcal{M})_1$ et n_2 pour le milieu de réfraction $(\mathcal{M})_2$.

II-B-1- Lois de Snell-Descartes

Montrer que les lois de Snell-Descartes (réflexion et réfraction) peuvent être déduites de l'écriture des relations de passage des champs au niveau de Σ .

II-B-2- Formules de Fresnel

On se place dans le cas où l'onde incidente est polarisée parallèlement au plan d'incidence. On appelle $r_{//}$ et $t_{//}$ respectivement les coefficients de réflexion et de transmission pour l'amplitude du champ électrique, i_1 l'angle d'incidence et i_2 l'angle de réfraction.

a- Quelles sont les quantités conservées à la traversée de la surface Σ ? On justifiera brièvement la réponse.

b- On donne :

$$|r_{//}| = \left| \frac{\tan(i_2 - i_1)}{\tan(i_2 + i_1)} \right| = \left| \frac{n_2 \cos i_1 - n_1 \cos i_2}{n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} \right|$$

$$\text{et } |t_{//}| = \left| \frac{2 n_1 \cos i_1}{n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} \right|.$$

Définir et déterminer dans ce cas les coefficients de réflexion $R_{//}$ et de transmission $T_{//}$ en puissance. Commenter.

Dans le cas où le champ électrique est polarisé perpendiculairement au plan d'incidence, on aboutit aux coefficients de réflexion r_{\perp} et de transmission t_{\perp} en amplitude suivants :

$$|r_{\perp}| = \left| \frac{\sin(i_2 - i_1)}{\sin(i_2 + i_1)} \right| \quad |t_{\perp}| = \left| \frac{2(\cos i_1)(\sin i_2)}{\sin(i_1 + i_2)} \right|$$

- c- Définir ce qu'on appelle l'angle de Brewster i_B , et donner son expression. Que se passe-t-il lorsqu'on envoie sur Σ une onde plane non polarisée sous l'incidence de Brewster ?
- d- Dans le cas de la réflexion totale, retrouve-t-on l'onde dans le milieu d'indice n_2 ? Si oui, sous quelle forme ? (aucune démonstration n'est demandée).

II-B-3- Application au guidage d'une onde

Pour simplifier l'étude, on se place dans une géométrie bidimensionnelle qui rend bien compte des propriétés fondamentales des fibres à saut d'indice : une couche d'épaisseur r_1 d'indice réel n_1 , immergée dans un milieu diélectrique d'indice réel $n_2 < n_1$ (cf figure 2). Le guide est éclairé par une onde monochromatique de pulsation ω .

Dans chacune des couches, on cherche un champ électrique complexe de la forme $\vec{E}(x, y, z, t) = A(x) \exp[i(\alpha z - \omega t)] \vec{e}_y$, dit transverse électrique et noté T.E (α désigne une constante réelle positive et $A(x)$ une fonction réelle de x).

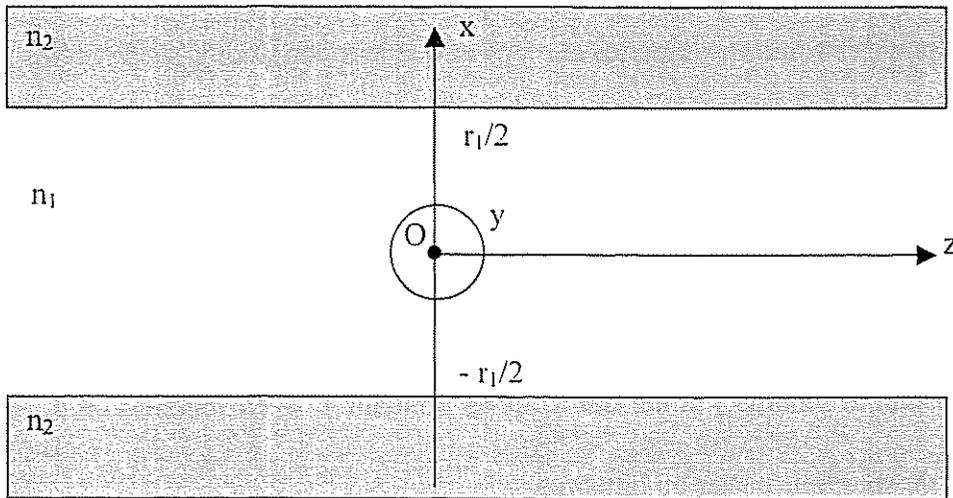


Figure 2

- a- Écrire l'équation de propagation du champ électrique complexe $\vec{E}(x, y, z, t)$ dans chacune des couches.

En déduire, dans chaque couche, une relation entre A , $\frac{d^2 A}{dx^2}$, α et $k_j = n_j \frac{\omega}{c}$ avec $j = 1, 2$.

- b- Que doivent vérifier A et $\frac{dA}{dx}$ aux interfaces $x = \pm \frac{r_1}{2}$? Montrer que la symétrie du problème permet de chercher des solutions paires ou impaires.
- c- Discuter, dans chaque tranche, de la nature des solutions de l'équation différentielle obtenue à la question a- en fonction de la valeur de $(k_j^2 - \alpha^2)$.
- d- Montrer qu'il n'existe pas de solutions au problème pour $k_1 < \alpha$ et que le guidage de l'onde par la fibre impose la condition $k_2 < \alpha$.
- e- On suppose dans la suite $k_2 < \alpha \leq k_1$ et on cherche à déterminer entièrement les modes guidés dans la fibre optique. On pose $\beta^2 = k_1^2 - \alpha^2$ et $\gamma^2 = -k_2^2 + \alpha^2$, avec β et γ supposés positifs. Ecrire la forme générale d'une solution paire et montrer qu'une telle solution n'est possible que si :

$$\gamma \frac{r_1}{2} = \beta \frac{r_1}{2} \tan\left(\beta \frac{r_1}{2}\right).$$

- f- Procéder de même pour les solutions impaires et montrer que leur condition d'existence est :

$$\gamma \frac{r_1}{2} = -\beta \frac{r_1}{2} \cotan\left(\beta \frac{r_1}{2}\right).$$

- g- Pourrait-on à ce niveau développer une analogie avec un système quantique simple ?
- h- Représenter sur un même schéma l'allure des graphes donnant $\gamma \frac{r_1}{2}$ en fonction de $\beta \frac{r_1}{2}$ pour les deux types de solutions paires ou impaires.

En utilisant la relation :

$$\left(\gamma \frac{r_1}{2}\right)^2 + \left(\beta \frac{r_1}{2}\right)^2 = r_1^2 \frac{k_1^2 - k_2^2}{4}$$

trouver le principe d'une détermination graphique des valeurs de β et γ pour les modes guidés T.E. de la fibre. Montrer qu'il existe toujours un mode T.E. et que le nombre N de ces modes est donné par :

$$N = 1 + \text{Ent} \left(\frac{\omega r_1}{\pi c} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)$$

où $\text{Ent}(u)$ représente la partie entière de u .

- i- Qu'appelle-t-on fibre optique « monomode » ? Quelle est la valeur maximale du rayon d'une telle fibre ?
- j- Ecrire la condition d'existence du $p^{\text{ième}}$ mode T.E. guidé et vérifier qu'il existe pour ce mode une pulsation de coupure ω_{pc} qu'on déterminera. Décrire qualitativement ce qui se passe lorsqu'on envoie à l'entrée du guide d'onde une onde de pulsation ω inférieure à la plus petite pulsation de coupure non nulle.

Partie III : Propagation dans les milieux non isotropes: biréfringence d'un milieu uniaxe

A- Etude générale

Dans cette partie, nous nous intéresserons à la propagation d'une onde plane monochromatique polarisée rectilignement dans un milieu diélectrique parfaitement isolant transparent, linéaire, homogène, non magnétique mais électriquement anisotrope.

III-A-1- Introduction du tenseur diélectrique

- a- Définir le terme « anisotrope ». Qu'est-ce que le phénomène de biréfringence ?
- b- Quelle est la relation générale liant le vecteur déplacement électrique \vec{D} et le champ électrique \vec{E} dans ce milieu ? Comment s'exprime cette relation dans une base principale notée (O, X, Y, Z) ? On notera ϵ_x , ϵ_y et ϵ_z les permittivités diélectriques principales. Qu'appelle-t-on alors milieu uniaxe ?

III-A-2- Structure de l'onde dans un milieu anisotrope

Une onde plane monochromatique polarisée rectilignement se propage dans un tel milieu. Le champ électrique complexe associé est de la forme: $\underline{\vec{E}}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)]$, avec $\vec{k} = k \vec{u}$ où \vec{u} est la direction de propagation de l'onde dans le milieu (k réel).

- a- Réécrire les équations de Maxwell en utilisant la notation complexe. En déduire la structure de l'onde dans le milieu. On précisera sur un schéma les positions relatives des différents vecteurs réels \vec{u} , \vec{E} , \vec{B} , \vec{D} . Auquel des deux vecteurs \vec{E} ou \vec{D} doit-on identifier la vibration lumineuse pour conserver la transversalité du champ électromagnétique par rapport à la direction de propagation \vec{u} ?
- b- Définir sur le schéma précédent le plan d'onde et le plan de polarisation et représenter le vecteur de Poynting \vec{R} . Commenter en comparant avec le cas des milieux isotropes.
- c- Montrer que les vecteurs \vec{E} , \vec{D} et \vec{k} vérifient la relation suivante :

$$k^2 \vec{E} - \mu_0 \omega^2 \vec{D} = (\vec{k} \cdot \vec{E}) \vec{k}$$

Que représente la quantité ω/k ? on rappelle la formule : $\vec{a} \wedge (\vec{b} \wedge \vec{c}) = (\vec{a} \cdot \vec{c})\vec{b} - (\vec{a} \cdot \vec{b})\vec{c}$

- d- On considère à présent le cas particulier d'une propagation le long de la direction (OX) qui correspond à une des directions principales du milieu : $\vec{u} = \vec{e}_x$.

α - Montrer que \vec{E} devient également transverse .

β - Dans le cas où \vec{E} est polarisé rectilignement suivant OY, donner la vitesse v_Y de

propagation de cette onde en fonction de c et $n_Y = \sqrt{\frac{\epsilon_Y}{\epsilon_0}}$. Reprendre la question si

\vec{E} est polarisé rectilignement selon OZ, en introduisant la vitesse de propagation

v_Z et $n_Z = \sqrt{\frac{\epsilon_Z}{\epsilon_0}}$. Commenter.

B- Lames cristallines uniaxes taillées parallèlement à leur axe optique

Dans ce qui suit, on ne s'intéresse plus qu'aux milieux uniaxes pour lesquels deux des permittivités

diélectriques sont égales : $\epsilon_X = \epsilon_Y$. On appelle alors indice ordinaire $n_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_X}{\epsilon_0}} = \sqrt{\frac{\epsilon_Y}{\epsilon_0}}$ et indice

extraordinaire $n_E = \sqrt{\frac{\epsilon_Z}{\epsilon_0}}$.

Les lames cristallines « à retard » sont des lames minces taillées dans des milieux uniaxes parallèlement à leur axe optique OZ.

On envoie sur une telle lame une onde plane monochromatique en incidence normale : on se trouve donc être dans la configuration où la direction de propagation \vec{u} est orthogonale à l'axe optique OZ.

On prendra $\vec{u} = \vec{e}_x$.

III-B-1- Qu'appelle-t-on lignes neutres de la lame biréfringente ? Quelles sont leurs propriétés ? Donner leur direction dans la base principale précédemment définie, ainsi que les indices les caractérisant.

III-B-2- Présenter le principe d'une expérience simple permettant de déterminer expérimentalement la direction des lignes neutres d'une lame cristalline.

III-B-3- On se place dans le cas où $n_0 < n_E$. Quel est alors l'axe lent ? l'axe rapide ?

III-B-4- On envoie sur cette lame, sous incidence normale, une onde plane progressive monochromatique de longueur d'onde λ dans le vide, polarisée rectilignement dans une direction faisant l'angle α ($0 < \alpha < \pi/2$) avec l'axe lent. L'épaisseur de la lame est notée e . Dans quelles conditions l'onde émergente est-elle polarisée rectilignement ? Préciser alors les directions de polarisation possibles. Quel type de polarisation obtiendrait-on en général ?

III-B-5- Quel est l'effet d'une telle lame sur une lumière non polarisée ?

III-B-6- Qu'appelle-t-on lame $\lambda/2$? lame $\lambda/4$? Application numérique : calculer l'épaisseur minimale d'une lame demi-onde de quartz, pour la radiation jaune du sodium ($\lambda = 589\text{nm}$). On donne pour cette radiation $\Delta n = n_E - n_0 = 0,0091$.

III-B-7- Donner un montage simple permettant de réaliser un « polariseur circulaire », puis un « analyseur circulaire ».

III-B-8- Proposer un montage, utilisant un polariseur et une lame bien choisie, faisant anti-reflet pour une onde plane monochromatique arrivant sous incidence normale sur une surface réfléchissante. On ne demande pas une démonstration détaillée des propriétés du montage.

III-B-9- On éclaire en lumière blanche et en incidence normale une lame biréfringente placée entre un analyseur et un polariseur croisés. Pour un même cristal, quand l'épaisseur de la lame augmente, on observe, sur un écran placé après la lame, d'abord une tache colorée, (dont la teinte varie avec

l'épaisseur), puis une tache blanc « grisâtre ». Expliquer simplement le phénomène. Obtient-on, pour une lame mince, la même couleur si l'analyseur et le polariseur, au lieu d'être croisés, sont parallèles ?

C- Déterminations expérimentales d'une biréfringence

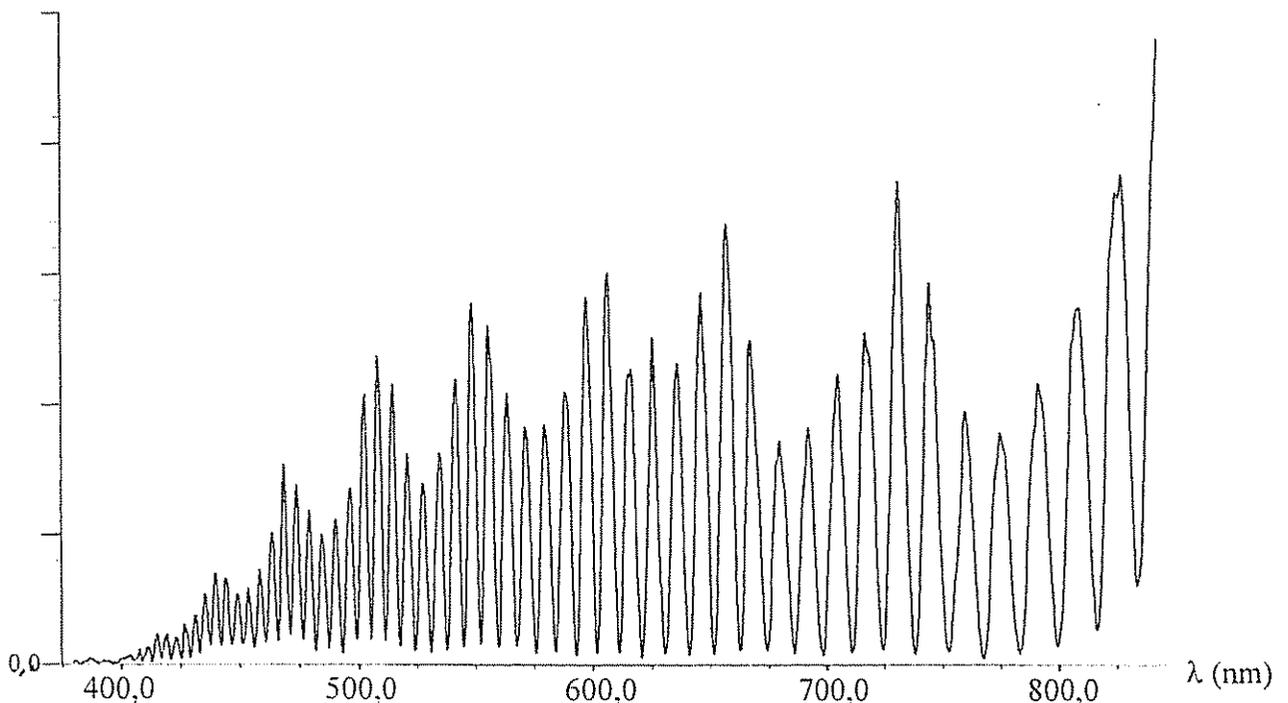
On s'intéresse ici aux techniques expérimentales permettant de déterminer la valeur de la biréfringence $|n_E - n_o|$ pour une lame biréfringente donnée, taillée parallèlement à son axe optique.

III-C-1- Méthode du spectre cannelé pour une lame « épaisse »

- a- Rappeler le montage expérimental permettant d'obtenir un spectre cannelé avec un contraste maximum à partir d'une lame biréfringente « épaisse » (on utilisera un polariseur et un analyseur croisés).
- b- Montrer comment l'analyse du spectre cannelé obtenu permet de remonter à la détermination de la biréfringence $|n_E - n_o|$ de la lame.
- c- Le spectre représenté figure 3 représente l'intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde, obtenue au cours de l'expérience précédente, pour une lame biréfringente de nature inconnue, entre polariseur et analyseur croisés. Exploiter ce graphe expérimental et, sachant que $e = 4,0$ mm, déterminer la biréfringence de la lame utilisée.

Intensité
(unité arbitraire)

Figure 3



III-C-2- Connaissez-vous une autre méthode de détermination de la biréfringence d'une lame ?

III-C-3- Peut-on rendre certains matériaux isotropes biréfringents ? Si oui, comment ? Ces effets sont-ils utilisés dans la pratique ? Précisez.

III-C-4- Citer des exemples de milieux biréfringents non cristallins.

Partie IV : Propagation dans les milieux diélectriques homogènes, isotropes, isolants, transparents, non magnétiques et non linéaires

A- Généralités

Dans cette partie, nous nous intéressons à la réponse non linéaire d'un tel milieu à une onde électromagnétique.

IV-A-1- Citer deux phénomènes physiques qui découlent de cette non linéarité. Avec quel type de source lumineuse peut-on observer ces phénomènes ?

IV-A-2- On suppose que le champ \vec{E} (réel) dans le milieu non linéaire est une superposition d'ondes planes progressives monochromatiques de différentes pulsations ω_j , se propageant dans la direction Oz, polarisées rectilignement le long de Ox et dont l'amplitude varie en fonction de z :

$$\vec{E} = \sum_j \vec{E}_j(\vec{k}_j, \omega_j) = \vec{e}_x \operatorname{Re} \left\{ \sum_j \underline{A}_j(z) \exp(i(k_j z - \omega_j t)) \right\}$$

ou encore :
$$\vec{E} = \frac{\vec{e}_x}{2} \left\{ \sum_j \left[\underline{A}_j(z) \exp(i(k_j z - \omega_j t)) + \underline{A}_j^*(z) \exp(-i(k_j z - \omega_j t)) \right] \right\}$$

\vec{e}_x étant le vecteur unitaire de l'axe Ox, \underline{A}_j^* le complexe conjugué de \underline{A}_j , et $k_j = \frac{n(\omega_j)}{c} \omega_j$ le module du vecteur d'onde de l'onde de pulsation ω_j dans le milieu, avec $n(\omega_j)$ indice (réel) du milieu transparent à la pulsation ω_j .

Dans un milieu non linéaire, la polarisation \vec{P} (réelle) induite dans le milieu contient une partie linéaire et une partie non linéaire : $\vec{P} = \vec{P}_L + \vec{P}_{NL}$.

La partie linéaire \bar{P}_L (réelle) dans le milieu diélectrique homogène isotrope transparent isolant et non magnétique considéré, en présence du champ électrique réel décrit ci-dessus, prend la forme suivante :

$$\bar{P}_L = \sum_j \epsilon_0 \chi(\omega_j) \bar{E}_j(\bar{k}_j, \omega_j)$$

où $\chi(\omega_j)$ est la susceptibilité linéaire, supposée uniforme et réelle, du matériau à la pulsation ω_j .

On suppose d'autre part que la polarisation non linéaire \bar{P}_{NL} (réelle) s'écrit sous la forme suivante:

$$\bar{P}_{NL} = \sum_j \bar{P}_{NL,j}(\bar{k}_j, \omega_j) = \bar{e}_x \operatorname{Re} \left\{ \sum_j \underline{B}_j(z) \exp(i(k_j z - \omega_j t)) \right\}$$

ou encore :

$$\bar{P}_{NL} = \frac{\bar{e}_x}{2} \left\{ \sum_j \left[\underline{B}_j(z) \exp(i(k_j z - \omega_j t)) + \underline{B}_j^*(z) \exp(-i(k_j z - \omega_j t)) \right] \right\}$$

Montrer à partir des équations de Maxwell que, pour chaque pulsation présente dans le milieu, le champ réel monochromatique $\bar{E}_j(\bar{k}_j, \omega_j)$ correspondant obéit, dans un milieu diélectrique transparent homogène, isotrope, isolant, non magnétique et non linéaire, à l'équation suivante:

$$\bar{\Delta} \bar{E}_j - \frac{n(\omega_j)^2}{c^2} \frac{\partial^2 \bar{E}_j}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \frac{\partial^2 \bar{P}_{NL,j}}{\partial t^2}$$

IV-A-3- Montrer alors qu'à l'approximation de l'enveloppe lentement variable, où les amplitudes $\underline{A}_j(z)$ varient sur des distances caractéristiques grandes devant la longueur d'onde, $\underline{A}_j(z)$ obéit à l'équation de propagation :

$$\frac{d\underline{A}_j(z)}{dz} = i \frac{\omega_j^2}{2 \epsilon_0 c^2 k_j} \underline{B}_j(z) \quad \text{équation (1)}$$

B- Interaction à trois ondes

On considère un milieu non linéaire situé entre les plans de cote $z = 0$ et $z = L$ dans lequel la contribution **réelle** due à la non-linéarité du milieu induite par le champ électrique **réel** \bar{E} est de la forme :

$$\bar{P}_{NL} = 2 d (\bar{E} \cdot \bar{E}) \bar{e}_x$$

où d est la susceptibilité non linéaire quadratique ou encore coefficient non linéaire.

IV-B-1- Équation de propagation

Le champ appliqué à l'entrée du milieu non linéaire ($z = 0$) est la superposition de deux ondes planes progressives de pulsation ω_1 et ω_2 (avec $\omega_1 > \omega_2$). Soient $\underline{A}_1(z)$ et $\underline{A}_2(z)$ leurs amplitudes complexes dans le milieu.

- a- Justifier l'apparition dans le milieu d'ondes planes progressives monochromatiques de pulsations $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ et $\omega'_3 = \omega_1 - \omega_2$.

Dans la suite, on ne s'intéressera plus qu'à l'onde de pulsation ω_3 et de vecteur d'onde $\vec{k}_3 = k_3 \vec{e}_z$.

- b- Montrer que $\underline{B}_3(z) = 2d \underline{A}_1(z) \underline{A}_2(z) \exp(i \Delta k z)$, avec $\Delta k = k_1 + k_2 - k_3$, et déduire de (1) l'équation de propagation de l'amplitude complexe $\underline{A}_3(z)$ de cette onde. Δk est par la suite appelé désaccord de phase.
- c- On suppose que les modules des amplitudes $\underline{A}_1(0)$ et $\underline{A}_2(0)$ des ondes incidentes à l'entrée du cristal sont très grands, et on néglige la variation de $\underline{A}_1(z)$ et $\underline{A}_2(z)$ dans toute la traversée du cristal : $\underline{A}_1(z) \approx \underline{A}_1(0)$, $\underline{A}_2(z) \approx \underline{A}_2(0)$. Trouver l'expression de l'amplitude $\underline{A}_3(L)$ du champ produit par l'interaction non linéaire à l'autre extrémité du cristal.
- d- On appelle longueur de cohérence la grandeur $l_c = \frac{2\pi}{\Delta k}$. Quelle est sa signification physique ?
- e- À quelle condition sur Δk a-t-on transfert d'énergie maximal entre les ondes incidentes et l'onde générée ? On parle alors d'*accord de phase*. Quelle est l'explication physique de l'existence de ce transfert maximal ?

IV-B-2- Doublage de fréquence

On envoie à l'entrée du cristal une seule onde de pulsation ω_1 et d'amplitude $\underline{A}_1(0)$.

- a- Montrer à partir des résultats de la question précédente qu'il y a génération d'une onde dite *harmonique*, de pulsation double $\omega_3 = 2\omega_1$.

- b- Comment s'écrit la condition d'accord de phase en fonction des indices n_1 et n_3 du milieu aux pulsations ω_1 et $\omega_3 = 2 \omega_1$?
- c- On peut montrer qu'à l'accord de phase, les équations de propagation des amplitudes complexes $\underline{A}_1(z)$ et $\underline{A}_3(z)$ des deux champs en interaction s'écrivent

$$\frac{d\underline{A}_1(z)}{dz} = i K \underline{A}_1^*(z) \underline{A}_3(z) \qquad \frac{d\underline{A}_3(z)}{dz} = i K [\underline{A}_1(z)]^2$$

où K est une constante réelle et où \underline{A}_1^* représente le complexe conjugué de \underline{A}_1 . Justifier la deuxième équation à partir des résultats de la question IV-B-1- et en déduire l'expression de K en fonction du coefficient non linéaire d et des autres constantes du problème.

- d- Déduire des équations de propagation que la quantité $|\underline{A}_1(z)|^2 + |\underline{A}_3(z)|^2$ est indépendante de z . Donner l'interprétation physique d'un tel résultat.
- e- Montrer que, si à l'entrée du cristal $\underline{A}_3(0) = 0$ et si $\underline{A}_1(0)$ est réel (égal à $A_1(0)$), alors les solutions des équations de propagation ci-dessus s'écrivent :

$$\underline{A}_1(z) = \frac{A_1(0)}{\text{ch}(z/D)} \qquad \underline{A}_3(z) = i A_1(0) \text{th}(z/D)$$

où D est une longueur que l'on déterminera. Les notations ch et th représentent respectivement les fonctions cosinus hyperbolique et tangente hyperbolique.

Tracer les intensités des deux ondes dans le cristal en fonction de z . Dans quelles conditions faut-il se placer pour transformer la quasi-totalité de l'onde incidente en onde de fréquence double ?

- f- Application numérique : l'onde incidente, de longueur d'onde dans le vide $\lambda = 1 \mu\text{m}$, a une puissance par unité de surface de 10^9 W m^{-2} , le cristal a un coefficient non-linéaire d de 10^{-22} S.I. et les indices n_1 et n_3 valent approximativement 1,5. Quelle est la valeur numérique de la longueur D ? Quelle est la puissance par unité de surface de l'onde de fréquence double à la sortie du cristal pour cette longueur ?

FIN

6. Rapport relatif à la composition de physique

Généralités et commentaires portant sur l'ensemble du sujet

Cette épreuve a pour sujet les phénomènes de propagation de la lumière dans différents milieux diélectriques : linéaires homogènes isotropes, anisotropes et enfin non linéaires.

Les 4 parties sont largement indépendantes les unes des autres. La première, introductive, est surtout consacrée à l'optique géométrique. Les trois dernières nécessitent la connaissance et la maîtrise des équations de Maxwell dans des milieux autres que le vide.

Globalement, la majorité des candidats n'a traitée que les deux premières parties, qui représentent à elles seules plus de la moitié du sujet. La troisième partie a été abordée de façon plus confidentielle, et parfois bien réussie. La partie IV n'est entamée que par une très faible portion de candidats.

Rappelons ici l'importance de l'optique et de ses applications dans la vie courante, qu'il s'agisse de l'optique géométrique avec l'utilisation quasi-quotidienne d'instruments comme les lunettes, la loupe, le microscope, de l'optique ondulatoire avec l'utilisation des fibres optiques, des polariseurs rectilignes ou circulaires, de l'étude des milieux anisotropes et plus récemment de l'observation des réponses non linéaires des matériaux et leurs développements. C'est pourquoi tout futur enseignant se doit de maîtriser parfaitement les notions de base en optique géométrique et en électromagnétisme. Le jury invite donc les candidats à l'agrégation à redoubler d'efforts et à combler leurs lacunes dans ce domaine.

Par ailleurs, un enseignant doit être capable de s'exprimer à l'écrit clairement et correctement. Or, le jury a trop souvent rencontré des réponses confuses, rédigées dans un français approximatif, et truffées de fautes d'orthographe. De plus, un résultat affirmé sans preuve n'a aucune valeur, la physique ne pouvant se résumer en une suite de formules mal comprises et mal maîtrisées.

La première partie, consacrée à l'optique géométrique, débouche sur une première étude des fibres optiques. Elle porte tout d'abord sur les bases de l'optique géométrique, puis applique celles-ci à l'étude des fibres à saut puis à gradient d'indice. Cette dernière application, un peu plus technique, est rarement correctement traitée. L'optique géométrique étant abordée assez tôt par les élèves dans leur scolarité, il est impératif que des futurs enseignants maîtrisent parfaitement son contenu tout en ayant conscience des limites de son application.

La partie II reprend quelques notions abordées dans la première partie, mais d'un point de vue ondulatoire. Commencant par une étude macroscopique des milieux diélectriques, avec des définitions générales concernant ces milieux, elle se limite ensuite à l'étude des milieux linéaires homogènes et isotropes, étudiés en réponse sinusoïdale. Ce formalisme permet de retrouver les lois de Descartes vues dans la partie I, et d'étudier la transmission et la réflexion à l'interface de deux milieux transparents. L'analyse se termine par l'étude électromagnétique simple d'une fibre optique. Le jury a constaté que de nombreux candidats ne maîtrisent pas l'ensemble des outils nécessaires à l'étude des milieux diélectriques, se contentant de réponses obscures aux questions de définitions de la partie II-A-1), ignorant certaines équations de Maxwell et imaginant de trop nombreuses équations de passage, souvent incohérentes entre elles. Il semble aussi que les unités des différentes grandeurs introduites ne soient pas bien connues. Le jury rappelle à ce propos qu'un contrôle des résultats obtenus passe quasi-systématiquement par une analyse dimensionnelle de ces derniers, et que cette démarche doit être bien assimilée par les candidats à l'agrégation.

La partie III s'intéresse à la propagation dans les milieux anisotropes uniaxes. Après une partie théorique assez brève, elle se propose d'évaluer les connaissances expérimentales sur l'étude de la polarisation de la lumière. Le jury attend des descriptions précises des montages expérimentaux demandés, ne se limitant pas à des croquis rapidement esquissés, mais prenant également en compte le dispositif correct d'éclairage des lames utilisées, en précisant la nature des sources lumineuses. Très peu de candidats réussissent à exploiter le spectre cannelé dont l'enregistrement est fourni dans l'énoncé et à expliquer clairement le protocole expérimental nécessaire à son obtention. Le jury encourage donc les futurs candidats à s'intéresser de près aux montages exigibles à l'agrégation, la physique étant avant tout une science expérimentale.

La partie IV aborde la propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu non linéaire. Les notions nécessaires étaient introduites dans l'énoncé, toutes les relations découlent des équations de Maxwell. Une première partie assez technique permet de décrire le processus non linéaire et d'établir l'équation de création d'une onde de fréquence somme ou différence. Le problème s'intéresse ensuite aux conditions d'un transfert d'énergie optimum vers les ondes harmoniques en établissant la condition d'accord de phase puis, sur l'exemple du doublage de fréquence, il permet de calculer un rendement de doublage. Seul un très petit nombre de candidats a abordé cette partie moins classique.

Commentaires spécifiques

I- Optique géométrique

1) L'approximation de l'optique géométrique ne doit pas être confondue avec les conditions de Gauss. Elle s'applique à des ondes de longueur d'onde très inférieure à la taille caractéristique des milieux traversés.

2) On peut définir un rayon lumineux de différentes façons, par les lignes de champ du vecteur de Poynting moyen, un pinceau lumineux dont on ferait tendre l'extension latérale vers zéro, ... En optique géométrique, les rayons sont indépendants ; la lumière se propage en ligne droite dans un milieu homogène et obéit au principe de retour inverse. On peut aussi faire appel au théorème de Malus et aux lois de Descartes.

3-c) Le principe de Fermat, qui donne souvent lieu à des réponses approximatives et non rigoureuses, ne consiste pas à affirmer que le chemin optique réellement emprunté par la lumière est minimum. Il faut mentionner le terme stationnaire, et préciser par rapport à quoi, en faisant référence à des chemins infiniment voisins.

4-a) Trop de candidats confondent énoncé et démonstration, surtout en ce qui concerne le principe de retour inverse de la lumière.

4-d) Il est surprenant que cette question simple soit souvent incorrectement traitée.

1^{er} cas : on passe d'un milieu d'incidence moins réfringent à un milieu de réfraction plus réfringent : $n_1 < n_2$
 $\Rightarrow i_1 > i_2$. Quel que soit i_1 , la relation de Snell-Descartes donne une valeur de i_2 ; expérimentalement, on constate que quelle que soit l'incidence, la lumière est transmise : il n'y a pas de réflexion totale. i_2 prend sa valeur limite (ou maximale) lorsque $i_1 = \pi/2$: $i_2(\ell) = \text{Arc sin}(n_1/n_2)$.

2^{ème} cas : $n_1 > n_2 \Rightarrow i_1 < i_2$. La relation de Snell-Descartes permet de trouver i_2 si $\sin i_1 < n_2/n_1$. Expérimentalement, on constate que pour $i_1 > \text{Arc sin}(n_2/n_1)$, aucune lumière ne passe : il y a réflexion totale.

5-a) Il faut dire clairement que la concavité d'un rayon est toujours tournée dans le sens du gradient de l'indice.

5-b- α) $n \cos \alpha = \text{constante}$ pouvait être tirée de l'équation du rayon lumineux donnée dans l'énoncé. Très peu de candidats arrivent à déterminer l'équation de la trajectoire du rayon dans la fibre et à faire correctement l'application numérique. De plus, un résultat numérique encadré ne constitue pas une conclusion.

II- Propagation dans un milieu diélectrique non magnétique.

A-1-a) Il convient de distinguer les charges libres des charges liées en mentionnant leur différence de comportement sous l'action d'un champ électrique appliqué.

A-1-b) La définition d'un milieu diélectrique et celle du vecteur polarisation ont donné lieu à de nombreuses confusions. Entre autres, les candidats confondent milieux parfaitement isolants et milieux diélectriques. L'unité du vecteur polarisation est, quant à elle, trop souvent ignorée ou erronée.

A-1-d) La définition du vecteur déplacement électrique est parfois donnée en présupposant que le milieu est linéaire homogène isotrope. De plus les équations de Maxwell dans les milieux sont fréquemment erronées, avec des notations non définies.

A-1-e) Le jury n'a pas à choisir entre huit relations de passage, souvent en contradiction les unes avec les autres

A-3-a et b) Il est étonnant de trouver dans de nombreuses copies des équations de propagation des champs dans les milieux et des relations de dispersion identiques à celles obtenues dans le vide.

A-3-e) Cette question a été généralement très mal traitée. Trop de candidats semblent en effet ignorer ce qu'est le vecteur de Poynting, ou utilisent de façon anarchique les notations complexes. Les commentaires attendus sont en général absents.

B-2-b) La définition des coefficients de réflexion et transmission énergétique est souvent ignorée des candidats, qui donnent alors sans justification $R = r^2$ et $T = t^2$, puis obtiennent $R+T = 1$ avec des formules qui manifestement ne le permettent pas.

B-2-c) L'angle de Brewster correspond à $R_{//} = 0$, et toute expression de cet angle non préalablement justifiée n'a pas été prise en compte par le jury.

B-3-d) La prise en compte de la symétrie et les relations de continuité sont trop rarement correctement exploitées.

B-3-h) et j) Dès qu'une question est terminée, les candidats en oublient le contenu. C'est ainsi qu'à la question h), ils montrent qu'il existe toujours un mode TE et qu'à la question j) ils concluent que, en dessous de la fréquence de coupure, aucune onde ne se propage.

III- Propagation dans les milieux non isotropes: biréfringence d'un milieu uniaxe.

A-1-a) Définir un milieu anisotrope seulement comme un milieu qui n'est pas isotrope n'est pas suffisant.

A-1-b) Pour un milieu anisotrope et dans le cas général, le rayon lumineux et le vecteur d'onde ne sont pas colinéaires.

B-1) La notion de ligne neutre (dont les propriétés sont mal connues) met beaucoup de candidats en difficulté. Il s'agit aussi d'en donner les directions et les indices dans la base précédemment définie.

B-2) Lorsqu'on travaille avec des lames biréfringentes à faces parallèles, avec des polariseurs et analyseurs,

on doit s'efforcer d'envoyer sur ces instruments un faisceau de lumière parallèle, obtenu par laser, ou avec un trou source suivi d'une lentille correctement disposée.

B-5) Il semble nécessaire de rappeler qu'une lame à retard n'a aucune action sur une lumière non polarisée.

B-4, 6, 9) De façon générale, l'action d'une lame à retard sur une lumière polarisée rectilignement n'est pas correctement décrite, les candidats se bornant souvent à parler d'un déphasage sans préciser de quel déphasage il s'agit. Du coup, la définition des lames demi ou quart d'onde est rarement complète, et l'interprétation des couleurs des lames en lumière blanche reste dans l'ombre ...

B-7, 8) Pour les montages demandés, il est bien sûr obligatoire d'avoir un faisceau de lumière parallèle et monochromatique.

C-1-a) Pour obtenir un spectre cannelé, il faut impérativement opérer en lumière blanche et utiliser un système dispersif.

C-1-b) Ces deux questions sont très mal traitées dans l'ensemble. Cela traduit simplement une mauvaise connaissance de l'action des lames à retard sur les lumières polarisées rectilignement et du comportement des filtres polarisants. Ainsi, très rares sont les candidats qui parviennent à écrire correctement la condition d'extinction d'une longueur d'onde donnée et à positionner les cannelures sombres du spectre, ce qui est évidemment nécessaire si on veut exploiter le spectre expérimental.

IV: Propagation dans les milieux non linéaires.

A-1) Pour obtenir des phénomènes non-linéaires, dont le rendement est faible, on utilise des sources monochromatiques (laser) intenses.

A-2 et 3) Ces deux questions, qui comportent des équations un peu lourdes, nécessitent du soin et de la rigueur, dans la simplification et l'écriture. Elles ont rebuté les rares candidats qui ont abordé cette partie.

B-1-d) La notion de longueur de cohérence n'a ici rien à voir avec la longueur de cohérence d'un train d'onde en optique.

B-2-b) Il est étonnant que, connaissant les relations liant ω_3 et ω_1 et k_1 et k_3 , les candidats ne sachent pas retrouver l'égalité des indices.

SESSION DE 2007**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.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit..

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

NB : *Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.*

Tournez la page S.V.P.

Chimie et biologie

Le sujet traite de quelques aspects de la chimie impliquée dans des processus biologiques. Il est composé de trois parties : la première s'intéresse aux sucres, la deuxième aborde l'étude des enzymes et de la catalyse enzymatique; enfin, la dernière partie est consacrée aux métaux en biologie. Les trois parties sont indépendantes les unes des autres. De nombreuses questions au sein de ces trois parties sont-elles-même indépendantes.

Avertissements :

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

Les réponses sont systématiquement justifiées par des arguments précis et concis.

Données

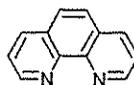
Certaines données spécifiques sont insérées dans le sujet.

Notations :

ESH = électrode standard à hydrogène

Ph représente le groupe phényle C_6H_5-

o-phen représente le ligand bidenté (ortho ou) 1,10-phénantroline :



Données générales :

Constante d'Avogadro : $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Constante des gaz parfaits : $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Accélération de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Numéros atomiques : H : 1 ; C : 6 ; N : 7 ; O : 8 ; S : 16 ; Fe : 26

Masses molaires ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) : H : 1,00 ; C : 12,0 ; O : 16,0

Températures : 0°C correspond à 273 K

Thermodynamique :

Pression standard : $P^\circ = 1 \text{ bar}$

Concentration molaire de référence : $C^\circ = 1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

Oxydo-réduction :

On pourra poser : $RT/F \cdot \ln = 0,06 \cdot \log$ aux deux températures 25°C et 37°C .

Potentiels standard à $\text{pH} = 0$ et à 25°C :

$E^\circ (\text{S}_4\text{O}_6^{2-} / \text{S}_2\text{O}_3^{2-}) = 0,09 \text{ V}$

$E^\circ (\text{I}_2 / \text{I}^-) = 0,62 \text{ V}$

$E^\circ (\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}) = 0,77 \text{ V}$

Potentiels standard apparents, dans les conditions biologiques à pH = 7 et à 37 °C :

$$E^{\circ} (\text{NAD}^+ / \text{NADH}) = - 0,32 \text{ V}$$

$$E^{\circ} (\text{pyruvate} / \text{lactate}) = - 0,19 \text{ V}$$

Logarithmes décimaux des constantes de formation globales de quelques complexes à 25 °C :

$$\log \beta_3 (\text{Fe}(\text{o-phen})_3^{2+}) = 21,3$$

$$\log \beta_3 (\text{Fe}(\text{o-phen})_3^{3+}) = 14,3$$

pK_a de quelques couples acide/base à 25 °C :

$$\text{pK}_a (\text{HCN} / \text{CN}^-) = 9,2$$

$$\text{pK}_a (\text{acide pyruvique} / \text{ion pyruvate}) = 2,5$$

$$\text{pK}_a (\text{acide lactique} / \text{ion lactate}) = 3,9$$

$$\text{pK}_a (\text{H}_3\text{PO}_4 / \text{H}_2\text{PO}_4^-) = 2,1$$

$$\text{pK}_a (\text{H}_2\text{PO}_4^- / \text{HPO}_4^{2-}) = 7,2$$

$$\text{pK}_a (\text{HPO}_4^{2-} / \text{PO}_4^{3-}) = 12,4$$

Spectrométrie de masse pour les sucres :

Variété botanique	Canne à sucre	Erable	Betterave
Déplacement isotopique : $\delta^{13}\text{C} (\text{‰})$	- 12,5	- 23,0	- 27,5

Polarimétrie des sucres :

Sucre (en solution aqueuse)	Saccharose	Fructose à l'équilibre (*)	Glucose à l'équilibre (*)	α -D-glucose	β -D-glucose
Pouvoir rotatoire spécifique (à 25 °C) $[\alpha_D] (\text{°} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{mL} \cdot \text{dm}^{-1})$	+ 65,0	- 92,0	+ 52,2	+ 112	+ 19,0

(*) : le fructose et le glucose à l'équilibre sont des mélanges de formes ouverte et cyclique.

Partie A : Les sucres

Le sucre de table est constitué de molécules de saccharose de formule brute $C_{12}H_{22}O_{11}$. Le saccharose est un disaccharide, molécule bicyclique constituée d'un cycle de glucose à 6 atomes et d'un cycle de fructose à 5 atomes reliés par un pont oxygène. Il est extrait essentiellement du sucre de canne et de la betterave sucrière. Il est également présent au printemps dans la sève d'érable, solution aqueuse de sucres contenant environ 65 % de saccharose et de plus faibles quantités de fructose et de glucose. Le sirop d'érable est un concentré de sève recueillie en faisant des trous dans l'écorce de l'arbre au printemps.

I. Montée de la sève dans les arbres

Les érables ont donc à leur base, au début du printemps, une sève riche en saccharose. On s'intéresse ici à la montée de la sève dans les arbres.

I.1. Pression osmotique

On considère un récipient formé de deux compartiments, gauche et droite, de même volume V et à la même température T , séparés par une membrane semi-perméable, c'est-à-dire perméable au solvant A mais imperméable à un soluté B.

Le compartiment de gauche contient une solution supposée idéale du soluté B dans A, celui de droite le solvant A pur sous la pression P .

- Rappeler la définition du potentiel chimique du corps pur A à la pression P et la température T , noté $\mu_A^*(P, T)$, à partir de la fonction d'état enthalpie libre G .
- A partir de l'expression de la variation d'enthalpie libre dG , exprimer la variation $d\mu_A^*$ du potentiel chimique du corps pur A en fonction du volume molaire V_m^* de A et de la variation de pression dP qui en est la cause, à température T fixée.
On supposera dans la suite que V_m^* ne dépend pas de la pression.
- Donner l'expression du potentiel chimique du solvant A dans chacun des compartiments.
- Le système est à l'équilibre. Ecrire la condition d'équilibre que doit vérifier le solvant.
- Montrer qu'il existe une surpression π dans le compartiment de gauche. Cette surpression π est appelée pression osmotique.
- En supposant que la solution est très diluée et que la membrane est indéformable, montrer que la pression osmotique est de la forme $\pi = n_B RT/V$ où n_B est la quantité de matière du soluté B.

I.2. Application numérique : cas de la sève d'érable

On prendra : Température : $T = 290 \text{ K}$

Masse volumique : $\rho_{\text{sève}} = 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$

- La concentration du sucre dans une sève normale, assimilée à une solution aqueuse, est environ de $C = 10 \text{ g.L}^{-1}$. Calculer la pression osmotique de la sève par rapport à l'eau du sol autour des racines.
- A quelle hauteur la sève peut-elle monter sous l'effet de cette surpression ? La pression osmotique peut-elle expliquer la montée de la sève dans les grands arbres (hauteur supérieure à 20 mètres) ?

II. Contrôle de qualité d'un sirop d'érable

Le sirop d'érable est un produit onéreux. Il fait l'objet de diverses fraudes et, en conséquence, de nombreux contrôles.

Indications : L'hydrolyse acide d'une mole de saccharose $C_{12}H_{22}O_{11}$ libère une mole de glucose $C_6H_{12}O_6$ et une mole de fructose $C_6H_{12}O_6$.

Le glucose, de formule $HOCH_2-(CHOH)_4-CHO$ sous sa forme ouverte, possède une fonction aldéhyde à caractère réducteur. On le notera sous forme générique R-CHO. Il a un goût sucré. Le fructose de formule $HOCH_2-CO-(CHOH)_3-CH_2OH$ possède une fonction cétone. Il a quant à lui un goût très sucré.

II.1. Dosage du saccharose dans une sève d'érable

On souhaite doser le saccharose dans une sève d'érable assimilée à une simple solution aqueuse de saccharose.

Protocole expérimental :

➤ *Hydrolyse du saccharose en milieu acide*

Dans un ballon de 150 cm^3 , introduire $V_1 = 20,0\text{ cm}^3$ de la solution S_1 de concentration C_1 de saccharose (sève) et 5 cm^3 de solution d'acide chlorhydrique à 2 mol.L^{-1} .

Chauffer à doux reflux pendant 20 minutes.

Refroidir et ajuster le pH à 8 en versant doucement une solution de soude à 2 mol.L^{-1} .

Transvaser dans une fiole jaugée de volume $V_2 = 50,0\text{ cm}^3$ et ajuster. Bien agiter.

La solution obtenue est notée S_2 .

➤ *Dosage du glucose libéré*

Dans un erlenmeyer rodé, introduire $V_3 = 20,0\text{ cm}^3$ de solution S_2 , $V_4 = 20,0\text{ cm}^3$ de solution de diiode de concentration $C_4 = 5,00 \cdot 10^{-2}\text{ mol.L}^{-1}$ et 5 cm^3 de solution de soude à 2 mol.L^{-1} .

Boucher, agiter et laisser reposer 30 minutes à l'obscurité.

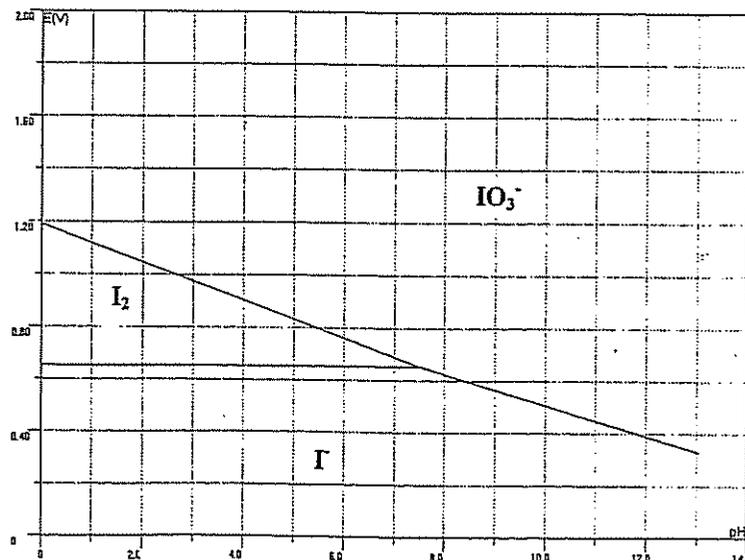
Ajouter alors 10 cm^3 de solution d'acide chlorhydrique à 2 mol.L^{-1} .

On dose ensuite le diiode par une solution de thiosulfate de sodium à $C_5 = 1,00 \cdot 10^{-1}\text{ mol.L}^{-1}$.

Le volume versé à l'équivalence est $V_5 = 15,2\text{ cm}^3$.

On donne le diagramme E-pH de l'iode tracé pour une concentration totale en élément iode dissous $C = 0,1\text{ mol.L}^{-1}$, avec équirépartition de l'élément à la frontière (Graphe 1).

Graphe 1 :



- a) Ecrire l'équation de la réaction d'hydrolyse du saccharose.
- b) Que subit le diiode en milieu basique ? Ecrire l'équation de réaction.
- c) Ecrire l'équation de la réaction d'oxydation du glucose.
- d) Pourquoi ajoute-t-on de l'acide chlorhydrique lors du dosage ? Ecrire l'équation de réaction associée.
- e) Ecrire l'équation de la réaction de la dernière étape de dosage avec le thiosulfate de sodium et calculer sa constante d'équilibre.
- f) Donner la définition de l'équivalence. Comment peut-on la repérer ?
- g) Certaines données du protocole présentent trois chiffres significatifs, d'autres n'en présentent qu'un seul. Justifier ces différents choix.
- h) Calculer la concentration C_1 de la sève en saccharose. Comparer avec la valeur du I.2.a).

II.2. Détermination de l'adultération d'un sirop d'érable par SMRI

Une fraude très répandue consiste à diluer le sirop d'érable avec un sirop produit par hydrolyse partielle du sucre de canne. On peut lire dans la revue « Journal of AOAC International » (vol 87, 2004) : « si les sucres ajoutés sont au même taux d'inversion que le sirop original, alors seule une méthode isotopique permet de les détecter ». Les normes d'authenticité actuelles reposent sur la Spectrométrie de Masse de Rapport Isotopique (acronyme SMRI). Elle permet de déterminer le rapport, noté R , des quantités de matière $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans le dioxyde de carbone CO_2 obtenu par combustion de l'éthanol, lui-même obtenu par fermentation puis distillation du jus sucré. Cette méthode permet de déterminer « la déviation isotopique » du carbone, notée $\delta^{13}\text{C}$, selon la formule :

$$\delta^{13}\text{C} \text{ (en } \text{‰}) = 10^3 \cdot (R - R_{\text{ref}}) / R_{\text{ref}}$$

R est le quotient des quantités de matière de l'élément carbone en isotopes lourd sur léger $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (par mole de CO_2 par exemple) pour l'échantillon étudié et R_{ref} celui d'une référence internationale (carbonate fossile de Caroline du Sud).

Le déplacement isotopique varie avec l'origine botanique d'une plante : en effet, la composition en isotopes stables d'un bioélément n'est pas constante : dans le cas du carbone, bien que le dioxyde de carbone CO_2 , principale source de carbone pour les plantes, soit isotopiquement homogène dans l'atmosphère terrestre, les divers isotopes peuvent être incorporés de manière différente dans les plantes; certaines enzymes provoquent un fractionnement isotopique et entraînent ainsi une variabilité naturelle de l'abondance isotopique dans les diverses plantes.

- a) Quel est le double intérêt des fraudeurs ?
- b) Pourquoi l'article parle-t-il d'inversion ? Calculer le degré d'avancement de l'hydrolyse, noté τ_{inv} , correspondant exactement à l'inversion.
- c) Ecrire l'équation de la réaction de fermentation anaérobie du glucose en éthanol.
- d) La distillation fractionnée du produit de fermentation permet-elle d'isoler l'éthanol pur ? Pourquoi ? Est-ce gênant pour mettre la fraude en évidence ?
- e) Donner la définition des isotopes. Citer un isotope stable et un isotope instable de ^{12}C . Citer une autre utilisation de l'existence de chacun de ces isotopes.
- f) Expliquer brièvement le principe de la spectrométrie de masse.
- g) Quel est l'ordre de grandeur du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans la nature ? Comment interpréter le signe négatif des diverses valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ proposées dans les données ? Comment a-t-on choisi la référence étalon ?

- h) On s'intéresse à un sirop d'érable trafiqué par un ajout de sucre de canne ou de betterave. On mesure par SMRI : $\delta^{13}\text{C} = -20,6 \text{ ‰}$. Quel est le sucre ajouté par les fraudeurs ? Quel est le pourcentage massique minimal en sucre ajouté ? On justifiera l'emploi du qualificatif minimal.

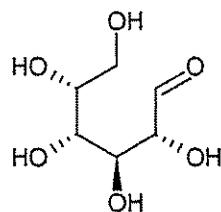
NB : Des corrections sont apportées sur les valeurs des $\delta^{13}\text{C}$ afin de pouvoir appliquer ensuite une proportionnalité massique aux divers constituants d'un mélange.

III. Les sucres ne sont pas uniquement des sources d'énergie

On sait depuis longtemps que, comme le saccharose, de nombreux sucres et féculents peuvent libérer du glucose, combustible le plus important des cellules biologiques. Mais, plus récemment, on a montré que le glucose n'est pas uniquement une source d'énergie : il intervient par exemple dans des processus de reconnaissance de protéine, ou plus simplement dans des rôles de stabilisation ou protection de fonction, point que nous allons étudier.

III.1. Préliminaire : les anomères du D-glucose

Le glucose naturel est du D-glucose. Il existe partiellement sous une forme ouverte aldéhydrique représentée ci-dessous :



- Quelle est la signification stéréochimique de la lettre D ?
- Nommer le glucose en nomenclature officielle (sans indiquer les configurations absolues des atomes de carbone).
- Le D-glucose existe en réalité très majoritairement sous forme cyclique. Donner le nom et l'équation de la réaction chimique intramoléculaire qui permet la cyclisation.
- Pourquoi la réaction intramoléculaire est-elle plus favorable que la réaction intermoléculaire ?
- Développer le mécanisme réactionnel en catalyse acide.
- Montrer que la cyclisation conduit à 2 stéréoisomères de configuration, appelés anomères. Quelle est leur relation de stéréoisomérisation ?
- Représenter en perspective les deux anomères dans leur conformation la plus stable.
- Lequel des deux anomères est le plus stable ? On le nommera anomère β et l'autre anomère α .
- Lorsqu'on dissout, à 25 °C, du α -D-glucose dans l'eau, le pouvoir rotatoire spécifique diminue progressivement et se stabilise à la valeur de $52,2 \text{ }^\circ \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{mL} \cdot \text{dm}^{-1}$. Inversement, si on dissout du β -D-glucose dans l'eau, le pouvoir rotatoire spécifique augmente et se stabilise à la même valeur. Interpréter ces résultats.
- En faisant une approximation que l'on précisera, calculer la composition du mélange à l'équilibre à 25 °C. Vérifier la cohérence avec la question h).

III.2. Etude d'un glycoside protecteur

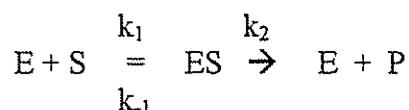
- a) De nombreux fruits (pomme, abricot, pêche...) contiennent de l'acide cyanhydrique HCN dans leurs pépins ou dans les amandes de leurs noyaux. Donner la formule de Lewis et la géométrie de cette molécule d'après le modèle VSEPR.
- b) L'acide cyanhydrique HCN y est souvent combiné à un aldéhyde, comme le benzaldéhyde Ph-CHO, noté A, selon la réaction renversable de formation du mandélonitrile Ph-CHOH-CN, noté B, d'équation (1) :
- $$\text{Ph-CHO} + \text{HCN} = \text{Ph-CHOH-CN} \quad (1)$$
- Proposer un mécanisme pour cette réaction, en milieu aqueux au pH biologique.
- c) Afin de stabiliser le mandélonitrile B, le glucose réagit par sa fonction alcool anomérique sur la fonction alcool de B pour former un β -O-glycoside, noté C, comportant une fonction acétal. Représenter C en perspective et écrire le mécanisme de sa formation en catalyse acide.
- d) Pourquoi ne faut-il tout de même pas manger les pépins ou les amandes des noyaux de fruits ?
- e) Citer deux méthodes employées par les chimistes pour protéger, ou bloquer une fonction alcool ou phénol en synthèse.

Partie B : Les enzymes et la catalyse enzymatique

Les enzymes sont des protéines jouant un rôle de biocatalyseur spécifique. On se propose d'étudier un modèle de la catalyse enzymatique, ses limites et applications.

I. Cinétique de Michaelis-Menten

On étudie la cinétique de la transformation d'un substrat S en un produit P, catalysée par l'enzyme E. Le modèle de Michaelis-Menten étudié ici envisage une transformation non renversable à un seul intermédiaire. Le mécanisme est le suivant :



Les biologistes appellent l'intermédiaire réactionnel ES « le complexe enzyme-substrat ». La réaction se fait en général en excès de substrat : on a $[\text{S}]_0 \gg [\text{E}]_0$, en notant $[\text{S}]_0$ et $[\text{E}]_0$ les concentrations respectives du substrat et de l'enzyme à l'instant initial.

I.1. Représenter et légèrer soigneusement le profil réactionnel microscopique, en supposant la première étape déterminante.

I.2.a) Ecrire l'équation de la réaction.

b) Définir la vitesse volumique v de formation du produit P.

c) En appliquant l'approximation de l'état quasi-stationnaire (AEQS) à l'entité ES (après une courte période d'induction), et en utilisant la conservation de la concentration de l'enzyme, montrer que la vitesse v s'écrit : $v = V_m / (1 + K_m/[S])$

Expliciter V_m et K_m , appelée constante de Michaelis. Préciser les unités.

I.3. a) Donner l'allure de la représentation graphique de la fonction $v = f([S])$ et en déduire une interprétation physique de V_m . De même, en raisonnant avec $V_m/2$, donner une interprétation physique de K_m .

b) Une enzyme efficace est-elle caractérisée par une constante de Michaelis faible ou forte ?

I.4. a) Proposer une expression affine de la fonction $1/v$ et en déduire une méthode pour déterminer V_m et K_m .

b) Les résultats d'une expérience sont les suivants ($[E]_0 = 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1}$) :

[S] ($10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$)	0	1,0	1,25	2,5	5,0	10
v ($10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}.\text{min}^{-1}$)	0	2,5	2,8	3,55	4,15	4,55

Déterminer les valeurs numériques de V_m et K_m .

c) Peut-on en déduire les trois constantes cinétiques ?

I.5. On appelle « turnover number » d'une enzyme, le nombre de molécules de produit formées par unité de temps pour une seule molécule d'enzyme totalement saturée par le substrat.

a) Quelle grandeur définie dans le mécanisme représente le turnover ? Calculer sa valeur numérique.

b) On définit aussi « l'efficacité catalytique », notée e , comme le quotient du turnover à la constante K_m . Calculer sa valeur numérique.

I.6.a) Pour déterminer k_1 et k_{-1} , on peut s'intéresser à la période d'induction précédant le régime quasi-stationnaire. Reprendre le mécanisme, et en se plaçant maintenant en régime non stationnaire, montrer que la concentration du produit vérifie l'équation différentielle : $[P]'' + a[P]' = b$, dans laquelle on justifiera que a et b peuvent être considérées comme des constantes.

b) Intégrer cette équation et montrer que $[P]$ est une fonction affine du temps t en admettant que le produit $a.t$ est très supérieur à 1.

c) En déduire une méthode de détermination des constantes a et b puis des constantes cinétiques k_1 et k_{-1} .

II. Régulations de l'activité enzymatique

II.1. Cinétique contrôlée par la diffusion

Le site actif de l'enzyme ne se situe pas en surface, mais en profondeur, dans une « poche hydrophobe » excluant l'eau. Le substrat doit donc diffuser dans le milieu biologique jusqu'à la surface externe de l'enzyme, puis atteindre la poche hydrophobe, guidé par des interactions (liaisons hydrogène par exemple) avec des groupes de l'enzyme selon un phénomène d'adaptation induite. On suppose dans cette partie que la diffusion dans le milieu biologique limite et donc contrôle la cinétique. On note D le coefficient de diffusion du substrat dans le milieu biologique et $C(M,t)$ la concentration molaire du substrat au point M à l'instant t .

a) Pourquoi l'eau nuit-elle au processus enzymatique interne ?

b) Si la diffusion contrôle la réaction, que vaut la concentration molaire C_0 de S à la surface de l'enzyme ?

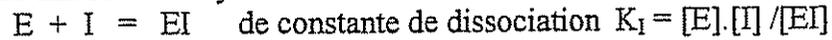
c) Pour simplifier, on va supposer l'enzyme immobile et sphérique (rayon $R = 2 \text{ nm}$); de plus, le régime stationnaire de diffusion radiale vers l'enzyme est supposé atteint. Montrer que le flux molaire de particules de substrat est constant. On précisera son unité.

d) Calculer l'expression du flux en fonction de D , R et C_∞ . La notation C_∞ représente la concentration molaire du substrat à une distance « infinie » de l'enzyme.

- e) Exprimer la vitesse volumique de disparition du substrat et en déduire l'ordre global de la réaction contrôlée par la diffusion ainsi que la constante de vitesse $k_{\text{diffusion}}$.
- f) Application numérique : Calculer $k_{\text{diffusion}}$ avec $D = 2,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

II-2. Inhibiteurs compétitifs

Certains composés, appelés inhibiteurs de réaction, notés I, peuvent réagir avec l'enzyme E et diminuer ainsi son activité catalytique. On s'intéresse dans cette partie aux inhibiteurs dits compétitifs. De structure souvent voisine de celle du substrat, ils réagissent avec l'enzyme en formant « un complexe inhibiteur-enzyme » selon une transformation renversible :

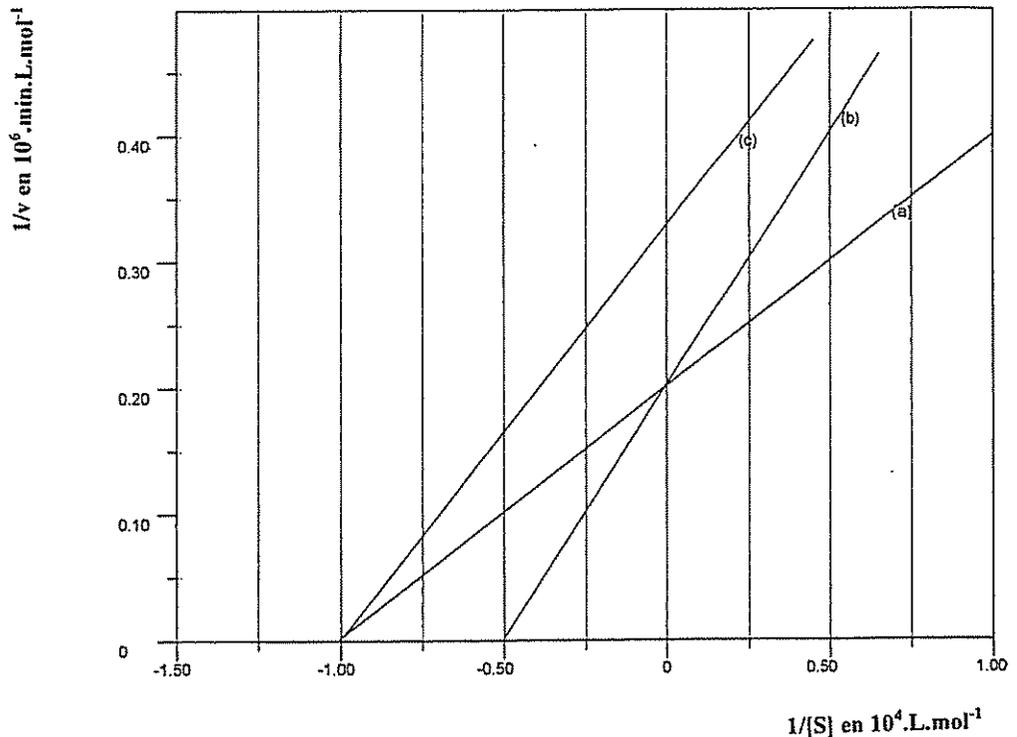


L'enzyme est ainsi partiellement bloquée.

Ce phénomène intervient dans la nature pour réguler de nombreux systèmes métaboliques. Par biomimétisme, les chimistes ont synthétisé des médicaments, comme l'AZT pour le traitement du SIDA, faisant intervenir des inhibitions de transformations non souhaitées.

- a) Reprendre la méthode de la question I.2.b) et exprimer la nouvelle fonction $v = f([S])$. Montrer que tout se passe comme si on avait une nouvelle constante de Michaelis K_m' supérieure à K_m . Exprimer K_m' en fonction de K_m , de $[I]$ et K_I .
- b) Les données cinétiques, pour la même enzyme qu'à la question I.5., mais en présence de deux sortes d'inhibiteur, un compétitif et un autre type d'inhibiteur dit non compétitif, sont fournies ci-dessous (Graphe 2 : représentation affine dite de Lineweaver et Burk) :

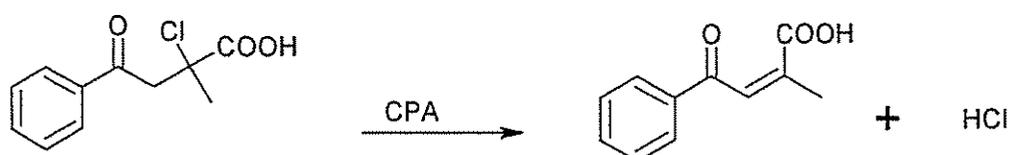
Graphe 2 :



- En justifiant vos réponses, identifier les 3 courbes (a), (b), (c) du graphe 2 :
- en absence d'inhibiteur
 - en présence de l'inhibiteur compétitif
 - en présence de l'inhibiteur non compétitif (ne pas interpréter la courbe).

Ce modèle permet également d'expliquer un cas de catalyse enzymatique stéréospécifique. Supposons que le substrat soit chiral et présente deux énantiomères S^- et S^+ . Un seul produit P achiral est obtenu. On peut modéliser la situation en posant que chaque énantiomère constitue un inhibiteur compétitif pour son isomère optique.

- c) Exprimer la vitesse v^- de formation de P à partir de S^- en fonction de k_2^- , $[E]_0$, K_m^- , K_m^+ , $[S^-]$, $[S^+]$; S^+ est alors considéré comme l'inhibiteur. Par analogie, exprimer v^+ .
- d) Exprimer le rapport v^-/v^+ en fonction des efficacités catalytiques e^- et e^+ des deux énantiomères (définition en I.5.b) et des concentrations $[S^-]$ et $[S^+]$. Justifier pourquoi l'efficacité catalytique est également appelée « constante de spécificité ».
- e) Application : La carboxypeptidase CPA est une enzyme qui catalyse la réaction d'élimination ci-dessous :



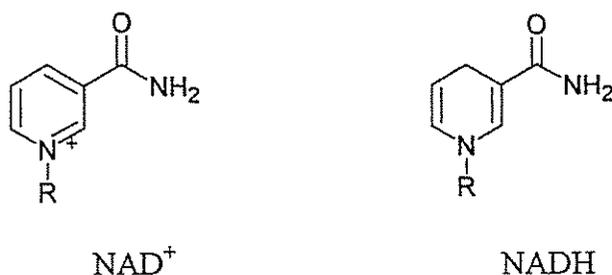
Avec un substrat racémique, on observe une cinétique rapide avec un taux d'avancement de 50 % et ensuite un fort ralentissement de la réaction.

Proposer une explication à cette observation expérimentale. Quelle peut-être l'application de ce phénomène ?

On donne : $e^- = 1,1 \cdot 10^4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ et $e^+ = 1,1 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

III. Application biomimétique avec un coenzyme

Beaucoup d'enzymes sont inactives en l'absence de certaines substances non protéiques. Ces substances qui apportent leur réactivité propre peuvent être de nature métallique ou organique et sont respectivement appelées cofacteurs et coenzymes. On va s'intéresser à un coenzyme d'oxydoréduction permettant les transferts protoniques et électroniques qui sont à la base des processus du métabolisme énergétique cellulaire. On peut le représenter sous la forme du couple NAD^+/NADH dont les structures simplifiées sont :



R est un groupe de formule complexe que l'on ne précisera pas.

On s'intéresse également au couple (ion pyruvate (noté pyr) / ion lactate (noté lac)) très important en biologie : $(\text{CH}_3\text{-CO-COO}^- / \text{CH}_3\text{-CHOH-COO}^-)$.

III-1. Une transformation d'oxydoréduction stéréosélective

On sait que le glucose est une source d'énergie biologique. On s'intéresse ici à la dernière étape aérobie de la glycolyse, qui se produit par exemple dans un muscle en plein effort.

- Donner les formules topologiques des acides pyruvique et lactique. Les nommer en nomenclature officielle.
- Pourquoi raisonne-t-on avec les ions pyruvate et lactate dans les conditions biologiques ?
- Ecrire les demi-équations d'oxydo-réduction des deux couples cités.
- Ecrire l'équation de la réaction d'oxydo-réduction dans le sens où elle peut se produire spontanément dans les conditions standard biologiques, en présence de l'enzyme « L-lactate déshydrogénase » notée L-LDH. Le nom de l'enzyme paraît-il incohérent devant la transformation réalisée ?
- Calculer la constante d'équilibre apparente K_{app} à $pH = 7$.
- Calculer la constante d'équilibre K .
- Le rôle du NADH est, en association avec l'enzyme, un rôle catalytique. Que doit faire la nature pour le maintenir présent dans le milieu ?
- Cette transformation est stéréosélective : l'hydroxyacide présente un carbone asymétrique de descripteur stéréochimique S. Représenter le produit obtenu dans l'espace.

III-2. Synthèse stéréosélective biomimétique

On réalise la transformation ci-dessus au laboratoire.

Dans un ballon de 250 mL, on dissout dans une solution de tampon phosphate de concentration $C = 0,01 \text{ mol.L}^{-1}$ et de $pH = 7,4$:

- $n_{pyr} = 0,10 \text{ mol}$ d'acide pyruvique
- $n_{NADH} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$ de NADH
- $n_f = 0,12 \text{ mol}$ de méthanoate (formiate) de sodium
- $V = 100 \text{ mL}$ d'une suspension aqueuse de L-LDH et de formiate déshydrogénase immobilisée sur un gel de polyacrylamide (PAAM).

Après réaction, extraction et distillation, on récupère $m = 8,1 \text{ g}$ d'acide lactique.

- Donner la définition précise d'une solution tampon.
- Proposer une méthode pour fabriquer la solution tampon utilisée.
- Quel est le rôle de l'enzyme formiate déshydrogénase ? Ecrire l'équation de la réaction dans laquelle elle intervient. Justifier que cette réaction ne pose pas de problèmes de sous-produits.
- Quel réducteur chimique spécifique du groupe carbonyle aurait-on pu utiliser à la place de NADH ? Le produit serait-il le même ? Comment pourrait-on le vérifier ?
- Faire le schéma légendé de l'appareillage de distillation fractionnée.
- Calculer le rendement de la synthèse de l'acide lactique.

III-3. Etude du polymère polyacrylamide PAAM

- Donner la définition d'un polymère.
- Quel est le rôle du polymère PAAM dans la synthèse précédente ?
- Le monomère est l'acrylamide $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CO}-\text{NH}_2$. Donner son nom en nomenclature officielle.
- L'acrylamide peut être obtenu à partir de l'acrylonitrile $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CN}$ selon une transformation biocatalysée. Ecrire l'équation de la réaction et la nommer. Pourquoi choisit-on un processus de biocatalyse ?
- La polymérisation est effectuée par voie radicalaire, en solution aqueuse, en présence d'ions peroxydisulfate $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$. Dans l'eau, ces ions libèrent les radicaux anions $\text{SO}_4^{\cdot-}$. Donner la formule de Lewis du radical anion $\text{SO}_4^{\cdot-}$.

- f) Quel est le rôle du radical anion ? Citer une autre entité chimique souvent utilisée dans le même rôle.
- g) Par analogie avec la formation du polyéthylène, proposer un mécanisme pour cette polymérisation radicalaire et donner la formule du polymère.
- h) Ce polymère est soluble dans l'eau. Justifier.
- i) Ce polymère ne peut pas être utilisé en milieu acide ou basique : pourquoi ?
- j) En réalité, ce polymère est visqueux et pour avoir un véritable gel avec des pores de taille nanométrique contrôlée, on ajoute du diacrylamide de formule :
$$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CO}-\text{NH}-\text{CH}_2-\text{NH}-\text{CO}-\text{CH}=\text{CH}_2.$$

Quelle modification subit la structure du polymère ?

Partie C : Les métaux en biologie, le cas du fer

Le fer est le métal de transition le plus abondant dans le milieu vivant.

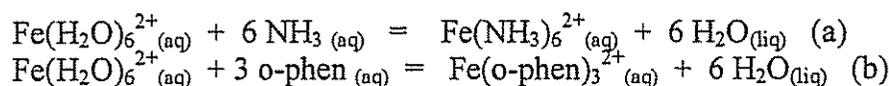
I. Le fer, exemple de métal de transition

I-1. Atomistique : champ cristallin

- a) Qu'appelle-t-on un élément de transition ?
- b) Donner la configuration électronique de l'atome de fer dans sa configuration la plus stable.
- c) Donner les configurations électroniques fondamentales des ions Fe^{2+} et Fe^{3+} .
- d) Pourquoi les ions des métaux de transition forment-ils facilement des complexes ?
- e) Le complexe $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$ est un complexe octaédrique, à champ faible, paramagnétique. Faire des schémas légendés pour expliquer les termes : octaédrique, champ faible, paramagnétique.

I-2. Contrôle entropique de l'effet chélate

On s'intéresse aux deux réactions d'échange de ligand, d'équations ajustées (a) et (b):



- a) En ne considérant que les enthalpies dues aux ruptures et créations de liaisons, comparer qualitativement les enthalpies standard $\Delta_r H^\circ_a$ et $\Delta_r H^\circ_b$ des deux réactions.
- b) Comparer qualitativement les entropies standard $\Delta_r S^\circ_a$ et $\Delta_r S^\circ_b$.
- c) En déduire quel est le complexe le plus stable. Expliquer le titre du paragraphe I-2.
- d) Citer un ligand hexadente qui forme des complexes métalliques très stables et proposer un exemple d'application de ces complexes.

I-3. Influence du ligand sur les propriétés réductrices de l'ion Fe^{2+}

On cherche à connaître le potentiel standard du couple $\text{Fe}(\text{o-phen})_3^{3+} / \text{Fe}(\text{o-phen})_3^{2+}$ afin de discuter l'influence du ligand o-phen sur les propriétés réductrices de l'ion Fe^{2+} .

- a) Ecrire la demi-équation associée à ce couple rédox.
- b) Ecrire la formule de Nernst associée à ce couple rédox.
- c) Calculer le potentiel standard de ce couple rédox avec les données du sujet.

On peut également mesurer ce potentiel standard par « spectroélectrochimie » : A l'aide d'un potentiostat, on peut fixer le potentiel E d'une électrode plongeant dans une solution située dans une cellule transparente et mesurer l'absorbance A de la solution par spectrophotométrie UV/visible, à une longueur d'onde fixée. En milieu très oxydant, l'ion complexe est entièrement sous sa forme oxydée $\text{Fe}(\text{o-phen})_3^{3+}$. En milieu très réducteur, l'ion complexe est entièrement sous sa forme réduite $\text{Fe}(\text{o-phen})_3^{2+}$. Pour une valeur intermédiaire du potentiel, la solution contient le mélange des deux ions complexes. Le changement de potentiel ne modifie pas la concentration globale (notée C) en complexes.

On donne les potentiels E correspondant aux trois cas cités ci-dessus ($t = 25\text{ }^\circ\text{C}$ et longueur d'onde fixe):

E(V) /ESH	0,95	1,16	1,52
A	$A_{\text{red}} = 0,45$	$A = 0,80$	$A_{\text{ox}} = 1,8$

- Rappeler la loi de Beer-Lambert, en précisant les unités.
- Exprimer le rapport des concentrations des deux complexes, dans le cas intermédiaire, en fonction des trois absorbances A_{red} , A et A_{ox} .
- En déduire le potentiel standard du couple $\text{Fe}(\text{o-phen})_3^{3+} / \text{Fe}(\text{o-phen})_3^{2+}$. Comparer avec le résultat de la question c).
- Quelle est l'influence de la complexation sur le caractère réducteur de l'ion Fe^{2+} ?

II. Complexation du fer dans l'hémoglobine et la myoglobine

On s'intéresse ici à des complexes biologiques dans lesquels l'ion Fe^{2+} est lié à une porphyrine, ligand chélatant tétradente par quatre atomes d'azote au centre d'un macrocycle. De tels complexes sont présents dans des protéines comme la myoglobine et l'hémoglobine. Le fer est au sein d'un complexe octaédrique : les quatre positions équatoriales sont occupées par la porphyrine; une position axiale est occupée par un atome d'azote d'un autre fragment de la protéine ; la deuxième position axiale est vacante ou occupée par une molécule de dioxygène. En effet, ces protéines assurent le transport du dioxygène chez les mammifères : l'hémoglobine dans le sang au départ des poumons et la myoglobine prend le relais dans les muscles. Enfin, la myoglobine, notée Mb sans dioxygène, c'est-à-dire à l'état *désoxy*, ne contient qu'une seule porphyrine et ne peut fixer qu'une seule molécule de dioxygène O_2 . On la note MbO_2 avec le dioxygène, c'est-à-dire à l'état *oxy*. En revanche, l'hémoglobine, notée Hb sans O_2 , à l'état *désoxy*, contient 4 porphyrines et peut donc fixer jusqu'à 4 molécules O_2 . On la note alors $\text{Hb}(\text{O}_2)_4$.

II-1. Les molécules de dioxygène et de monoxyde de carbone

- Ecrire la formule de Lewis de la molécule de dioxygène O_2 .
- Etablir le diagramme d'énergie des orbitales moléculaires de la molécule O_2 et distribuer les électrons de valence.
- Quelle est la nature des orbitales du niveau le plus haut occupé (HO) ?
- A partir du diagramme des orbitales moléculaires, calculer l'indice de liaison de la molécule O_2 . Le résultat est-il cohérent avec le modèle de Lewis ?
- De même, prévoir ses propriétés magnétiques. Le résultat est-il cohérent avec le modèle de Lewis ?
- Le diagramme d'orbitales moléculaires de la molécule de monoxyde de carbone CO est quant à lui « corrélé », du même type que la molécule de diazote. Construire ce diagramme et distribuer les électrons de valence.

- g) Proposer un schéma de Lewis pour la molécule CO en accord avec l'indice de liaison et en faisant apparaître les éventuelles charges formelles.
- h) La molécule de monoxyde de carbone présente, comme la molécule de dioxygène, des propriétés de ligand grâce à l'un de ses doublets non liants. Se fixe-t-elle préférentiellement par le carbone ou l'oxygène ?

II-2. Coordination du dioxygène avec l'hémoglobine

- a) L'élément fer reste au nombre d'oxydation (+ II) dans les complexes biologiques étudiés : le dioxygène n'oxyde pas le fer. Proposer une explication en liaison avec la question I.3.g).
- b) Chaque désoxyHb peut être considérée comme un fragment de type complexe ML_5 . Les orbitales d sont éclatées en trois groupes : par énergie croissante, on trouve le groupe d'orbitales dxy, dyz, dxz, puis, très proche, l'orbitale dz^2 et enfin, très éloignée, l'orbitale $d(x^2-y^2)$. La fixation de O_2 transforme le complexe en complexe octaédrique ML_6 ; l'orbitale dz^2 remonte au niveau de l'orbitale $d(x^2-y^2)$. On dit que le fer (II) « haut spin » devient « bas spin ». Justifier par un schéma simple.
- c) Ce changement de structure s'accompagne d'un changement de couleur : le sang des veines, pauvre en O_2 , est « bleu » alors que celui des artères, riche en O_2 , est « rouge » : Justifier simplement.
- d) Ce changement de structure rend également l'ion fer (II) plus petit, ce qui lui permet de rentrer rigoureusement dans le plan de la porphyrine. Ce mouvement entraîne un changement de conformation de la protéine qui favorise la fixation de O_2 sur les autres sites de l'hémoglobine. Que permet ce phénomène dit de « coopération » dans la nature ?
- e) En revanche, le monoxyde de carbone est très toxique : proposer une explication.

On donne :

Complexes	Ligand de la 2 ^{ème} position axiale	$\Delta_r G^\circ$ de fixation du 2 ^{ème} ligand axial (kJ.mol^{-1})
Oxyhémoglobine (Fer II)	O_2	- 26,7
Carboxyhémoglobine (Fer II)	CO	- 40,1

II-3. Dosage de l'hémoglobine dans le sang par spectrophotométrie

Bien que, comme on l'a vu, le fer (II) complexé de l'hémoglobine ou de la myoglobine soit a priori « protégé » de l'oxydation in vivo, on peut facilement l'oxyder en fer (III) in vitro par l'ion hexacyanoferrate (III) (ou ferricyanure). On obtient la méthémoglobine qui ne peut plus fixer le dioxygène mais qui fixe très facilement les ions cyanure CN^- . On obtient alors la cyanométhémoglobine de couleur rouge. Ce complexe de couleur rouge très particulière peut être étudié en spectroscopie UV/visible. On utilise cette propriété pour doser l'hémoglobine dans le sang. Dans un tube à essai, on additionne 20 μL de sang et 5,0 mL de solution de ferricyanure de potassium (excès). On laisse incuber à température ambiante. Après avoir sélectionné la longueur d'onde $\lambda = 540 \text{ nm}$, on relève l'absorbance notée A : $A = 0,38$.

On donne les résultats d'un étalonnage réalisé à partir d'échantillons sanguins de concentration en hémoglobine connue (conditions identiques ; « blanc effectué » avec 20 μL d'eau et 5,0 mL de solution de ferricyanure de potassium) :

$C_{\text{hémoglobine dans le sang}}$ (g.dL^{-1})	5	10	15	20
Absorbance ($\lambda = 540 \text{ nm}$)	0,15	0,30	0,45	0,60

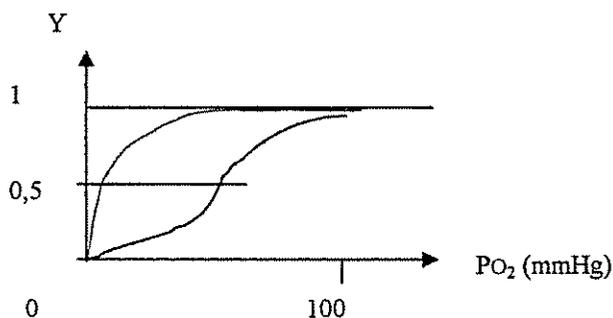
- Donner la formule de l'ion complexe hexacyanoferrate (III).
- Que signifie « effectuer le blanc » ?
- Comment choisit-on la longueur d'onde de travail ?
- Déterminer la concentration en hémoglobine dans le sang ; on suppose l'oxydation totale.
- Les valeurs normales appartiennent à l'intervalle [12 ; 20] en g.dL⁻¹. Conclure.

II-4. La myoglobine prend le relais du transport de dioxygène dans les muscles

On se propose de justifier pourquoi la myoglobine prend le relais du transport du dioxygène dans les muscles.

Le graphe 3 représente les courbes de saturation de la myoglobine (courbe supérieure, indice 1 ensuite) et de l'hémoglobine (courbe inférieure, indice 4 ensuite) par le dioxygène. Ces courbes sont représentatives de la fonction $Y = f(P_{O_2})$ avec Y égale à la fraction molaire de Hb (ou Mb) ayant fixé O₂ et P_{O₂} la pression partielle en dioxygène gazeux en équilibre avec le dioxygène dissous de concentration [O₂] selon : O₂ (g) = O₂ (aq) de constante d'équilibre K^o.

Graphe 3 : Myoglobine : courbe supérieure (indice 1)
Hémoglobine : courbe inférieure (indice 4)



On observe une différence d'affinité des deux protéines pour le dioxygène en fonction de la pression. On rappelle que Hb peut fixer 4 molécules O₂ alors que Mb n'en fixe qu'une seule.

- Ecrire l'équation de la réaction de formation du complexe MbO₂ à partir de Mb et O₂ dissous ainsi que la constante de formation β_1 de ce complexe.
- Définir Y₁ puis l'exprimer en fonction de [O₂], C^o et β_1 , puis de P_{O₂}, P^o, K^o et β_1 .
- On note P₅₀₍₁₎, la valeur de P_{O₂} qui correspond à la demi-saturation (50 % de saturation). Exprimer Y₁ en fonction de P_{O₂} et P₅₀₍₁₎. Montrer la conformité avec l'hyperbole équilatère du graphe 3.
- Reprendre la même méthode pour l'hémoglobine (l'indice 4 remplace l'indice 1) et montrer que :

$$Y_4 = P_{O_2}^h / (P_{O_2}^h + P_{50(4)}^h)$$

L'exposant h est appelé coefficient de Hill. Quelle est la valeur attendue de h ?

- En fait la courbe 4 est bien une sigmoïde mais le coefficient de Hill expérimental est de l'ordre de 3. Qu'est-ce que cela suppose ?
- On évalue P_{O₂} = 100 mm Hg dans les capillaires, et P_{O₂} = 30 mm Hg dans les muscles. A partir des courbes 1 et 4, justifier pourquoi le transport du dioxygène se fait par la myoglobine dans les muscles et écrire l'équation de la réaction de transfert du dioxygène de l'hémoglobine vers la myoglobine.

Fin de l'épreuve

8. Rapport relatif à la composition de chimie

Le sujet traite de quelques aspects de la chimie des processus biologiques. Il est composé de trois parties indépendantes :

- la première s'intéresse aux sucres,
- la deuxième aborde l'étude des enzymes et de la catalyse enzymatique,
- la troisième est consacrée au rôle des métaux, en particulier le fer, en biologie.

Ce sujet, dans lequel chimie organique et chimie générale sont intimement liées, comporte essentiellement des questions classiques, de difficulté variable. Sur l'ensemble de toutes les copies, toutes les questions ont été abordées. Globalement, l'épreuve a permis de classer correctement les candidats : les notes s'échelonnent entre 0 et 20 (voir le document 04 Distribution des notes).

Remarques générales

Il s'avère que trop de candidats, futurs enseignants, manquent de rigueur et ne manipulent pas correctement le vocabulaire scientifique. Il faut éviter des phrases qui débutent ainsi : « L'équivalence est l'instant.... », « Les isotopes, c'est quand » ou bien « Un isotope possède le même nombre de protons mais pas le même nombre de neutrons. » Le jury apprécie et récompense des réponses concises et bien construites, sans faute de français (y compris d'orthographe).

Comme les années précédentes, le jury note que la plupart des candidats a abordé les différentes parties et s'est souvent contentée de répondre aux questions brèves et directement accessibles. De là, l'impression d'une approche superficielle qui ne permet pas de suivre le fil directeur des diverses parties, souvent utile à la mise en œuvre d'une résolution simple et astucieuse de nombreuses questions. L'analyse des résultats indique que ceux qui ont montré leur capacité à résoudre l'ensemble d'une ou plusieurs parties, en ayant le courage de conduire les calculs jusqu'au bout, sont largement payés de leur effort : les questions nécessitant à la fois réflexion et temps se voient naturellement attribuer un nombre de points important.

D'autre part, il est important de rappeler que toute question correspondant à une réponse binaire (constante de Michaelis faible ou forte, carbone *R* ou *S*, anomère le plus stable α ou β) se voit attribuer la note 0 si la réponse n'est pas justifiée, et cela même si la réponse est juste.

Enfin, et de façon paradoxale, les questions faisant appel à la physique (thermodynamique, diffusion des particules) sont souvent mal traitées, voire non abordées ; à l'inverse, les mécanismes de chimie organique, même dans un contexte biologique qui aurait pu apparaître déroutant, sont un peu mieux maîtrisés. On rappelle néanmoins qu'une flèche représente le transfert d'un doublet d'électrons : elle prend donc son origine sur un doublet et non sur une éventuelle charge négative. Ce formalisme est un bon outil de compréhension et de pédagogie. Par ailleurs, le nombre d'actes élémentaires impliqués dans un mécanisme doit apparaître clairement.

Remarques plus spécifiques

Remarques concernant la partie A du sujet

A.I.1. On observe un grand manque de rigueur dans la rédaction de cette partie traitant de thermodynamique. Les dérivées partielles ne sont pas utilisées à bon escient et la notion de potentiel chimique n'est pas maîtrisée. De nombreux candidats confondent le potentiel chimique du corps pur à une pression donnée et le potentiel standard. Le terme d'évolution du système chimique est souvent oublié dans l'expression de la différentielle dG.

A.I.2. De nombreuses erreurs sont liées à une mauvaise utilisation des unités de pression.

A.II.1. Trop de candidats écrivent des demi-équations en réponse à la question demandant une équation de réaction ainsi que des équations de réaction comportant des électrons.

En outre, la notion de dismutation n'est pas comprise. Beaucoup de candidats pensent que le diiode se transforme en ion iodate en milieu basique et se contentent de changer de domaine en suivant une horizontale sur le diagramme potentiel-pH. Il en est de même pour la rétrodismutation.

La définition de l'équivalence et son repérage donnent lieu à des réponses satisfaisantes dans l'ensemble.

La réponse correcte au calcul d'une constante d'équilibre n'est pas $10^{17,7}$ mais plutôt $5 \cdot 10^{17}$.

A.II.2. L'existence d'un azéotrope eau/alcool est connue.

La définition des isotopes et le principe de la spectrométrie de masse sont connus mais peu de candidats expriment l'essentiel en une réponse courte, rigoureuse et complète.

L'isotope stable ^{13}C est moins connu que l'isotope ^{14}C radioactif.

A.III.1. La confusion entre les symboles D de la représentation de Fischer et d du pouvoir rotatoire dextrogyre (le second n'est d'ailleurs plus utilisé : il est remplacé par le signe +) est fréquente.

Le mécanisme de cyclisation du glucose par hémiacétalisation est connu mais une meilleure lecture du sujet (qui précisait la taille du cycle en introduction) aurait évité la participation erronée de la fonction alcool terminale.

On rappelle que la notion d'énantiométrie ne se limite pas à l'étude d'un seul site asymétrique au sein de la molécule. Si une molécule possède plusieurs atomes de carbone asymétriques, le changement de configuration d'un seul d'entre eux conduit à des diastéréoisomères et non à des énantiomères.

La stéréochimie des cycles à six atomes en conformation chaise n'est pas maîtrisée.

A.III.2. L'addition nucléophile de HCN est souvent bien traitée. En revanche, peu de candidats obtiennent la formule correcte de l'acétal.

Remarques concernant la partie B du sujet

Cette partie, notée sur davantage de points que les deux autres, est pourtant celle qui en a globalement rapporté le moins. Les candidats courageux, qui ont mené à bien les calculs et su utiliser astucieusement les analogies, ont été récompensés et se sont distingués.

B.I. On remarque de nombreuses confusions, en particulier entre grandeurs microscopiques et macroscopiques, dans la représentation du profil réactionnel.

Le terme volumique, dans la définition de la vitesse, perturbe de nombreux candidats.

La cinétique de Michaelis est plutôt bien traitée. En revanche, lorsque l'équation différentielle terminale est connue, certains candidats n'hésitent pas à utiliser des intermédiaires de calcul douteux. Les correcteurs ne sont pas dupes et lisent attentivement les calculs intermédiaires.

B.II.1. Cette partie est la moins réussie. De nombreux candidats confondent le flux et la densité surfacique de flux j . En conséquence, ils démontrent que cette dernière est constante, ce qui, bien sûr, est faux en symétrie sphérique.

B.II.2. La résolution de cette partie est très simple si on travaille par analogie avec le B.I. Les candidats astucieux, qui ont bien lu et analysé le sujet, sont récompensés.

B.III.1. Les réponses aux formules topologiques et à la nomenclature des acides manquent souvent de rigueur.

On note une confusion entre la constante d'équilibre et la constante apparente à $\text{pH} = 7$.

B.III.2. La définition d'une solution tampon est souvent complète. En revanche, les méthodes pour fabriquer une telle solution ne sont pas connues.

Le schéma légendé de l'appareillage de distillation fractionnée est imprécis sur de nombreuses copies : montages fermés, manque du support élévateur, du thermomètre, etc.

B.III.3. La confusion entre hydrolyse et hydratation est fréquente.

Le mécanisme de polymérisation radicalaire est rarement connu, ce qui est décevant.

Remarques concernant la partie C du sujet

Dans l'ensemble, cette partie est la mieux traitée.

C.I.1. La définition d'un élément de transition manque de rigueur (en particulier, les ions ne sont pas pris en compte). La structure électronique de l'ion Fe^{2+} , souvent proposée en $3d^5 4s^1$ au nom du « demi-remplissage plus stable », est fautive.

Notons un point positif : la théorie du champ cristallin est souvent bien expliquée.

C.I.2. L'origine entropique de l'effet chélate est mal comprise : peu de candidats la relient à la différence entre les nombres de particules dans l'état initial et dans l'état final.

C.I.3. Une double satisfaction : souvent, la formule de Nernst est correctement écrite et les calculs exploitant la loi de Beer-Lambert sont bien menés.

C.II.1. Même si on déplore quelques erreurs fréquentes (indice de liaison, nom des OM...), les candidats ont glané beaucoup de points dans cette partie.

C.II.2. Le lien entre transition électronique et couleur est correctement fait mais beaucoup de candidats oublient que la spectrophotométrie est une technique d'absorption et que la couleur observée est complémentaire de celle associée au rayonnement absorbé.

C.II.3. La signification de l'expression « faire le blanc » est souvent floue et incomplète.

C.II.4. Enfin, cette dernière partie, a priori déroutante, a permis de récompenser des candidats volontaires qui ont su analyser le sujet puis mener à bien les calculs.

Conclusion

Ce rapport a pour objet de faire progresser les futurs candidats. Il note donc les faiblesses relevées dans les copies. Mais le jury tient à féliciter les candidats dont les notes honorables, voire brillantes, révèlent de solides connaissances en chimie. La composition de chimie, délibérément vaste et classique, est conçue pour récompenser ceux qui fournissent des efforts dans cette matière pendant leur préparation.

SESSION DE 2007**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.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit..

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

NB : *Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.*

Tournez la page S.V.P.

Quelques phénomènes électromagnétiques dans les plasmas du Système Solaire

Si on exclut les planètes et leur éventuelle atmosphère gazeuse, tout le Système Solaire est constitué de plasma, mélange d'électrons et d'ions (couronne solaire, vent solaire, magnétosphères et ionosphères qui entourent certaines planètes). Le but de ce problème est d'étudier quelques aspects de ces milieux. Il n'aborde que l'étude des plasmas globalement neutres (nombre de charges positives élémentaires égal au nombre de charges négatives élémentaires au repos) et totalement ionisés (ce qui est toujours vrai sauf dans les ionosphères). Les milieux étudiés sont des milieux très peu denses ; les collisions entre particules jouent donc en général un rôle négligeable (sauf dans certaines questions de la deuxième partie, où ce sera précisé). Dans tous ces plasmas un champ magnétique statique est présent, on le notera \vec{B}_0 .

Dans un milieu ionisé, le couplage entre les charges et les champs rend la dynamique des particules indissociable de celle des champs électromagnétiques et les phénomènes électromagnétiques sont des manifestations de ce qui se passe dans le milieu.

L'exploration spatiale, possible depuis les années 1960-1970, a permis de découvrir les grandes régions du Système Solaire. L'arrivée de sondes plus sophistiquées permet à présent d'effectuer des observations détaillées, soit à distance pour l'observation du Soleil (avec SOHO par exemple), soit par des mesures *in situ* dans les milieux plus accessibles. Ces mesures conduisent à comprendre des phénomènes tels que l'émission de rayonnement non thermique.

La lecture de la partie introductive est nécessaire à la suite, les deux parties qui suivent sont indépendantes. Ces deux parties sont consacrées à deux approches qui se distinguent par la fréquence des phénomènes étudiés. En effet l'importante différence de masse entre les électrons et les ions entraîne une réponse très différente suivant la fréquence : à haute fréquence, les ions restent immobiles et la dynamique du plasma est celle des électrons (première partie), à basse fréquence au contraire, le mouvement des ions domine la dynamique (deuxième partie). Dans cette deuxième partie, les cinq applications peuvent être traitées de manière autonome (3, 4-5, 6-7, 8 et 9) en admettant les résultats principaux de la magnétohydrodynamique (1-2).

Formulaire:

Le produit vectoriel est noté \times , les deux notations \times et \wedge peuvent être utilisées indifféremment.

Pour deux vecteurs quelconques :

$$\vec{\nabla}(\vec{A} \cdot \vec{B}) = (\vec{A} \cdot \vec{\nabla})\vec{B} + (\vec{B} \cdot \vec{\nabla})\vec{A} + \vec{A} \times (\vec{\nabla} \times \vec{B}) + \vec{B} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A})$$

$$\vec{\nabla} \times (\vec{A} \times \vec{B}) = \vec{A} (\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) - \vec{B} (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) + (\vec{B} \cdot \vec{\nabla})\vec{A} - (\vec{A} \cdot \vec{\nabla})\vec{B}$$

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = -\nabla^2 \vec{A} + \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{A})$$

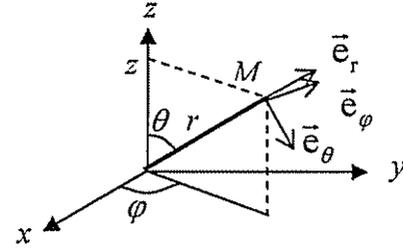
Pour trois vecteurs quelconques:

$$\vec{A} \times (\vec{B} \times \vec{C}) = (\vec{A} \cdot \vec{C})\vec{B} - (\vec{A} \cdot \vec{B})\vec{C}$$

Expressions en coordonnées sphériques :

$$\vec{\nabla}(\psi) = \frac{\partial \psi}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \vec{e}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} \vec{e}_\varphi$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{A}) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 A_r)}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial (\sin \theta A_\theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi}$$



$$\vec{\nabla} \times (\vec{A}) = \frac{1}{r \sin \theta} \left[\frac{\partial (\sin \theta A_\varphi)}{\partial \theta} - \frac{\partial A_\theta}{\partial \varphi} \right] \vec{e}_r + \left[\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial A_r}{\partial \varphi} - \frac{1}{r} \frac{\partial (r A_\varphi)}{\partial r} \right] \vec{e}_\theta + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial (r A_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right] \vec{e}_\varphi$$

Valeurs numériques : $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27}$ kg = 1836 m_e , $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C,

$$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}, \quad \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi 10^9} \cong 8,8 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$$

Introduction

1. Pulsations caractéristiques d'un plasma

Les ions du plasma (de masse m_i et de charge q_i) sont caractérisés par des grandeurs macroscopiques : nombre de particules par unité de volume, appelé par la suite densité, n_i , vitesse \vec{v}_i , pression p_i .

Les électrons sont caractérisés par des grandeurs similaires, indiquées par un indice e . On définit les pulsations caractéristiques pour les ions par les formules suivantes.

$$\text{Pulsation plasma : } \omega_{pi} = \sqrt{\frac{n_i q_i^2}{\epsilon_0 m_i}}.$$

$$\text{Pulsation de giration, ou gyropulsation, autour du champ magnétique : } \omega_{ci} = \frac{q_i B_0}{m_i}$$

Quelle est la signification physique de ces pulsations ? On répondra sans calcul.

On leur associe la fréquence plasma f_{pi} et la gyrofréquence f_{ci} .

On a des définitions identiques pour les électrons avec l'indice e (en prenant la valeur absolue de la charge).

2. Les équations du mouvement pour les ions et les électrons ("équations fluides")

Densités, vitesses et pressions, de même que les champs électromagnétiques, sont *a priori* des fonctions de l'espace et du temps ; en l'absence de forces autres que les forces de pression et les forces électromagnétiques, ces grandeurs vérifient les équations :

$$\begin{cases} \frac{\partial n_i}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (n_i \vec{v}_i) = 0 \\ n_i m_i \frac{\partial \vec{v}_i}{\partial t} + n_i m_i (\vec{v}_i \cdot \vec{\nabla}) (\vec{v}_i) = -\vec{\nabla}(p_i) + n_i q_i (\vec{E} + \vec{v}_i \times \vec{B}) - \vec{P}_{ei} \\ \frac{\partial n_e}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (n_e \vec{v}_e) = 0 \\ n_e m_e \frac{\partial \vec{v}_e}{\partial t} + n_e m_e (\vec{v}_e \cdot \vec{\nabla}) (\vec{v}_e) = -\vec{\nabla}(p_e) + n_e q_e (\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) + \vec{P}_{ei} \end{cases}$$

où \vec{P}_{ei} est la densité volumique de force qui caractérise les interactions électrons-ions (« collisions »).

Expliquer la signification de ces équations et le rôle des différents termes.

Première partie

Émissions aurorales des planètes du Système Solaire

L'observation dans le domaine radio montre que les planètes sont émettrices de différents types d'ondes radio, les plus intenses étant les émissions aurorales. Ces émissions ont reçu des noms en fonction de leurs longueurs d'onde : TKR pour la Terre (Terrestrial Kilometric Radiation), SKR pour Saturne, HOM pour Jupiter, la longueur d'onde étant dans ce cas de l'ordre de l'hectomètre. L'objet de cette partie est d'étudier les conditions d'émission, de propagation et d'observation de ces rayonnements.

Chaque fois que des questions portent sur la comparaison entre les planètes on présentera les résultats sous forme d'un tableau où les planètes seront rangées par ordre croissant de distance au Soleil (D).

Planète	Mercure	Terre	Jupiter	Saturne
D , distance moyenne au Soleil (en UA, unité astronomique)	0,4	1	5,2	9,5
R , rayon de la planète (en km)	2400	6400	71000	60000
B_e , champ à la surface de la planète à l'équateur (en T)	$0,003 \cdot 10^{-4}$	$0,31 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$0,21 \cdot 10^{-4}$

I. Émission

Les observations montrent que les planètes qui émettent ce rayonnement auroral sont celles qui ont un champ magnétique propre et que les sources du rayonnement sont situées en région aurorale, région située au voisinage des pôles magnétiques vers $60-80^\circ$ de latitude nord ou sud.

1. On peut supposer en première approximation que le champ d'une planète est celui d'un dipôle magnétique \vec{M} dirigé suivant l'axe z (figure 1).

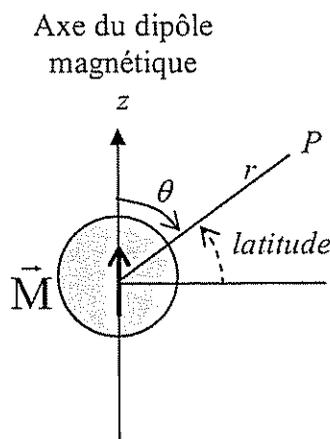


figure 1

1.a Rappeler l'expression du potentiel vecteur créé par ce dipôle en un point P situé à la distance r du centre de la planète.

1.b En déduire l'expression du champ magnétique \vec{B} en fonction de r , θ et M .

1.c Déterminer le module de ce champ magnétique en fonction de B_e , module du champ à la surface de la planète à l'équateur magnétique, de R , rayon de la planète qu'on supposera sphérique, et de r et θ .

2. On admettra que les ondes sont émises à la gyrofréquence électronique locale, f_{ce} : déterminer cette fréquence d'émission en fonction de r distance au centre de la planète. On supposera pour simplifier que l'émission se fait au voisinage de $\theta = 0$.

3. Calculer les fréquences d'émission pour Mercure, la Terre, Jupiter et Saturne en utilisant le tableau ci-dessus, sachant que l'altitude d'émission est d'environ 1 rayon planétaire (au-dessus de la planète).

4. Justifier les appellations données en introduction pour les différents rayonnements.

II. Propagation des ondes électroniques

Ces ondes radio se propagent dans un plasma constitué essentiellement de protons et d'électrons. Étant donné que leur fréquence est élevée, on peut considérer que ces ondes mettent en mouvement seulement les électrons, les ions restant immobiles. On étudiera seulement la dynamique des électrons pour établir leur relation de dispersion.

1. Étude des modes de propagation

1.a Exprimer les densités de charge et de courant en fonction de n_e , n_i , et \vec{v}_e .

1.b Écrire les deux équations fluides pour les électrons (voir Introduction 2.) en supposant que le plasma est froid ($p_e = 0$) et sans collisions entre les ions et les électrons. Compléter le système par les équations de Maxwell dans le milieu dont les permittivité et perméabilité sont celles du vide.

1.c En l'absence de perturbation, on suppose d'une part que le champ magnétique est uniforme, indépendant du temps et vaut \vec{B}_0 et d'autre part que les électrons n'ont pas de vitesse d'ensemble et ont une densité n_0 . On cherche à résoudre le système pour une petite perturbation : on pose pour toutes les grandeurs $u = u_0 + u_1$, où $|u_1| \ll |u_0|$ et on linéarise les équations. Écrire le système en fonction de n_{e1} , \vec{v}_{e1} , \vec{B}_1 , \vec{E}_1 , \vec{B}_0 et n_0 .

1.d On cherche maintenant une solution sous la forme d'une onde plane monochromatique de pulsation ω et de vecteur d'onde \vec{k} , toutes les grandeurs du premier ordre dans le calcul de perturbation sont donc proportionnelles à $e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$. Écrire le système de six équations en fonction de \vec{k} et ω . Comme il n'y a pas d'autres variables que celles qui concernent les électrons, on pourra omettre l'indice e dans la suite de cette partie.

2. Relation de dispersion des ondes

2.a Pour calculer la relation de dispersion, on se limitera au cas particulier de la propagation perpendiculaire au champ magnétique. On supposera \vec{k} parallèle à l'axe x , et \vec{B}_0 parallèle à l'axe z . Résoudre le système en éliminant toutes les variables au profit des composantes du champ électrique \vec{E}_1 . Montrer que la relation de dispersion se met sous la forme suivante:

$$\begin{vmatrix} \omega^2 - \omega_{pe}^2 & i\omega\omega_{ce}\left(1 - \frac{k^2 c^2}{\omega^2}\right) & 0 \\ -i\omega\omega_{ce} & \omega^2 - \omega_{pe}^2 - k^2 c^2 & 0 \\ 0 & 0 & \omega^2 - \omega_{pe}^2 - k^2 c^2 \end{vmatrix} = 0$$

2.b Mode ordinaire (mode O) : c'est celui dont la relation de dispersion s'écrit : $\omega^2 = \omega_{pe}^2 + k^2 c^2$. Comment est polarisé ce mode ? Montrer qu'il présente une pulsation de coupure quand k tend vers 0.

2.c Montrer que les deux autres modes présentent aussi une pulsation de coupure quand k tend vers 0. On suppose que $\omega_p < \omega_c$ et on appelle mode Z celui qui a la pulsation de coupure la plus basse et mode X celui qui a la pulsation de coupure la plus haute.

2.d La polarisation des ondes est définie par rapport au champ magnétique statique (un mode droit tourne dans le sens direct par rapport au champ \vec{B}_0). Comment est polarisé le champ électrique associé aux modes X et Z à la fréquence de coupure ? Commenter.

2.e Étudier le comportement asymptotique des 3 modes quand k tend vers l'infini.

2.f Tracer le diagramme de dispersion, ω/ω_{ce} en fonction de k , en identifiant les trois modes X, O, Z.

2.g Les ondes émises près d'une planète se propagent et peuvent être observées ensuite loin de cette planète. Lorsqu'on s'éloigne de la planète, la densité varie peu mais le champ magnétique diminue fortement ; on supposera que le diagramme établi à la question précédente reste valable. Quels sont les modes sur lesquels peuvent se propager des ondes qu'on observe loin de la planète ?

3. Mode de propagation du rayonnement auroral

On a pu traverser pour la première fois les régions sources du rayonnement kilométrique auroral terrestre avec le satellite Viking en 1986. L'enregistrement d'un spectrogramme par l'antenne électrique de Viking est présenté sur la figure 2 : le temps est en abscisse, la fréquence en ordonnée. À chaque pas de temps le spectre du signal est calculé et tracé en code couleur.

3.a La densité du plasma dans la région traversée est d'environ 10^7 m^{-3} . Le satellite Viking garde une latitude proche de 70° pendant la traversée mais son altitude varie :

à 20h30 : altitude de 0,9 rayon terrestre au-dessus du sol.

à 20h35 : altitude de 1 rayon terrestre au-dessus du sol.

Calculer les fréquences caractéristiques du milieu : fréquence plasma et gyrofréquence électronique. Identifier la ligne A qui traverse le spectrogramme.

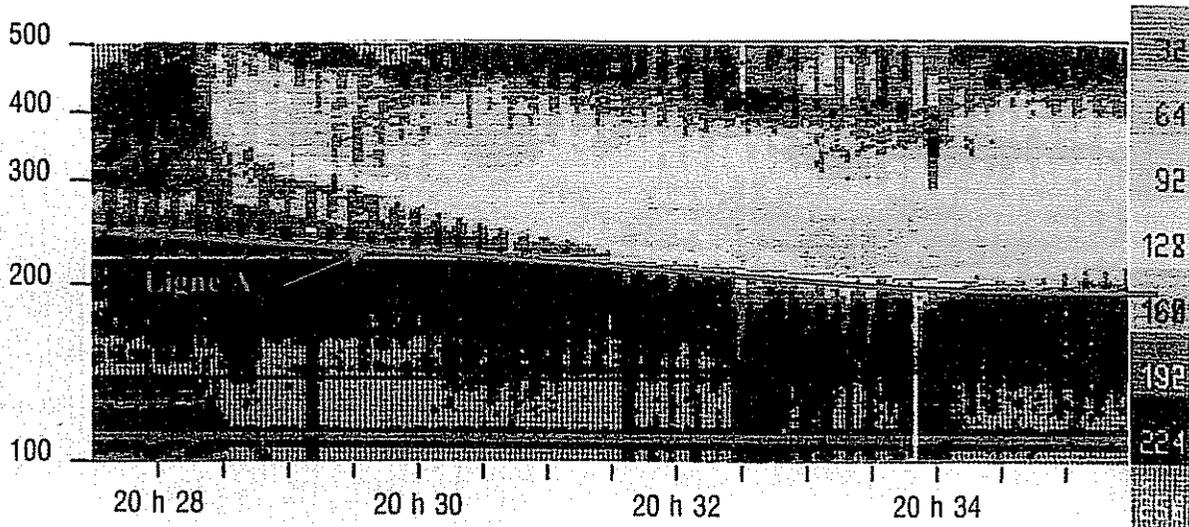


Figure 2 : Spectrogramme couleur d'une composante du champ électrique mesuré par Viking (orbite 165, 23/03/1986). En abscisse le temps, en ordonnée la fréquence en kHz. La couleur est d'autant plus rouge que l'intensité est forte.

3.b Compte tenu des intensités observées à quelle heure peut-on estimer que Viking traverse la région source de l'émission ?

3.c En admettant que les propriétés des modes étudiées au 2. sont valables dans le cas d'un angle entre \vec{k} et \vec{B}_0 quelconque, et en considérant la gamme spectrale où sont observées principalement les ondes, identifier le mode sur lequel se propage le rayonnement kilométrique auroral.

4. Propagation dans le vent solaire

Les ondes, émises dans l'environnement proche de la planète, peuvent être observées sur place comme au 3., mais aussi à grande distance de la planète, par exemple depuis une sonde interplanétaire. Pour que cette observation soit possible il faut que l'onde puisse se propager dans le vent solaire (voir figure 3). Ici les ions ne sont plus immobiles, mais soumis à un mouvement d'ensemble. Les résultats précédents restent cependant inchangés.

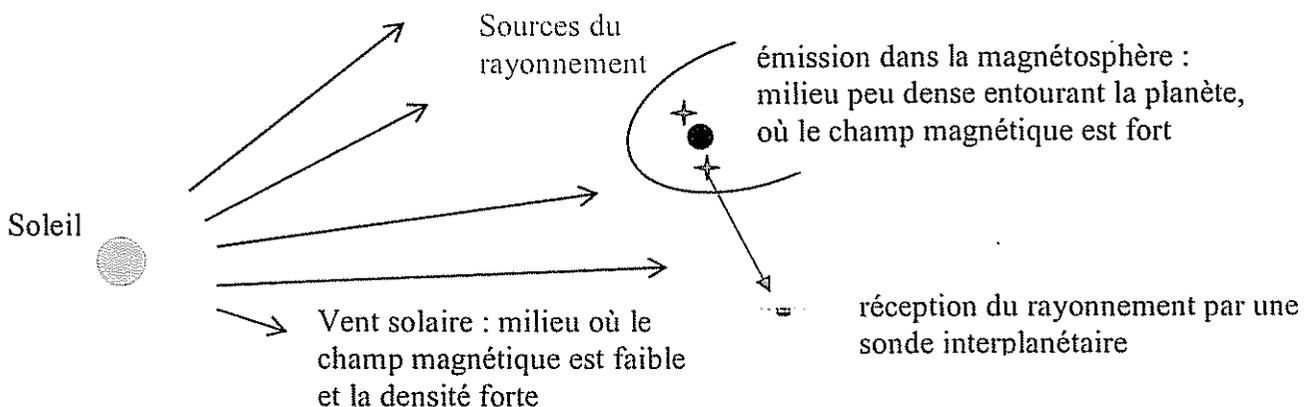


Figure 3 : Schéma des conditions d'émission et de réception des ondes. La planète est représentée en noir avec les sources d'émission au-dessus des régions polaires indiquées par des croix rouges.

4.a La densité d'électrons n_e dans le vent solaire dépend de la distance au Soleil. Supposant que la vitesse du plasma du vent solaire est radiale et de module constant, écrire l'équation de

conservation des électrons et en déduire la variation de n_e en fonction de D , où D est la distance planète-Soleil en unité astronomique (UA).

4.b Le champ magnétique dans le vent solaire est proportionnel à $\frac{1}{D} \sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{D^2}}$, où α est une constante dont la valeur numérique est proche de 1 UA. En déduire la dépendance du rapport f_{ce}/f_{pe} en fonction de D .

4.c Sachant que la densité du vent solaire vaut $5 \cdot 10^6 \text{ m}^{-3}$ et le champ magnétique 5 nT au niveau de l'orbite de la Terre ($D = 1 \text{ UA}$), calculer le rapport f_{ce}/f_{pe} à l'orbite des quatre planètes.

4.d L'onde se propage dans le vent solaire sur le mode sur lequel elle a été émise au voisinage de la planète. Montrer, en utilisant les résultats du 2.c et du 3.c, que la fréquence de coupure de ce mode est peu différente de f_{pe} .

4.e Calculer la fréquence de coupure dans le vent solaire au voisinage de chacune des planètes. Connaissant les fréquences caractéristiques des rayonnements émis (voir I.3) quels sont ceux qui peuvent se propager dans le milieu interplanétaire et donc être observés à distance de la planète ?

5. Observation par les radiotélescopes au sol

5.a L'ionosphère terrestre est une couche ionisée dense qui entoure la Terre. Cette ionisation est produite par le rayonnement ultra-violet solaire. On donne la courbe de densité de l'atmosphère neutre ainsi que le profil de densité électronique (figure 4). Justifier qualitativement la forme de ce deuxième profil.

5.b Compte-tenu du profil de densité électronique de l'ionosphère terrestre, quelles sont les planètes dont les rayonnements sont observables au sol ? Peut-on observer le rayonnement auroral terrestre depuis le sol ?

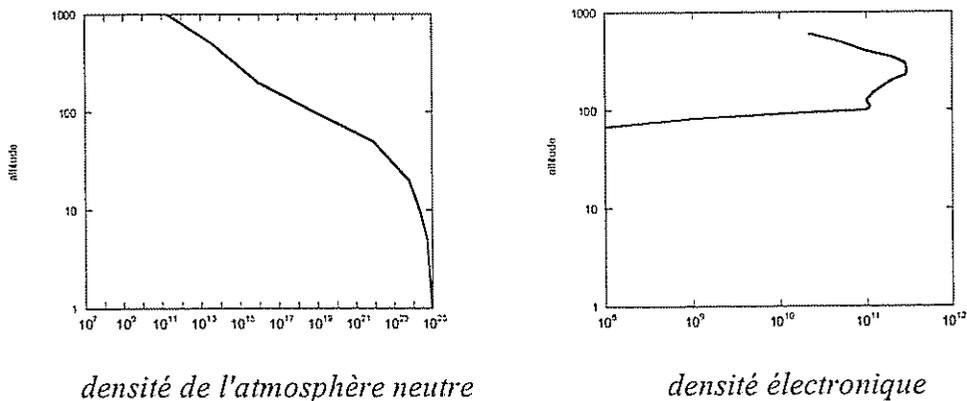


Figure 4. Échelles verticales en km, échelles horizontales en m^{-3} .

Deuxième partie Magnétohydrodynamique et physique solaire

Comme un fluide neutre peut être décrit par les équations de l'hydrodynamique, un fluide ionisé peut être décrit par ce qu'on appelle la magnétohydrodynamique (MHD), tant qu'on se limite à des phénomènes suffisamment lents. On appliquera les résultats obtenus à l'interprétation d'observations expérimentales.

1. Le cadre général de la MHD

La MHD consiste à décrire le plasma comme un fluide unique. Les équations de la dynamique de ce fluide sont établies à partir des équations fluides pour les ions et les électrons (voir Introduction). Pour résoudre complètement le système couplé champ-particules, il faut compléter par les équations de Maxwell dans le milieu dont les permittivité et perméabilité sont celles du vide.

On introduit des grandeurs caractéristiques du fluide conducteur global, électrons et ions, fonctions de la position et du temps :

densité de charge $\rho = n_i q_i + n_e q_e$

densité de courant $\vec{j} = n_i q_i \vec{v}_i + n_e q_e \vec{v}_e$

vitesse $\vec{v} = \frac{n_i m_i \vec{v}_i + n_e m_e \vec{v}_e}{n_i m_i + n_e m_e}$

pression totale $p = p_e + p_i$

On supposera pour simplifier les écritures que les ions sont des protons :

$q_i = -q_e = e$ et que $m_i = 1836 m_e = m$.

1.a La première hypothèse faite dans le cadre de la description d'un plasma par la MHD est que le courant de déplacement est négligeable dans l'équation de Maxwell-Ampère. La validité de cette hypothèse sera vérifiée plus loin. Montrer, en écrivant l'équation de conservation de la charge, que cette hypothèse entraîne la quasi-neutralité du plasma. On note alors $n = n_e = n_i$.

1.b Compte-tenu du rapport des masses électronique et ionique, simplifier l'expression de la vitesse \vec{v} .

En MHD, les électrons et les ions sont fortement couplés et leurs vitesses sont peu différentes. Dans la suite de cette section 1, on ne tiendra compte de la différence de vitesse que quand elle intervient explicitement, par $\vec{v}_e - \vec{v}_i$.

Montrer que dans ce cas $\vec{v}_i \approx \vec{v}$ et $\vec{v}_e \approx \vec{v} - \frac{\vec{j}}{ne}$.

1.c Montrer en additionnant les équations fluides que l'équation de conservation de la densité

n s'écrit : $\frac{\partial n}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (n\vec{v}) = 0$

1.d Montrer de même que l'équation de conservation de la quantité de mouvement globale s'écrit :

$$nm \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + nm(\bar{v} \cdot \nabla)(\bar{v}) = -\nabla(p) + \bar{j} \times \bar{B}$$

2. La loi d'Ohm généralisée

2.a Le terme de friction électrons-ions s'écrit $\bar{P}_{ei} = -\nu n m_e (\bar{v}_e - \bar{v}_i)$, où ν est la fréquence de collision. Justifier la forme de ce terme.

2.b Montrer que l'équation de conservation de la quantité de mouvement des électrons s'écrit :

$$\bar{E} + \bar{v} \times \bar{B} - \frac{m_e \nu}{ne^2} \bar{j} - \frac{\bar{j} \times \bar{B}}{ne} + \frac{\nabla(p_e)}{ne} + \frac{m_e}{e} \frac{d\bar{v}_e}{dt} = \bar{0}$$

2.c Expliquer l'appellation de loi d'Ohm généralisée donnée à cette équation.

2.d Hypothèse fondamentale : on se limite dans le cadre de la MHD à l'étude de problèmes dans lesquels les échelles spatiales et temporelles sont grandes par rapport à toutes les échelles caractéristiques de la dynamique individuelle des particules. Vérifier que l'approximation faite au 1.b ($|\bar{v}_i - \bar{v}_e| \ll |\bar{v}|$) est une conséquence de cette hypothèse.

Montrer que la loi d'Ohm s'écrit dans ce cas : $\bar{E} + \bar{v} \times \bar{B} = \frac{\bar{j}}{\sigma} + \frac{\bar{j} \times \bar{B}}{ne}$. Donner l'expression de la conductivité σ .

2.e Montrer que l'équation précédente permet de mettre \bar{j} sous la forme suivante :

$$\bar{j} = \sigma \bar{E}_{//} + \sigma_{\perp} (\bar{E}_{\perp} + \bar{v} \times \bar{B}) + \sigma_H \frac{\bar{B}}{B} \times (\bar{E}_{\perp} + \bar{v} \times \bar{B})$$

où les indices // et \perp caractérisent les composantes parallèle et perpendiculaire au champ magnétique. Calculer σ_{\perp} et σ_H en fonction de σ , ω_{ce} et ν .

2.f On considère le cas de la région E de l'ionosphère (vers 100 km d'altitude), caractérisée par les paramètres suivants : $n = 2.10^{11} \text{ m}^{-3}$, $B = 50\,000 \text{ nT}$, $\nu = 6.10^4 \text{ s}^{-1}$. Comparer les valeurs des trois conductivités et discuter.

2.g On appelle MHD idéale le cas où la loi d'Ohm s'écrit : $\bar{E} + \bar{v} \times \bar{B} = \bar{0}$.

Montrer que si le plasma est non collisionnel (ν tend vers 0), le plasma peut être décrit par la MHD idéale.

2.h À l'inverse quelle est la loi d'Ohm vérifiée dans un milieu fortement collisionnel ($\omega_{ce} \ll \nu$) ? On parle alors de MHD résistive.

3. Équation d'évolution du champ en MHD résistive

On considère dans cette partie le cas d'un milieu fortement collisionnel.

3.a Montrer que l'équation d'évolution du champ magnétique s'écrit :

$$\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = \nabla \times (\bar{v} \times \bar{B}) + \frac{1}{\mu_0 \sigma} \nabla^2 (\bar{B})$$

3.b Expliquer le rôle des différents termes de cette équation.

3.c On définit le nombre de Reynolds magnétique par $R_m = VL\mu_0\sigma$ où V et L sont les ordres de grandeur typiques de la vitesse et de la taille caractéristique de l'écoulement. Expliquer sa signification physique grâce à l'équation ci-dessus.

3.d On donne des ordres de grandeur de la conductivité de différents fluides conducteurs, calculer les nombres de Reynolds magnétiques correspondants en utilisant des ordres de grandeur réalistes pour les dimensions et les vitesses :

- mercure à 20°C : 10^6 Sm^{-1}
- plasma dans le caisson Jonas de l'ONERA (dimensions de l'ordre de 2 mètres) : 10^5 Sm^{-1}
- plasma de la couronne solaire calme (taille et vitesse caractéristiques des structures observées 10^8 m et 100 kms^{-1}) : $2 \cdot 10^6 \text{ Sm}^{-1}$

Est-il facile de reproduire en laboratoire les phénomènes observés dans la couronne solaire ?

3.e Résoudre l'équation d'évolution du champ magnétique pour un cas où on suppose la vitesse du plasma nulle et le champ magnétique de la forme $\vec{B}(x,t) = \vec{B}_0(t) \cos kx$. Interpréter le résultat obtenu.

4. L'onde d'Alfven

Dans un plasma magnétisé, plusieurs types d'onde peuvent se propager. Comme on l'a vu à la question 2., seules les ondes de très basse fréquence sont susceptibles d'être décrites par les équations de la MHD, l'onde d'Alfven est l'une d'elles. On l'étudie ici dans le cas du plasma froid ($p = 0$) et de la MHD idéale (cf 2.g). En l'absence de perturbation, seuls la densité et le champ magnétique sont non nuls et ils valent n_0 et \vec{B}_0 .

4.a. Écrire le système des équations MHD (au nombre de 3) et des équations de Maxwell (au nombre de 3 aussi, on omettra l'équation de Maxwell-Gauss qui peut permettre éventuellement de vérifier a posteriori l'hypothèse de quasi-neutralité). On cherche à résoudre le système pour une perturbation de faible amplitude. Il faut donc linéariser les équations : on pose pour toutes les grandeurs $u = u_0 + u_1$, où $|u_1| \ll |u_0|$. Écrire les équations reliant les grandeurs d'ordre 1 : n_1 , \vec{v}_1 , \vec{j}_1 , \vec{B}_1 et \vec{E}_1 et les grandeurs d'ordre 0 : n_0 et \vec{B}_0 .

4.b On cherche maintenant une solution sous la forme d'une onde plane monochromatique de vecteur d'onde \vec{k} et de pulsation ω ; toutes les grandeurs d'ordre 1 sont donc proportionnelles à $e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)}$. Écrire le système en fonction de \vec{k} et ω .

4.c Montrer qu'il existe une solution non triviale à ce système qui vérifie $\vec{k}\cdot\vec{v}_1 = 0$, à condition que k et ω soient liés par une relation que l'on exprimera en fonction de la vitesse d'Alfven définie par $V_A = \frac{B_0}{\sqrt{\mu_0 n_0 m}}$ et de $\cos\theta$, où θ est l'angle entre \vec{k} et \vec{B}_0 .

4.d Calculer le rapport entre le courant de déplacement et le courant porté par les ions. L'hypothèse faite au 1.a est-elle justifiée ? On s'appuiera sur les ordres de grandeur donnés dans le tableau ci-dessous.

Milieu considéré	Couronne solaire	Vent solaire
Densité électronique	10^{15} m^{-3}	10^6 m^{-3}
Champ magnétique	10^{-2} T	$5 \cdot 10^{-9} \text{ T}$

4.e Montrer que pour l'onde d'Alfven on a la relation $\bar{B}_1 = \pm K \bar{v}_1$ où K est une constante.

La résolution complète du système d'équations montre que c'est le seul mode de propagation qui vérifie cette propriété.

5. Analyse des fluctuations dans le vent solaire

La sonde Mariner a enregistré les fluctuations de vitesse et de champ magnétique dans le vent solaire (composé d'électrons et de protons). Elles sont présentées sur la figure 5 en fonction du temps, projetées dans le repère RTN où R est la direction radiale sortant du Soleil, T est dans le plan équatorial dans le sens du mouvement des planètes, N est normale aux deux autres dirigée vers le Nord solaire. La vitesse du vent solaire est radiale.

5.a Vérifier que les échelles de temps des fluctuations mesurées sont compatibles avec une modélisation par la MHD idéale.

5.b Vérifier que ces fluctuations remplissent la relation établie au 4.e pour l'onde d'Alfven.

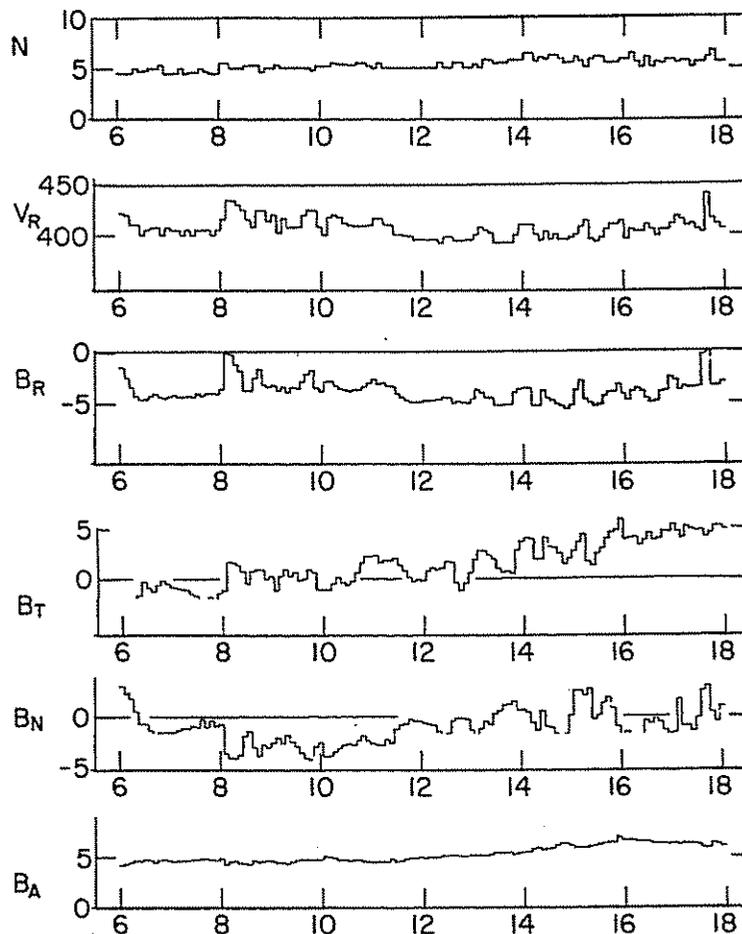


Figure 5. Tracé de la densité en cm^{-3} , de la seule composante de la vitesse mesurée en kms^{-1} et des trois composantes et du module du champ magnétique en nT enregistrés par la sonde Mariner 5 pendant une journée (l'abscisse est en heure)

5.c Discuter plus particulièrement la relation établie au 4.e. sachant que la mesure de densité est faite avec un instrument qui ne permet pas de distinguer la nature des ions et que depuis d'autres mesures ont montré que de l'hélium est présent dans le vent solaire en plus des protons qui sont majoritaires.

5.d Les fluctuations ne sont pas monochromatiques, contrairement aux calculs effectués dans la section 4. Expliquer pourquoi les propriétés établies au 4. sont quand même valables.

5.e Une étude statistique sur un nombre de cas beaucoup plus grand montre que \bar{B}_1 et \bar{v}_1 sont en phase quand le champ magnétique moyen est dirigé vers le Soleil (comme c'est le cas ici) et en opposition de phase quand il est dirigé en sens inverse. Que peut-on en déduire quant à la direction de propagation des ondes ?

6. La force magnétique volumique.

C'est le terme en $\bar{j} \times \bar{B}$ qui intervient dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement du fluide.

6.a. Montrer que cette force se met sous la forme $\bar{\nabla} \left(-\frac{B^2}{2\mu_0} \right) + \frac{1}{\mu_0} (\bar{B} \cdot \bar{\nabla}) \bar{B}$.

6.b. Tension magnétique:

On définit les vecteurs \bar{t} tangent à la ligne de champ et \bar{n} normal à la ligne de champ. Ils sont liés par $(\bar{t} \cdot \bar{\nabla}) \bar{t} = \frac{d\bar{t}}{ds} = \frac{\bar{n}}{R_c}$ où s est l'abscisse curviligne et R_c est le rayon de courbure de la

ligne de champ. Montrer que le deuxième terme de la force magnétique se met sous la forme :

$$\left[\bar{t} \cdot \bar{\nabla} \left(\frac{B^2}{2\mu_0} \right) \right] \bar{t} + \frac{B^2}{\mu_0 R_c} \bar{n}.$$

6.c Écrire l'expression complète de l'équation de conservation de la quantité de mouvement en prenant en compte la pression cinétique. Expliquer le rôle des termes en $\bar{\nabla} \left(\frac{B^2}{2\mu_0} \right)$. Comment interviennent-ils dans la dynamique du plasma ? Comment agit l'autre terme ?

6.d On considère un champ magnétique, exprimé en coordonnées cartésiennes, de la forme $\bar{B} = B_0 \begin{vmatrix} 0 \\ x/l \\ 0 \end{vmatrix}$, (où l est une constante). Contrôler que ce champ vérifie les équations de

Maxwell. Établir l'équation des lignes de champ et les tracer dans le plan (x, y) . Déterminer la densité de force magnétique dans cette configuration et tracer les forces sur le schéma.

6.e Mêmes questions pour un "point en X", caractérisé par un champ, exprimé en coordonnées

cartésiennes, de la forme $\bar{B} = B_0 \begin{vmatrix} y/l \\ x/l \\ 0 \end{vmatrix}$.

6.f Comparer la stabilité des deux situations étudiées en 6.d et 6.e. Comment la pression cinétique du plasma peut-elle intervenir pour maintenir les lignes de champ à l'équilibre ?

7. Tache solaire

On considère une tache solaire comme celle présentée sur la figure 6. Elle apparaît comme une zone sombre sur la photosphère, ce qui signifie que c'est une région froide. La température dans la tache est d'environ 4500 K, alors que celle de la photosphère voisine est d'environ 6000K. Les taches solaires sont des régions particulièrement stables qu'on peut décrire par la MHD idéale.

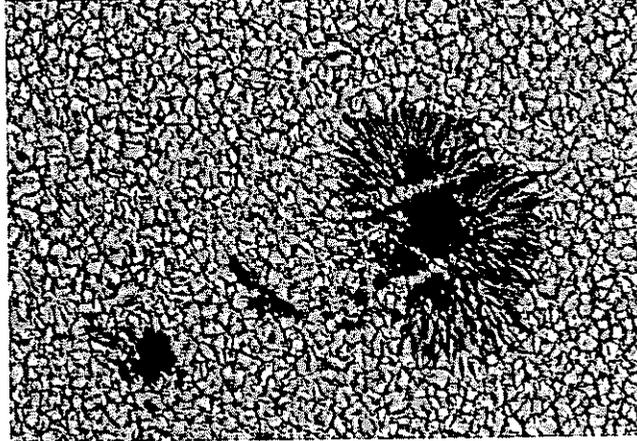


Figure 6. Image NASA

7.a Résoudre l'équation de conservation de la quantité de mouvement en régime stationnaire et en présence d'un champ magnétique vertical, perpendiculaire à la surface de la photosphère. On suppose qu'il n'y a pas de mouvement de convection.

7.b Montrer que la stabilité de la tache peut s'expliquer par la présence d'un champ magnétique fort dans la tache alors qu'il est négligeable dans la photosphère voisine. On supposera que pression et température sont reliées par $p = nk_B T$.

7.c Estimer la valeur du champ magnétique dans la tache, en prenant pour la densité du plasma 10^{24} m^{-3} .

8. La MHD idéale et ses limites

8.a. Le gel du champ dans le plasma.

Cette question établit une des propriétés majeures de la MHD idéale qui est le fait qu'une ligne de champ magnétique transporte avec elle le fluide dans ses déplacements et réciproquement : le champ est « gelé » dans le fluide.

Pour le démontrer, considérons une ligne de champ magnétique donnée à l'instant t et deux éléments du fluide qui sont au même instant sur cette ligne de champ ; ils sont reliés par un vecteur $\delta\vec{L}$. Le vecteur $\vec{C}(t) = \delta\vec{L} \times \vec{B}$ est donc nul. Montrer qu'au temps $t + dt$ le vecteur $\vec{C}(t + dt) = \vec{0}$.

En déduire que le fluide et le champ se déplacent ensemble.

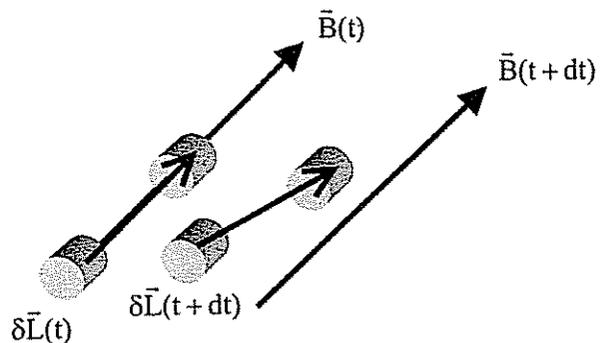


Figure 7

8.b La reconnexion : en MHD idéale, deux particules fluides reliées par une ligne de champ restent donc sur la même ligne de champ au cours du temps. Une ligne de champ, qui est maintenant une ligne matérielle, ne peut donc être coupée pour être "reconnectée". Une reconfiguration comme celle décrite par le schéma de la figure 8 est interdite.

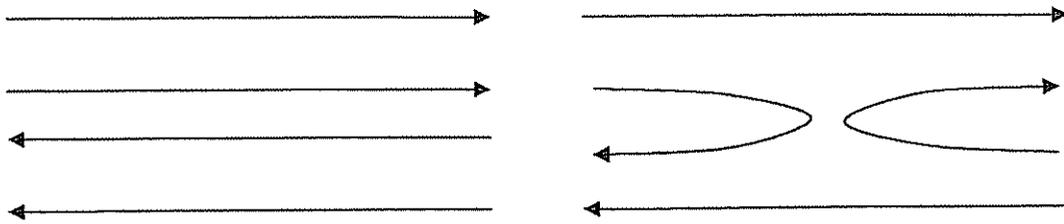


Figure 8. Configuration magnétique au temps t à gauche et au temps $t' > t$ à droite.

Dans un certain nombre de situations réelles on constate pourtant que ce phénomène a lieu et on l'appelle « reconnexion ». On étudie ici l'exemple d'une éjection de matière dans la couronne solaire (dite Éjection de Masse Coronale): la matière retenue dans la boucle magnétique fermée de la figure de gauche (figure 9) a été éjectée une heure plus tard (figure de droite). Montrer par des schémas comment la reconnexion peut expliquer cette éjection.

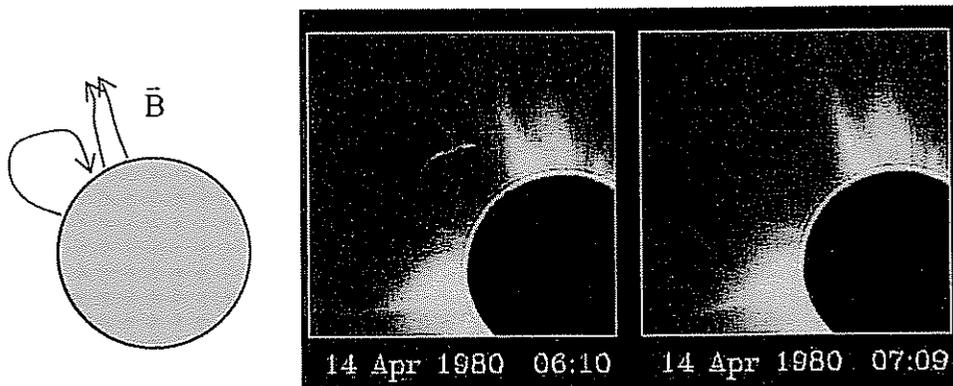


Figure 9. Images prises par un coronographe (source High Altitude Observatory) à une heure d'intervalle. Le disque noir est le disque occulteur qui cache le Soleil. La lumière est émise par les particules qui sont piégées sur les lignes de champ, elle permet donc de visualiser les lignes de champ (le schéma de gauche montre comment interpréter la figure de gauche).

Proposer des raisons possibles de la rupture de la MHD idéale qui permettent cette reconnexion.

9. Champ magnétique dans le vent solaire

Le vent solaire est un plasma dont la vitesse est radiale à partir du Soleil dès qu'on s'éloigne suffisamment de la surface. Le champ magnétique est gelé dans le plasma (MHD idéale).

On écrit l'équation différentielle d'évolution du champ magnétique \vec{B} en fonction de la vitesse \vec{v} (voir 3.a) en régime stationnaire et dans le cadre de la MHD idéale.

9.a Pour résoudre cette équation on se place en coordonnées sphériques (r, θ, φ) et on fait les hypothèses restrictives supplémentaires :

On limite l'étude au plan équatorial, et on suppose que la vitesse et le champ magnétique n'ont que deux composantes, radiale (v_r, B_r) et azimutale (v_φ, B_φ) et qu'il y a une symétrie de rotation autour de l'axe de rotation du Soleil. Exprimer la relation algébrique qui relie $v_r, v_\varphi, B_r,$ et B_φ

9.b Pour déterminer la constante d'intégration, on utilise les conditions aux limites

- *très près du Soleil (photosphère)*, on suppose que la vitesse radiale tend vers 0 et que la vitesse azimutale est due à la rotation du Soleil ($v_{\varphi 0} = \Omega R$, où R est le rayon du soleil et Ω sa vitesse de rotation) qui entraîne le plasma et les pieds des lignes de champ magnétique. Ces lignes de champ sont à peu près radiales et on note $B_0 = B_{r0} \gg B_{\varphi 0}$.

- *à grande distance*, la vitesse est purement radiale.

Calculer $B_{\varphi}(r)$ à grande distance.

9.c Utiliser les équations de Maxwell pour calculer l'autre composante du champ.

9.d Calculer le rapport $B_r(r)/B_{\varphi}(r)$. On suppose la vitesse radiale constante, ce qui est vrai à grande distance du Soleil. En déduire l'équation des lignes de champ magnétique dans le vent solaire et la forme de ces lignes. (On rappelle que l'étude est menée dans le plan équatorial).

9.e Calculer l'angle entre la ligne de champ magnétique et la direction radiale à l'orbite de la terre, sachant que le champ mesuré à cette distance est de l'ordre de 5 nT.

Données : la période de rotation du Soleil (dans le plan équatorial) est de 25 jours, la vitesse moyenne du vent solaire est de 400 kms^{-1} , la distance Terre-Soleil $r = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ et le rayon du Soleil $R = 7 \cdot 10^8 \text{ m}$.

9.f Calculer le champ magnétique moyen au niveau de la photosphère, B_0 . Comparer à la valeur obtenue dans une tache solaire (voir 7.c).

10. Rapport relatif au problème de physique

L'objectif de ce problème est de faire découvrir un certain nombre d'aspects de la physique des plasmas qui existent dans le Système Solaire et qui sont ici étudiés d'un point de vue physique et d'un point de vue astrophysique.

La physique des plasmas est généralement mal connue. L'essentiel des éléments nécessaires est donc donné dans l'énoncé pour permettre aux candidats d'aborder la propagation des ondes dans ces milieux et les bases de la magnéto-hydrodynamique. Les questions cherchent à s'appuyer au maximum sur les connaissances de physique de base (électromagnétisme, hydrodynamique, ...). De nombreuses applications sont proposées pour montrer des exemples concrets de ces phénomènes dans l'environnement spatial proche de la Terre et illustrées par de nombreuses applications numériques dont le but est d'obliger les candidats à prendre la mesure réelle du problème étudié.

Le sixième des points environ est attribué aux questions portant sur ces applications numériques et leur interprétation. Le jury regrette que beaucoup de copies ne comportent aucune réponse à ces questions qui sont autant de jalons pour fixer les idées sur les questions théoriques et qui permettent de vraiment comprendre le phénomène. Ceci est d'autant plus regrettable que les programmes actuels d'enseignement de la physique mettent fortement l'accent sur l'importance des ordres de grandeur.

Trop peu de candidats sont parvenus à une bonne compréhension du problème. Néanmoins, le jury note avec plaisir l'existence de plusieurs bonnes voire excellentes copies dans lesquelles une des deux parties au moins est bien comprise.

Remarques générales

Un certain nombre de remarques ont été faites dans le rapport de l'année dernière sur la manière de traiter le problème et de présenter les copies. Certaines de ces remarques ont été prises en compte. Peu de copies sont illisibles, mal présentées. Davantage de candidats ont l'honnêteté d'annoncer qu'ils admettent les résultats qu'ils ne savent pas démontrer.

On peut quand même regretter un certain nombre d'insuffisances de la part de candidats à un concours de recrutement d'enseignants dont on attend un comportement « exemplaire », au sens strict du terme. Ces insuffisances, parfois inquiétantes, portent sur plusieurs points : la forme, la maîtrise des outils mathématiques et les connaissances de physique de base.

Sur la forme, on peut s'inquiéter de l'absence de rigueur dans la présentation (grammaire incohérente, ...), de l'absence d'ordre dans les réponses aux questions ou de l'incohérence des réponses d'une question à l'autre. La capacité à prendre du recul et à faire la critique de ce qu'on écrit est une qualité nécessaire pour exercer le métier d'enseignant. L'honnêteté et la rigueur imposent de justifier les réponses données (Que penser de la réponse « *L'onde est polarisée rectilignement* » donnée sans aucune explication ni justification ?).

En ce qui concerne la maîtrise des outils mathématiques, même les plus simples, nécessaires à la résolution des problèmes de physique, on constate de graves lacunes. Trop peu de candidats sont capables de mener à bien une application numérique, avec un ordre de grandeur correct, un nombre

de chiffres significatifs raisonnable et une unité adéquate. Beaucoup comparent des vecteurs entre eux sans en prendre la norme. On peut s'inquiéter de ce que très peu de candidats soient capables de tracer des courbes dont l'étude est menée de manière détaillée dans l'énoncé (une question pour trouver les valeurs à l'origine, une question pour trouver les comportements asymptotiques et enfin une pour effectuer le tracé....). La linéarisation, qui est une méthode très utilisée en physique, est très souvent mal maîtrisée.

Enfin on observe des lacunes significatives dans la physique de base, lacunes surprenantes à ce niveau. Les équations de Maxwell dans le vide ne sont pas toujours écrites correctement (il s'en faut d'assez loin). Un certain nombre de confusions sont assez fréquentes : potentiel vecteur et potentiel scalaire, courant de déplacement et courant dû aux porteurs de charge, ... Des résultats complètement incohérents sont laissés dans les copies sans commentaire : conductivité négative, rapport de fréquence négatif.

Il s'avère que la manipulation des opérateurs vectoriels est loin d'être maîtrisée. Les formules utiles sont pourtant toutes données dans l'énoncé, mais elles ne sont pas utilisées par tous les candidats ! Enfin le tracé des lignes d'un champ donné par son expression analytique nécessite une méthodologie rarement maîtrisée.

Remarques sur la première partie du problème

En ce qui concerne l'introduction, l'équation locale de conservation de la quantité de matière illustre la conservation d'une grandeur extensive, la quantité de matière, même si elle fait intervenir des grandeurs intensives (et tout particulièrement le nombre de particules par unité de volume). On constate souvent une confusion à ce niveau.

Emission des ondes radio

Le mécanisme d'émission étant trop compliqué à étudier, on se contente de calculer les ordres de grandeur des fréquences des ondes émises à une altitude donnée dans un champ magnétique dipolaire. Tous les candidats sont loin de maîtriser la notion de champ créé par un dipôle magnétique (certains appliquent les formules du dipôle oscillant...). Mais, dans l'ensemble, cette première partie est plutôt bien traitée.

Propagation des modes électroniques

Le calcul demandé est relativement classique dans la physique des ondes : on cherche les solutions d'un système d'équations différentielles sous forme de petites perturbations monochromatiques. Un nombre significatif d'étudiants parvient à établir le système ; peu le résolvent. La solution étant donnée dans l'énoncé, l'étude des modes aurait pu être menée à bien, mais peu de candidats s'y risquent, ce qui limite l'interprétation des données expérimentales qui suivent.

Cette partie d'analyse de données débute par des calculs d'ordre de grandeur des fréquences caractéristiques du milieu. C'est un des exemples où l'incapacité de la plupart des candidats à calculer correctement des ordres de grandeur rend les questions suivantes inaccessibles. Le calcul de la fréquence plasma et de la gyrofréquence électronique aux deux instants donnés montre clairement que la ligne rouge tracée sur le spectrogramme n'est pas autre chose que le tracé de la gyrofréquence le long de l'orbite du satellite.

Propagation dans le vent solaire

La première question consiste à montrer que, dans un vent à symétrie sphérique dont la vitesse est constante, la densité décroît en $1/r^2$. L'équation et les opérateurs vectoriels étant donnés en introduction, cette démonstration ne doit pas présenter la moindre difficulté. Les résultats obtenus sont pourtant très divers, allant de l'exponentielle décroissante à la croissance en r^2 ... sans que des commentaires de bon sens ne soient ajoutés.

Observations par les radiotélescopes au sol

Cette partie ne fait que peu appel aux résultats précédents et peut être traitée avec un peu de bon sens et de culture. On peut s'étonner du petit nombre de candidats qui interprètent réellement les courbes fournies ou qui ont une idée du rôle que joue l'ionosphère sur la propagation des ondes radio.

Remarques sur la deuxième partie du problème

Le cadre général de la magnéto-hydrodynamique (MHD)

Les deux premières parties visent à fixer le cadre général de la MHD. Elles sont globalement plutôt bien traitées, hormis la question plus délicate sur le plan des calculs qui montre l'anisotropie des conductivités.

Applications de la MHD

La manipulation des nombres sans dimension comme le nombre de Reynolds magnétique est assez bien connue, même si leur utilisation n'est pas toujours comprise : pour reproduire un phénomène dans des conditions de dynamique comparable, il faut que l'expérience modèle ait le même nombre de Reynolds magnétique que le problème qu'elle décrit. Peu de candidats identifient le rôle des différents termes de l'équation d'évolution du champ magnétique (convection et diffusion). La plupart savent résoudre l'équation de diffusion (sans lui donner ce nom) mais interprètent l'exponentielle décroissante de manière parfois surprenante (onde stationnaire, onde progressive...).

La partie suivante a pour but d'établir les propriétés principales de l'onde de Alfvén, l'un des trois modes de propagation des ondes MHD. Peu de candidats vont au bout de la résolution et cherchent à interpréter les données. Notons que l'échelle caractéristique du plasma à laquelle il faut comparer la fréquence des signaux est la gyrofréquence des ions et non la durée d'acquisition du signal. La gyrofréquence est calculable à partir de la valeur du champ magnétique lui-même.

La partie sur la force magnétique donne lieu à des calculs théoriques souvent corrects mais à des applications très surprenantes quand il s'agit de tracer des lignes de champ. Certains candidats (rares) font un calcul juste ; mais pratiquement aucun ne parvient à un tracé correct (les droites deviennent des cercles, les hyperboles des ellipses...). Le tracé est même absent dans la plupart des cas !

Les limites de la MHD idéale.

Peu de candidats mènent à bien le calcul qui montre que le champ magnétique est gelé dans le plasma tant que la loi d'Ohm de la MHD idéale est valable. Mais quelques-uns se risquent avec succès à faire les dessins qui expliquent l'éjection de masse coronale.

On peut regretter que, surtout dans cette partie, les candidats essayent de grappiller des points par ci par là, sans lire attentivement les énoncés des questions. Du coup, ils omettent des hypothèses ou posent le calcul de manière plus compliquée que ce qui est demandé.

Conclusion

Le problème a permis de mettre en évidence des candidats qui ont une réelle culture et une bonne maîtrise de la physique et de ses outils et qui ont assez largement traité le sujet.

On peut regretter à l'autre extrême que d'autres se présentent sans préparation suffisante, ou se laissent désarmer totalement à la lecture d'un sujet nouveau et inconnu, sans même tenter de comprendre.

Les auteurs font un effort pour bien cadrer les questions posées, en donnant les précisions utiles pour que les candidats ne se perdent pas dans les calculs. Mais, trop souvent, le sujet n'est pas lu avec suffisamment d'attention. Il faut prendre le temps de réfléchir avant de répondre.

On rappelle qu'on attend des candidats à un concours de recrutement qu'ils prennent du recul par rapport aux questions posées, et de manière générale face aux difficultés rencontrées,. Il faut également qu'ils soient capables de critique vis-à-vis de leur propre travail (Trop souvent, une « erreur d'énoncé » est évoquée pour justifier un calcul manifestement faux).

11. DÉROULEMENT DES ÉPREUVES ORALES

SESSION 2007

Conditions matérielles et généralités

Les épreuves définitives (pratiques et orales) se sont déroulées au Lycée Marcelin Berthelot de Saint Maur du 21 juin au 18 juillet 2007.

Le jury a délibéré immédiatement après la fin des épreuves. Les résultats ont été proclamés le 19 juillet, et le jury a reçu aussitôt les candidats qui le désiraient, afin de commenter leurs épreuves.

Les candidats admissibles à l'agrégation de physique reçoivent une convocation pour une série d'oral, comportant trois épreuves.

La série commence par un tirage au sort le premier jour. Chaque candidat tire 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 qui commencent dès le lendemain du tirage au sort. A la session 2006, les horaires ont été les suivants :

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

Il convient de remarquer que les transports en commun ne fonctionnent qu'à partir de 5h30.

Une épreuve se déroule de la façon suivante :

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

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

Les épreuves sont publiques.

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

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

Les bibliothèques restent ouvertes aux candidats tous les soirs à partir de 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. Ils sont récupérés le jour de la proclamation des résultats.

Les équipes techniques

A chacune des trois épreuves orales, le candidat est accueilli par une équipe technique constituée de techniciens et de professeurs préparateurs.

L'équipe technique offre aide ou assistance. Elle n'intervient ni dans le choix des expériences qui est de la seule responsabilité du candidat ni dans l'interprétation des résultats obtenus par celui-ci.

➤ **Les techniciens** restent à la disposition du candidat tout au long de l'épreuve pour lui fournir les livres et les appareils dont il a besoin. Ils apportent les indications nécessaires au bon fonctionnement du matériel (sécurité notamment) et participent à la mise en œuvre de celui-ci en effectuant les branchements nécessaires.

Les appareils sont accompagnés d'une notice que le candidat peut consulter.

Les techniciens assistent celui-ci dans la prise en main du matériel, en particulier, dans celle des appareils dont la diffusion est récente (spectromètres dits « de poche » ou « USB », flexcam, webcam, vidéo-projecteurs, ...) et dans celle des outils informatiques ou numériques. Il est vrai qu'une connaissance minimale de ces derniers est indispensable au candidat. Tous ces outils, qui sont une aide très appréciable pour les expériences, sont en effet d'une utilisation aisée. Néanmoins, il est possible qu'un candidat soit dérouté par un matériel précis auquel il est peu habitué et les techniciens le font alors bénéficier de leur savoir-faire.

Pour les leçons de physique ou de chimie, les techniciens fournissent au candidat une aide sur sa demande et en respectant ses indications. Ils aident à la réalisation des expériences de cours que les candidats ont prévues pour illustrer leur propos.

La situation est différente au montage où il s'agit d'une assistance. En effet, le candidat, qui est évalué notamment sur son habileté expérimentale et ses capacités à effectuer des mesures, doit réaliser lui-même les expériences. Les techniciens l'assistent dans la mise en œuvre des protocoles expérimentaux en particulier lorsqu'il s'agit d'effectuer des mesures répétitives.

➤ **Les professeurs préparateurs** ont pour mission de coordonner les travaux de l'équipe technique dans la préparation de chacune des trois épreuves. Leur rôle est également de

veiller au bon fonctionnement des appareils durant la préparation. Ils peuvent proposer du matériel spécifique et, plus généralement, des solutions aux problèmes que les candidats peuvent rencontrer.

➤ **Les équipes techniques** (techniciens et professeurs préparateurs) n'ont pas de contact avec le jury. Celui-ci ignore les conditions dans lesquelles se sont déroulées les quatre heures de préparation.

12-a LEÇONS DE PHYSIQUE 2007

Les leçons sont à traiter au niveau des classes préparatoires scientifiques ou au niveau de la licence de physique. Dans ce dernier cas, il convient de se placer dans la mesure du possible au niveau des deux premières années de licence (niveaux L1 et L2).

1. Contact entre deux solides. Frottement de glissement. Applications au glissement et au roulement.
2. Caractère non galiléen du référentiel terrestre. Conséquences.
3. Mouvement d'un solide autour d'un axe fixe. Equilibrage statique et dynamique. Exemples.
4. Approximation gyroscopique. Effets dans les domaines macroscopique et microscopique.
5. Utilisation des lois de conservation dans le problème à deux corps. Applications.
6. Principes de la cinématique relativiste. Durée propre. Longueur propre.
7. Collisions en relativité restreinte : application à l'étude des particules élémentaires.
8. Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique indépendant du temps. Applications.
9. Notion de viscosité d'un fluide. Ecoulements visqueux. Nombre de Reynolds. Exemples simples.
10. Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide; validité. Relation de Bernoulli ; limites et applications.
11. Equations de bilan en mécanique des fluides : exemples et applications.
12. Modèle du gaz parfait.
13. Etat d'équilibre thermodynamique. Fonctions d'état. Identités thermodynamiques. Applications.
14. Evolution et condition d'équilibre d'un système thermodynamique fermé. Potentiels thermodynamiques.
15. Thermodynamique des phénomènes irréversibles.
16. Application des deux premiers principes de la thermodynamique au fonctionnement des machines thermiques.
17. Etude thermodynamique d'un système constitué par un corps pur sous plusieurs phases. Exemples.
18. Notion d'état microscopique. Interprétation statistique de l'entropie. Exemples.
19. Modèle de l'atmosphère terrestre en équilibre isotherme. Introduction au facteur de Boltzmann. Applications.
20. Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir. Applications.
21. Etude d'un phénomène de transport : conduction thermique ou diffusion de particules. Applications.
22. Conversion de puissance électromécanique. Exemples et applications.
23. Induction électromagnétique : circuit mobile dans un champ magnétique permanent, circuit fixe dans un champ variable. Applications.
24. Systèmes bouclés. Applications.
25. Traitement d'un signal électrique. Etude spectrale. Filtrage linéaire. Exemples et applications.
26. Exemples de phénomènes de propagation unidimensionnels. Ondes progressives, ondes stationnaires. Aspects énergétiques.
27. Ondes sonores dans les fluides.
28. Propagation dans un milieu dispersif : vitesse de phase, vitesse de groupe. Paquets d'ondes planes et évolution. Exemples.
29. Dispersion et absorption d'une onde électromagnétique plane dans un milieu diélectrique. Modélisations microscopiques.

30. Comportement d'une onde électromagnétique monochromatique plane à l'interface de deux milieux diélectriques. Applications.
31. Réflexion des ondes électromagnétiques planes à la surface d'un milieu conducteur dans le cas d'une incidence normale. Effet de peau.
32. Propriétés et applications du rayonnement dipolaire électrique.
33. Notion de rayon lumineux. Principe de Fermat. Conséquences et applications.
34. Application des lois de l'optique à l'étude d'un instrument d'optique au choix (lunette astronomique, télescope, appareil photographique, microscope...).
35. Obtention d'interférences à deux ondes en optique. Notion de cohérence.
36. Interféromètres à division d'amplitude. Applications.
37. Diffraction de Fraunhofer. Applications.
38. Diffraction par des structures périodiques dans différents domaines spectraux.
39. Le photon : la particule et ses interactions avec la matière.
40. Absorption, émission spontanée ou induite du rayonnement. Coefficients d'Einstein. Applications.
41. Dualité onde-corpuscule : Relation de de Broglie. Inégalités d'Heisenberg. Applications.
42. Puits de potentiel : exemples et applications en physique quantique.
43. Confinement de l'électron et quantification de l'énergie dans les atomes.
44. Effet tunnel. Applications.
45. Le noyau : stabilité, énergie.
46. Oscillateurs à deux degrés de liberté en mécanique classique : modes propres. Systèmes à deux niveaux d'énergie en physique quantique. Analogies et différences.
47. Cohésion de la molécule et des solides. Aspects énergétiques.
48. Chaîne linéaire infinie d'oscillateurs harmoniques. Approximation des milieux continus. Aspects énergétiques.
49. Capacités thermiques : description , interprétations microscopiques.
50. Paramagnétisme, ferromagnétisme. Approximation du champ moyen.
51. Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques. Applications.
52. Mécanismes de la conduction électrique. Loi d'Ohm. Effet Hall. Applications.
53. Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique.
54. Exemples d'effets de non linéarité sur le comportement d'un oscillateur.

12-b LEÇONS DE CHIMIE 2007

1. Solutions électrolytiques ; mise en solution d'espèces ioniques ou moléculaires. (1^{ère} scientifique)
2. La conductimétrie : conductivité d'une solution ionique et application à la détermination de concentrations (dosage volumétrique exclu). (1^{ère} scientifique)
3. Dosages directs par réactions acido-basiques et d'oxydoréduction. (1^{ère} scientifique)
4. Le squelette carboné des hydrocarbures : relations structures - propriétés physiques, modification du squelette carboné. (nomenclature exclue). (1^{ère} scientifique)
5. Les grandes familles de réactions en chimie organique illustrées sur l'exemple des alcools. (1^{ère} scientifique)
6. Etude de l'eau de Javel : obtention, propriétés, dosage. (Terminale Sciences Médico-Sociales)
7. Principe et applications de la spectrophotométrie. (Terminale scientifique et Terminale scientifique – Spécialité)
8. Constante d'acidité ; applications. (Terminale scientifique)
9. Indicateurs colorés acido-basiques : étude, choix pour un dosage acide-base. (Terminale scientifique)
10. Cinétique de réaction (catalyse exclue). (Terminale scientifique)
11. Catalyse et catalyseurs ; applications. (Terminale scientifique)
12. Estérification et hydrolyse des esters. (Terminale scientifique)
13. Saponification des esters. Les savons : préparation à partir des triglycérides, mode d'action. (Terminale scientifique)
14. L'aspirine : synthèse, dosage, formulations. (Terminale scientifique et Terminale scientifique – Spécialité)
15. Piles : mise en jeu de transformations chimiques spontanées. (Terminale scientifique)
16. Électrolyses et accumulateurs : mise en jeu de transformations chimiques forcées. (Terminale scientifique)
17. Étude qualitative et quantitative des espèces acido-basiques dans les liquides alimentaires et ménagers. (Terminale scientifique – Spécialité)
18. Contrôle de qualité de l'eau. (Terminale scientifique – Spécialité)
19. Contrôle de qualité du vin. (Terminale scientifique – Spécialité)
20. Colorants : extraction, synthèse, identification. (Terminale scientifique – Spécialité)
21. Arômes et conservateurs : extraction, synthèse, dosage. (Terminale scientifique – Spécialité)
22. Dosages indirects. (Terminale scientifique et Terminale scientifique – Spécialité)
23. Étude expérimentale du caractère évolutif des propriétés physico-chimiques dans la classification périodique. (MPSI-PTSI)
24. Structure électronique et géométrie des molécules ; illustrations expérimentales des relations structure - propriétés. (MPSI-PTSI)
25. Cristaux métalliques. (MPSI-PTSI)

26. Enthalpie de réaction : mesure et applications. (MPSI-PTSI)
27. Illustrations expérimentales et applications des réactions de complexation. (MPSI-PTSI)
28. Principe et illustrations des dosages par précipitation. (MPSI-PTSI)
29. Principe et illustrations des dosages redox par potentiométrie. (MPSI-PTSI)
30. Cinétique homogène : étude expérimentale et mécanismes réactionnels. (MPSI-PTSI)
31. Illustrations expérimentales et applications des lois de déplacement des équilibres. (MP-PSI-PT)
32. Mélanges binaires : équilibres liquide-vapeur ; applications (liquides non miscibles exclus). (MP)
33. Lecture et utilisation des diagrammes d'Ellingham ; application à la pyrométallurgie. (MP-PSI)
34. Hydrométallurgie du zinc. (PSI)
35. Applications des diagrammes potentiel-pH (construction exclue). (PSI)
36. Applications des courbes intensité-potentiel. (PSI)
37. Corrosion humide du fer. Protection du fer par le zinc. (PSI)
38. Exemples de mécanismes en chimie organique : additions électrophiles sur la double liaison carbone - carbone. (PSI)
39. Conformations et configurations ; illustrations expérimentales (PSI)

12-c MONTAGES 2007

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

13. Rapport relatif à la leçon de physique

Déroulement de l'épreuve

La leçon de physique consiste à exposer en 50 minutes et devant un jury un thème tiré au sort dans une liste figurant dans le rapport de l'année précédente. Le candidat dispose de quatre heures pour préparer sa leçon. Pour cela, il a accès à une bibliothèque où sont regroupés des ouvrages scientifiques (allant des manuels scolaires classiques aux ouvrages les plus spécialisés). Le candidat a d'ailleurs intérêt à ne pas se perdre dans une multitude de documents mais à sélectionner quelques ouvrages connus, pertinents et bien choisis. Des membres du personnel technique sont présents pour mettre à sa disposition le matériel nécessaire qui doit permettre de réaliser éventuellement une ou plusieurs démonstrations expérimentales destinées à étayer sa présentation orale. Le technicien est absent lors de l'exposé et les expériences sont présentées sous la seule responsabilité du candidat. L'exposé est suivi d'un entretien de 25 minutes environ avec les membres du jury. Les questions posées lors de cette séance visent à faire préciser un ou plusieurs points qui n'étaient pas apparus clairs lors de l'exposé et à évaluer la solidité des connaissances du candidat sur ce qui a été traité.

Il convient de rappeler que les candidats ont dans la mémoire de l'ordinateur mis à leur disposition un ensemble de documents vidéo-projetables (diapositives ou petites animations) qu'ils peuvent utiliser pour illustrer leur exposé. Il est rappelé que le vidéo-projecteur fourni est muni d'un dispositif d'agrandissement.

Le jury a eu le plaisir d'assister à de très bonnes leçons présentées avec un enthousiasme communicatif et dont le contenu scientifique était exempt de tout reproche.

Il est un peu inévitable qu'il n'en soit pas toujours ainsi. L'objet du présent rapport, comme ceux des années précédentes qui pourront être consultés avec profit, est évidemment de donner des conseils utiles aux candidats.

Remarques concernant l'exposé de la leçon

La leçon n'est ni un séminaire spécialisé ni une causerie de salon. Bien qu'elle s'adresse au jury, elle doit rester compréhensible par le public d'étudiants qu'elle vise potentiellement. Le candidat est jugé sur sa capacité à transmettre un message clair et précis. Il lui est demandé de montrer, par une présentation dynamique, tout l'intérêt du sujet qu'il expose.

La présentation des pré-requis doit être rapide. Il s'agit simplement de situer la leçon dans une progression cohérente et de rappeler les notions importantes utiles dans l'exposé et vues précédemment.

Les thèmes abordés doivent être traités en profondeur et les applications importantes présentées, même si cela n'est pas explicitement indiqué dans le titre de la leçon. Lors de la préparation, le candidat doit s'interroger sur la nature du message et les idées essentielles qui ressortiront de sa leçon. Cela lui permet de structurer son exposé de manière convaincante. Si une présentation historique est adoptée, tout anachronisme doit être évité. Les titres de leçon sont suffisamment larges pour laisser au candidat une grande latitude sur la manière de traiter le sujet. Le hors sujet n'est cependant pas acceptable, et ne peut évidemment pas correspondre à une stratégie pour contourner le sujet demandé.

La précision du vocabulaire et de l'expression scientifique est essentielle. On apportera une attention particulière aux notations, aux orientations et aux signes. La maîtrise des outils mathématiques utilisés couramment en physique est essentielle.

Le candidat doit être conscient des approximations faites et connaître les conditions de validité des lois énoncées. Il ne doit pas se contenter de lire ses notes et de les recopier au tableau. Cette attitude est éventuellement tolérée pour de courts passages de la leçon (ou des détails difficiles à mémoriser). Il est interdit de lire des livres devant le jury ou de les recopier au tableau.

Des schémas clairs, visibles et lisibles permettent d'expliquer et d'illustrer la leçon et d'aider à sa compréhension.

Il est admis que le candidat saute le détail de longs calculs fastidieux et ne donne que le résultat final après avoir bien posé le problème et précisé les approximations faites. S'il l'estime nécessaire, le jury peut demander des précisions sur les étapes intermédiaires. D'une manière générale, toutes les grandeurs mises en jeu doivent être définies avec soin.

Il est déconseillé de présenter des documents (exemple d'application, schéma, expérience...) que l'on ne sait pas commenter, ou interpréter. Il est indispensable que le candidat vérifie l'adéquation des notations utilisées sur les documents qu'il présente, avec celles qu'il a adoptées durant son exposé.

Le jury apprécie toujours que la leçon soit illustrée par des expériences. Il ne s'agit pas de faire des mesures précises comme en montage mais de présenter des phénomènes physiques et de faire apparaître leur intérêt pour la compréhension du sujet de la leçon. La présentation de ces expériences doit être de durée limitée. Le candidat peut en outre s'aider d'une flexcam qui lui permet d'obtenir une image agrandie d'une expérience de petites dimensions. Pour les leçons d'optique, il ne faut pas oublier de rallumer la salle après la présentation de l'expérience.

Il est rappelé que les leçons ne sont pas cloisonnées, et que la numérotation ne fixe ni les pré-requis ni les notions pouvant être abordées. Le candidat doit assumer ses choix pédagogiques et de contenu.

La liste 2008 des leçons de physique comporte quelques modifications de détail sur certains titres, une leçon nouvelle portant sur la propagation guidée (n°29), et une refonte des leçons de mécanique quantique, de manière à rapprocher les sujets proposés de l'enseignement actuel de la discipline, tout en évitant la dérive vers un excès de formalisme. Un agrégé de physique doit avoir une bonne connaissance des phénomènes spécifiquement quantiques, comme les aspects ondulatoires et corpusculaires des phénomènes, le caractère statistique des mesures, la perturbation inévitable qu'ils apportent au système, etc.. Il doit connaître des expériences (réelles ou de pensée) qui illustrent ces phénomènes, doit maîtriser le formalisme de la fonction d'onde d'une particule et avoir quelques notions sur le formalisme des bras et les kets.

Remarques particulières sur quelques leçons *(la numérotation des leçons correspond à la liste des leçons 2008)*

Leçon 1 : L'approche énergétique du contact doit être développée. Le roulement est trop rarement abordé.

Leçon 2 : Comme dans toute leçon de mécanique, il est primordial de définir correctement les référentiels. Les définitions de pesanteur et de verticale sont souvent confuses. Il est essentiel d'estimer les ordres de grandeur des différents termes.

Leçon 3 : Ici encore la définition correcte des référentiels est primordiale. L'équilibrage ne figure plus dans les programmes des classes préparatoires, ce qui ne facilite pas la tâche des candidats qui doivent aborder ce sujet avec soin. Les notions de matrice d'inertie et d'axes principaux d'inertie doivent être connues et correctement utilisées. Les applications doivent être largement abordées.

Leçon 4 : Une illustration expérimentale aide à faire passer le message de cette leçon. Il faut prévoir assez de temps pour traiter le domaine microscopique. Le lien avec l'approche quantique peut être évoqué en évitant de « sombrer » dans le détail des calculs.

Leçon 5 : L'introduction de la particule fictive ne se fait pas au hasard ! Il faut montrer l'équivalence du problème réel avec ce modèle.

Leçon 6 : Les principes de la relativité restreinte doivent être énoncés de manière complète et précise. Les notions de durée ou de longueur propres ne prennent tout leur sens qu'en envisageant les phénomènes de contraction et dilatation. La description d'expériences ou d'applications mettant en jeu ces notions permet de rendre le contenu de cette leçon plus concret.

Leçon 7 : L'intérêt du référentiel barycentrique n'est pas souvent bien dégagé. Les candidats sont encouragés à diversifier les exemples traités.

Leçon 8 : Les exemples de mouvement dans un champ inhomogène ne sont pas traités correctement en général. Les applications en sont pourtant très nombreuses. Le cas des particules relativistes doit être envisagé.

Leçon 10 : Il est difficile de bien dégager la physique du modèle de l'écoulement parfait et ses limites sans faire appel à la notion de viscosité. Les différences entre fluide parfait et écoulement parfait et entre fluide incompressible et écoulement incompressible sont parfois méconnues. L'approche énergétique de la relation de Bernoulli est souvent ignorée.

Leçon 11 : L'objet essentiel est de faire des bilans macroscopiques et non locaux. Dans la liste 2008, le titre de la leçon correspondante est modifié pour attirer l'attention des candidats sur ce point.

Leçon 13 : La confusion est fréquente entre la fonction d'état exprimée en fonction des variables naturelles (objet de la leçon) et le potentiel thermodynamique. Cette leçon est centrée sur l'équilibre thermodynamique et sur la manière d'obtenir toute l'information sur un système parvenu dans cet état.

Leçon 14 : Il faut bien distinguer les paramètres extérieurs dont la valeur fixée détermine le potentiel thermodynamique adapté à la recherche de l'équilibre et les variables internes dont les variations permettent au système d'atteindre l'équilibre.

Leçon 16 : Les candidats ne peuvent se contenter de traiter le fonctionnement de machines « théoriques », mais doivent développer un exemple de machine réelle.

Leçon 17 : Il s'agit bien d'une étude thermodynamique fondée sur l'utilisation des potentiels thermodynamiques, et non d'une étude descriptive des changements d'état. Il importe de comprendre l'intérêt de l'enthalpie libre pour cette leçon.

Leçon 19 : Les conditions d'utilisation du facteur de Boltzmann doivent être précisées. L'atmosphère en équilibre isotherme est un exemple parmi d'autres permettant d'introduire le facteur de Boltzmann. Il n'est pas le seul et le jury souhaite laisser davantage de liberté aux candidats. Dans la liste 2008, le titre de la leçon correspondante est modifié dans ce sens.

Leçon 21 : L'aspect microscopique doit être abordé.

Leçons 22 : Cette leçon nécessite une bonne connaissance des machines présentées.

Leçon 23 : Il faut poser des conventions précises et s'y tenir tout au long de la leçon.

Leçon 24 : Il y a souvent confusion entre système bouclé et contre réaction. La stabilité des systèmes bouclés est mal comprise. Le bouclage ne se limite pas uniquement pas à une fonction d'asservissement. Le lien entre les réponses temporelle et fréquentielle est un aspect important.

Leçon 25 : La fonction de transfert doit être correctement définie. Le lien entre les réponses temporelle et fréquentielle est un aspect important. Les seuls signaux envisagés sont analogiques et la conversation analogique/numérique est exclue. Cela est clairement précisé dans le libellé 2008.

Leçon 26 : Les notions d'impédance sont rarement maîtrisées. Un phénomène de propagation unidimensionnelle peut éventuellement être dispersif.

Leçon 27 : L'aspect énergétique est trop souvent négligé. On remarquera que les ondes sonores ne sont pas toutes planes progressives et harmoniques.

Leçon 28 : Les candidats ont à leur disposition une petite animation qui permet d'illustrer les notions délicates que sont la vitesse de phase et la vitesse de groupe.

Leçon 29 : Il s'agit d'une nouvelle leçon consacrée à la propagation guidée des ondes et à ses applications, importantes dans le domaine des télécommunications par exemple.

Leçon 33 : Le calcul des champs rayonnés doit être présenté de manière synthétique, en dégagant clairement les approximations successives nécessaires. La discussion des relations obtenues et la présentation d'applications sont essentielles.

Leçon 38 : Le principe de Huygens Fresnel doit être exposé clairement, sans débordements mathématiques excessifs. Il faut expliquer pourquoi la diffraction de Fraunhofer est pertinente dans la formation des images.

Leçon 39 : Le jury souhaite que la diffraction d'ondes autres que les ondes électromagnétiques soit envisagée. C'est pourquoi l'intitulé 2008 précise « dans différents domaines de la physique ».

Leçon 41 : Cette partie importante de la physique quantique est mal couverte par les manuels usuels. Le photon a une énergie, une quantité de mouvement, mais aussi un moment cinétique. Les illustrations ne se limitent pas à l'effet photo-électrique et à l'effet Compton, et les récents développements de la physique quantique constituent une mine d'illustrations pour cette leçon : ralentissement d'atomes par la lumière, interférences avec des photons uniques, comportement de la lumière sur une lame semi-réfléchissante...

Leçon 42 : Cette leçon, qui correspond aux cours introductifs de mécanique quantique de la plupart des manuels, doit permettre d'introduire la longueur d'onde associée à une particule, l'aspect probabiliste des phénomènes quantiques, les observables position et quantité de mouvement, l'inégalité de Heisenberg et l'équation de Schrödinger.

Leçon 43 : Le but de cette nouvelle leçon est d'illustrer par des exemples basés sur des expériences de pensée et si possible sur des expériences réelles, en quoi les phénomènes quantiques diffèrent des phénomènes décrits par la physique classique. Il ne s'agit pas de faire un catalogue d'expériences, mais de donner des idées de base sur la physique quantique tout en évitant autant que faire se peut d'aborder son formalisme mathématique. Le choix est très vaste, et dépend de la « culture quantique » des candidats. Il n'est pas non plus envisageable d'être exhaustif sur ce sujet dans le temps limité d'une leçon d'agrégation. Le candidat pourra aborder :

- la dualité onde-corpuscule : interférences de matière, quantification de l'énergie, effet tunnel ...
- l'aspect probabiliste des phénomènes : interférence en lumière très faible ou avec des photons uniques, « sauts quantiques » dans les atomes excités ou les noyaux radioactifs, réflexion et transmission de photons sur une lame semi-réfléchissante...
- la « complémentarité » : mesures simultanées de position et de quantité de mouvement, illustrations de l'inégalité de Heisenberg ...
- la mesure en physique quantique : expérience de Stern et Gerlach, exemples de perturbation du système par la mesure, réduction du paquet d'onde, mesures successives.
- les corrélations quantiques entre mesures : états intriqués ...

Leçon 44 : Il s'agit du regroupement des leçons 42 et 43 de la liste de 2007 : « Puits de potentiel : exemples et applications en physique quantique » et « confinement de l'électron et quantification de l'énergie dans les atomes ». La quantification des niveaux d'énergie des atomes est évidemment un exemple important, mais pas unique. Noter que le modèle de Bohr peut être évoqué, en raison de son importance historique ou heuristique, mais qu'il n'est pas du tout un « passage obligé » pour aborder la quantification.

Leçon 45 : Il est important de justifier les relations de continuité de la fonction d'onde aux interfaces.

Leçon 46 : A l'heure actuelle, les problèmes énergétiques ont pris une telle importance qu'il paraît difficile de ne pas les évoquer. C'est pourquoi l'intitulé 2008 mentionne que les applications doivent être envisagées. Parmi elles, figure évidemment l'énergie nucléaire.

Leçon 48 : Il est conseillé pour cette leçon d'éviter de faire un catalogue, et de présenter plutôt, sur quelques exemples représentatifs, les phénomènes à l'origine de la cohésion des molécules et solides.

Leçon 49 : L'oscillateur unique, et même les deux oscillateurs couplés peuvent être considérés comme des pré-requis.

Leçon 50 : Elle ne doit pas se limiter à un long exposé de méthodes calorimétriques mais laisser une place importante aux modèles microscopiques. Les capacités thermiques sont définies à partir des dérivées partielles de l'entropie ou de l'énergie interne.

Leçon 54 : Le jury regrette que les cavités résonnantes soient rarement présentées.

Leçon 55 : Le régime forcé des oscillateurs non linéaires est également envisageable.

14. Rapport relatif à la leçon de chimie

Déroulement de l'épreuve

D'une durée totale d'un peu plus de 5 heures, l'épreuve orale de chimie s'articule en 3 temps. Après avoir pris connaissance du titre et du niveau imposé de la leçon, le candidat dispose de 4 heures de préparation. À l'issue de cette période, l'épreuve orale commence par l'exposé de la leçon pendant 50 minutes, et se poursuit, durant une vingtaine de minutes, par les questions du jury.

L'intitulé de la leçon se rapporte aux programmes des classes de première scientifique, de terminale sciences médico-sociales, de terminale scientifique (enseignement obligatoire ou de spécialité) et des classes préparatoires aux grandes écoles de première année MPSI, PTSI, et de seconde année MP, PSI et PT.

Les notes obtenues à cette épreuve s'échelonnent entre 1 et 20. Le jury a donc eu le plaisir d'assister à d'excellentes leçons au cours desquelles les candidats ont pu montrer la profondeur et l'étendue de leurs connaissances, leur maîtrise du sujet proposé, leur dextérité expérimentale tout en faisant preuve d'un dynamisme communicatif. Ces situations sont malheureusement trop rares.

Les autres et les futurs candidats sont invités à prendre en compte les présentes remarques ainsi que celles figurant dans les rapports précédents, sans oublier de consulter la liste des leçons de la session concernée sur le site internet de l'agrégation de sciences physiques option physique.

Remarques générales concernant l'épreuve

Préparation de la leçon (4 heures)

Durant la préparation de la leçon, les candidats ont accès à une bibliothèque contenant les ouvrages du secondaire et du supérieur, les « handbooks » et quelques articles et revues plus spécialisés. Par ailleurs, la salle de préparation et de présentation de la leçon est équipée d'un ordinateur où sont stockés des documents numérisés. Des transparents manuels (non fournis) peuvent également être réalisés et utilisés avec un rétroprojecteur. Il est également possible d'utiliser directement l'illustration d'un ouvrage à l'aide d'une caméra flexible reliée au système de projection.

Pour préparer leurs manipulations, les candidats peuvent bénéficier du soutien d'une équipe composée de techniciens et de professeurs préparateurs, notamment en ce qui concerne la prise en main d'un logiciel ou d'un appareillage, l'acquisition de données répétitives, ... Toutefois, le candidat doit rester le maître d'œuvre et doit pouvoir adapter les protocoles tirés d'un ouvrage aux contraintes matérielles locales. En particulier, il prendra soin de remplir d'une manière détaillée la fiche du matériel et des produits demandés. Lui incombent également la préparation et l'orchestration des expériences nécessaires au bon déroulement de la leçon ; cela lui permettra d'éviter erreurs et temps morts (comme le prélèvement d'une solution ou le remplissage d'une burette...) lors de la présentation.

Les ordinateurs disponibles dans chaque salle de préparation sont équipés de logiciels divers, en particulier de tableurs, courants ou spécialisés, qui permettent le tracé de courbes de titrage et la détermination précise de volumes équivalents.

Présentation de la leçon (50 minutes)

Les candidats disposent de 50 minutes pour exposer la leçon. Le jury les avertit au bout de 45 minutes qu'il ne leur en reste que 5. Les leçons écourtées significativement se voient sanctionnées et les candidats dépassant les cinquante minutes réglementaires seront interrompus.

Lors de l'exposé, les examinateurs prennent note de la leçon présentée et peuvent être amenés à se déplacer pour consulter la littérature utilisée ou pour analyser une réalisation expérimentale. Cela ne doit pas perturber le candidat. Par ailleurs, celui-ci doit considérer le jury comme une classe, certes avertie et apprenant très rapidement et pour laquelle il n'est pas nécessaire de justifier les choix expérimentaux faits et de vérifier les connaissances supposées sur le sujet de la leçon.

Le candidat doit révéler ses qualités pédagogiques et choisir soigneusement les termes scientifiques qu'il utilise. L'exposé de la leçon doit être construit avec rigueur et clarté et comporter des manipulations démonstratives. De plus, le dynamisme et la conviction sont des atouts indispensables à de futurs enseignants et contribuent à la qualité de la présentation. Enfin, le plan doit suivre un déroulement logique et progressif.

La construction de la leçon commence par une lecture éclairée du titre et des programmes afférents au niveau de la classe concernée. Si un lien étroit existe, le titre ne correspond toutefois que rarement à une ligne précise du programme. L'exposé doit tenir compte de cette nuance, au risque de comporter une partie hors sujet, ce qui serait sanctionné. L'introduction permet de situer la leçon dans le programme et d'envisager des applications dans la vie courante (domestiques, industrielles, ...) mais aussi de détailler les pré-requis. L'exposé doit suivre une progression logique. Les idées et résultats essentiels doivent être clairement dégagés sans être pour autant répétés. Un équilibre doit être préservé entre les différentes parties du corps de la leçon. La conclusion, souvent négligée, doit reprendre les points principaux de la leçon et élargir la problématique.

Le jury constate avec satisfaction une utilisation, souvent habile, des outils informatiques pour la projection d'expériences en petits volumes à l'aide de caméras flexibles, pour la réalisation de dosages variés, et pour la présentation de documents numérisés. *A contrario*, un exposé s'appuyant uniquement sur une présentation au vidéo-, rétroprojecteur ne permettrait pas de mettre en valeur la réactivité de l'enseignant et pourrait conduire à un rythme trop rapide de la leçon.

Les remarques suivantes concernent des points plus techniques ayant trait à l'exposé ou à la construction de la leçon.

La gestion du tableau est laissée à l'appréciation du candidat. Toutefois, l'écriture explicite de toutes les définitions au tableau n'est pas nécessaire.

Certaines leçons ayant un contenu très riche (leçons 27 et 30 par exemple), le jury recommande aux candidats de ne pas passer trop de temps sur les pré-requis et les principes sensés être vus par ailleurs, et de dégager l'essentiel sur le contenu même de la leçon.

Les termes utilisés doivent être rigoureusement choisis. Par exemple, l'expression « la fonction carbonyle » est inadaptée ; on lui préférera « groupe carbonyle ». De même, le terme « fonction » est inadapté pour décrire les insaturations d'une chaîne carbonée.

Si les étapes clés d'un calcul ou d'un raisonnement doivent être explicitées, il n'est pas nécessaire de passer du temps à détailler les calculs élémentaires.

Enfin, les leçons de spécialité en classes de terminale et les leçons comportant dans le titre « applications » ou « illustrations expérimentales » ne doivent pas se transformer en TP.

Illustrations expérimentales

Les illustrations expérimentales doivent faire partie intégrante de l'exposé essentiellement pour deux raisons. La première est que la chimie, comme la physique, est avant tout une science expérimentale ; les lois

qui régissent notre description actuelle ont trouvé leur origine dans des observations. La seconde, plus pratique que conceptuelle, tient à l'absence d'une épreuve de montage de chimie, conduisant à évaluer l'habileté expérimentale des candidats au cours de la leçon. En conséquence, les candidats qui ne présenteraient aucune manipulation se verraient sévèrement sanctionnés. D'autre part, il est maladroit de se lancer dans des développements mathématiques importants et de n'exposer une expérience que comme soutien ou vérification d'une théorie considérée comme omnipotente. De même, les présentations de manipulations comme une application en TP séparées du corps de la leçon ne sont pas judicieuses.

Si le contenu théorique de certaines leçons du secondaire peut paraître limité, la réalisation et l'interprétation soignée d'expériences démonstratives permettent aux candidats interrogés de dépasser un traitement superficiel du sujet et de s'assurer une bonne note. L'exploitation la plus complète possible de chacune des expériences réalisées au cours de la leçon est expressément requise.

Une bonne maîtrise des expériences présentées est indispensable au succès de la manipulation et au bon déroulement de la leçon. Par exemple, le choix d'une verrerie adaptée permet d'éviter le pipetage ennuyeux d'un réactif en excès et n'intervenant pas dans la détermination des quantités de matière lors d'un dosage. Dans un autre registre, les candidats sont invités à réfléchir à l'ordre dans lequel les réactifs doivent être ajoutés lors d'une réaction multi-étapes ou lors de dosages indirects. Le contrôle de paramètres pouvant influencer le développement de réactions concurrentes au sein du milieu étudié (pH, température...) est également à analyser. Cela passe notamment par une connaissance précise des réactifs utilisés, qui fait défaut à un trop grand nombre de candidats. Par exemple, les fonctions acido-basiques de l'EDTA, réactif utilisé dans la détermination pourtant très classique de la dureté de l'eau, sont méconnues. Ces connaissances permettront en outre de remplacer avantageusement la manipulation de produits toxiques, tels que le méthanol et l'hexane, par d'autres produits moins dangereux, l'éthanol et le cyclohexane par exemple. Enfin, les données ou constantes thermodynamiques afférentes aux réactions présentées sont trop souvent méconnues. L'absence de « handbook » dans la salle de préparation n'est que le reflet symptomatique de cette constatation.

Le jury souhaite en outre attirer, dans ce qui suit, l'attention des futurs candidats sur quelques utilisations maladroites ou abusives du matériel mis à leur disposition.

- La trompe à eau doit fonctionner à grand débit pour obtenir un vide raisonnable. Elle doit être débranchée pour éviter des retours d'eau lors de l'arrêt, en l'absence de fioles de gardes.
- Le bec Bunsen doit être allumé, la virole étant fermée, l'allumette placée à la base de l'orifice. La manipulation des fours suppose la présence de flacons de garde pour éviter, lors de l'arrêt de l'expérience et du refroidissement, le retour vers le siège de la réaction des solutions placées en sortie.
- L'index sur le banc Kofler ne doit pas servir à faire migrer les échantillons (souvent déposés en trop grande quantité). En outre, les candidats doivent nettoyer le banc aussitôt après son utilisation.
- De manière générale, on veillera à ne pas faire de montage, siège d'une réaction chimique, complètement clos.

Le jury apprécie que la détermination d'une grandeur quantitative soit accompagnée d'une réflexion sur les sources possibles d'erreurs liées à la mesure et d'une estimation de l'incertitude.

Pour finir, il est rappelé que le choix du support chromatographique, et notamment la présence d'indicateurs de fluorescence, est conditionné par la nature des produits à analyser.

Questions et réponses (environ 20 minutes)

Les questions posées par le jury visent à corriger les quelques erreurs qui ont pu se glisser au cours de la leçon et à préciser les concepts ou protocoles expérimentaux exposés. De plus, les connaissances des candidats sur le sujet proposé devant être évaluées, lorsqu'il s'agit des leçons du secondaire, les questions peuvent dépasser le cadre strict de l'exposé. Les réponses apportées par le candidat contribuent naturellement à son évaluation, une formulation précise, concise et claire étant appréciée par le jury.

Conclusion

La réussite de cette épreuve passe par une analyse critique du titre de la leçon et un exposé bien structuré d'un message pédagogique clair et rigoureux, illustré par des expériences démonstratives et soigneusement exploitées. De plus, les réponses aux questions doivent révéler une maîtrise conceptuelle et expérimentale des approches présentées.

Remarques particulières à quelques leçons

(Les numéros indiqués correspondent aux titres de la liste des leçons de chimie de la session 2007)

Leçon 1: La nature des interactions intra- et intermoléculaires, ainsi que les caractères dispersant et dissociant des solvants intervenant dans les processus de mise en solution méritent quelques égards au cours de l'exposé de la leçon. Les effets thermiques associés à ces processus doivent également être connus.

Leçon 2: L'utilisation et la connaissance du principe de fonctionnement des cellules de conductimétrie et des conductimètres commerciaux sont vivement souhaitées.

Leçon 3: Les dosages de solutions d'usage courant permettent de faire le lien avec les démarches de contrôle de qualité, de plus en plus courantes dans le contexte industriel.

Leçon 4: Les relations structures-propriétés physiques sont généralement traitées trop superficiellement.

Leçon 5: La leçon ne doit pas se limiter à l'oxydation des alcools et à une description des tests caractéristiques des fonctions cétones, aldéhydes et acides carboxyliques.

Leçon 6: L'écriture des demi-équations redox faisant intervenir les couples ClO^-/Cl_2 et ClO^-/Cl^- en milieu acide et basique doivent être maîtrisées.

Leçon 7: L'exposé d'au moins deux applications complètement exploitées est souhaité. Outre les principes de la mesure spectrophotométrique, les candidats sont invités à réfléchir sur la nature des transitions spectroscopiques mises en jeu et la nature des substrats concernés par cette technique.

Leçon 8: Les notions de quotient réactionnel et de taux d'avancement final, suggérées par le programme, peuvent être avantageusement utilisées pour comparer la force des acides. Les applications ne se limitent pas aux dosages.

Leçon 9: Les candidats ne s'interrogent généralement que sur la valeur du pKa de l'indicateur coloré sans jamais considérer la pente de la courbe de titrage autour de l'équivalence.

Leçon 11: La catalyse enzymatique n'est généralement traitée que très superficiellement.

Leçon 12: L'exposé des facteurs cinétiques et thermodynamiques permettant de contrôler la réaction d'estérification (ou en sens inverse d'hydrolyse des esters) est attendu, en plus de la mise en évidence expérimentale d'un état d'équilibre.

Leçon 13: La saponification des esters ne se limite pas à la formation de savons.

Leçon 14: La caractérisation et l'analyse de la pureté des produits formés lors d'une synthèse chimique sont indispensables.

Leçon 15: L'étude du transfert direct d'électrons sur l'exemple de la pile Daniell est souvent mal menée, ne permettant pas de mettre en évidence la formation d'ions Zn^{2+} . Piles « au repos » et piles en utilisation seront

clairement distinguées, ce qui évitera des erreurs notamment lors de la mesure de la force électromotrice. La détermination de la résistance interne d'un système électrochimique et la réalisation expérimentale de piles usuelles présentent des intérêts pédagogiques.

Leçon 17: L'étude qualitative des liquides alimentaires et ménagers ne se limite pas à la détermination de leur pH, mais inclut la caractérisation des espèces chimiques à l'origine de ces propriétés.

Leçons 18 et 19: L'interprétation des différents dosages se fera en lien avec les normes en vigueur pour le contrôle qualité des boissons considérées. Précision des méthodes développées et calculs d'erreur sur les dosages effectués présentent également un grand intérêt.

Leçons 20 et 21: Hydrodistillation et entraînement à la vapeur sont souvent confondus. Les principes liés à la révélation des plaques de chromatographie sont fréquemment méconnus.

Leçon 23: L'analyse du caractère évolutif des propriétés dans la classification périodique est souhaitable tant sur les colonnes que sur les lignes.

Leçon 24: Les illustrations expérimentales des relations entre la structure et les propriétés chimiques des molécules sélectionnées sont trop souvent négligées.

Leçon 25: L'utilisation de modèles, fortement souhaitable, doit être menée avec soin.

Leçon 26: De trop grandes confusions persistent entre les grandeurs ΔH et $\Delta_r H$. Une mesure calorimétrique et un bilan enthalpique soignés sont attendus. La détermination d'une température de flamme est à considérer. Les présentations de cette leçon comportent souvent des erreurs et des confusions graves ; les futurs candidats sont encouragés à la travailler.

Leçon 27: Des développements calculatoires sur les constantes de complexation sont trop souvent menés au détriment des applications expérimentales qui se doivent d'être diversifiées. Bien que très classique, la détermination de la dureté de l'eau est souvent conceptuellement mal maîtrisée.

Leçons 28 et 29: L'exploitation des dosages présentés ne se limite pas à la seule détermination du point équivalent. Le candidat réfléchira avantagement à la limite de validité et la précision des méthodes utilisées, ainsi qu'à la quantité d'indicateur de fin de réaction à utiliser dans les dosages colorimétriques.

Leçon 30: Le lien entre l'étude expérimentale des facteurs cinétiques et les mécanismes réactionnels n'est généralement pas établi.

Leçon 31: Dans cette leçon tout particulièrement, les développements calculatoires ne doivent pas se faire au détriment des illustrations expérimentales.

Leçon 32: Une manipulation est attendue, au moins dans le cadre des applications des diagrammes binaires. Lorsque introduits, les calculs de variance sont souvent mal conduits.

Leçon 33: Les généralisations abusives de systèmes ne comportant que le dioxygène sous forme gazeuse à des systèmes comprenant plusieurs gaz conduisent à des erreurs.

Leçon 34: Les diagrammes potentiel-pH et les courbes intensité-potentiel sont insuffisamment exploités pour justifier les protocoles opératoires des différentes étapes qui conduisent à la préparation du zinc. Une caractérisation à chaque étape des espèces présentes en solution est souhaitable.

Leçon 35: Les applications des diagrammes potentiel-pH ne se limitent pas à la métallurgie.

Leçon 36: Les notions de potentiel d'équilibre, de potentiel mixte et de surtension restent trop souvent mal maîtrisées.

Leçon 37: Les aspects cinétiques de la corrosion sont souvent négligés. Une mauvaise maîtrise des courbes intensité-potentiel en est en général la cause.

15. Rapport relatif au montage de physique

L'objectif de cette épreuve est d'évaluer les capacités expérimentales du candidat et son aptitude à présenter et discuter des résultats quantitatifs dans un ensemble cohérent d'expériences illustrant le thème choisi.

Le candidat dispose de 40 minutes pour présenter des expériences préparées pendant 4h avec l'assistance de techniciens et de professeurs préparateurs. A l'issue de cette présentation, le jury pose des questions pour se faire préciser les choix expérimentaux, évaluer la compréhension des phénomènes physiques illustrés et discuter de la pertinence des commentaires.

Le jury a eu le plaisir d'assister à des montages remarquables. Plusieurs candidats ont obtenu des notes voisines du maximum ou même égales à celui-ci. Le choix des expériences s'est avéré judicieux, les résultats obtenus ont été correctement analysés et bien exploités. Le dynamisme, le pouvoir et la volonté de convaincre étaient également là.

De l'autre côté, le nombre de prestations réellement faibles est encore trop important. C'est à ces candidats (ainsi qu'à ceux qui se préparent à passer le concours pour la première fois) que ce rapport est destiné en priorité. Même si le montage est considéré comme une épreuve délicate, il convient de ne pas céder à un découragement passager. Il est en effet possible de faire de réels et rapides progrès. Bien entendu, une bonne préparation est indispensable. Il est également recommandé de bien connaître ses possibilités et de ne pas essayer de se lancer dans des manipulations délicates que l'on ne maîtrise pas. Beaucoup parmi les remarques qui suivent sont d'ailleurs la traduction d'un simple bon sens.

Remarques générales sur le déroulement de l'épreuve

Après une courte introduction, le candidat doit montrer son habileté expérimentale en réalisant des expériences illustrant un sujet choisi parmi les deux proposés au début de la préparation de l'épreuve. Il ne s'agit donc pas d'un cours et les lois illustrées n'ont pas à être démontrées. Cependant le candidat doit être capable d'en donner l'origine et le domaine de validité. Il doit bien sûr être capable de donner la définition des grandeurs physiques mesurées (tension superficielle, conductivité, auto-inductance ...), surtout si celles-ci figurent explicitement dans le titre.

Une expérience décrite oralement ou par un schéma au tableau sans manipulation est considérée comme sans valeur. Le candidat a intérêt à choisir des manipulations adaptées à son niveau, dont il maîtrise les concepts physiques sous-jacents, plutôt que tenter de réaliser des expériences mal dominées. Il est important d'exploiter entièrement les manipulations présentées. Quel que soit le sujet choisi, il ne faut pas se limiter à des expériences qualitatives. Toutefois, en introduction, une expérience démonstrative et permettant une mesure rapide en vue d'obtenir quelques ordres de grandeur peut parfaitement être présentée.

Il ne s'agit cependant pas de multiplier ce genre de manipulations car le jury exige des mesures soignées afin, par exemple, de vérifier une loi physique. Il n'est pas nécessaire de reprendre toutes les mesures associées à une expérience : il suffit d'en choisir au moins une qui permette d'illustrer le protocole expérimental suivi et de l'insérer ensuite parmi les résultats obtenus pendant la préparation.

Seules des mesures soignées conduisent à une exploitation critique des résultats permettant de valider un modèle ou de déterminer la valeur d'une grandeur physique qui pourra être comparée à

celle trouvée dans un ouvrage de référence (handbook par exemple). Toute mesure doit donc être accompagnée d'une évaluation soignée et justifiée de l'incertitude sur le résultat obtenu. Trop souvent, les seules incertitudes envisagées sont celles dues aux appareils de mesure utilisés. La précision obtenue dépend également du protocole expérimental mis en place et le candidat doit être en mesure de discuter de l'existence d'erreurs systématiques induites par ce protocole. Par ailleurs, les incertitudes dépendent évidemment du soin apporté par l'expérimentateur à sa mesure.

L'outil informatique est maintenant systématiquement utilisé. D'une façon générale, c'est une bonne chose car les possibilités offertes sont nombreuses. Toutefois, les candidats doivent savoir utiliser le logiciel choisi. Les opérations réalisées automatiquement peuvent rendre délicate l'estimation de l'incertitude sur les paramètres issus d'un ajustement. En tout état de cause, si le logiciel propose une incertitude sur un paramètre, le candidat doit s'assurer de sa cohérence avec la valeur de ce dernier. Il est souvent préférable de mettre les résultats sous forme de représentations linéaires permettant une discussion plus facile des incertitudes. Par exemple, dans le cas de la variation de la résistance R d'une thermistance en fonction de la température T , il est préférable de tracer $\ln R$ en fonction de $1/T$ et d'ajuster « à la main » la pente de la droite obtenue en tenant compte des barres d'erreur si le logiciel ne le permet pas.

La présentation des résultats doit faire apparaître les points expérimentaux non reliés entre eux, avec une échelle adaptée qui permet de tous les visualiser. Le jury apprécie que le point inséré en direct se distingue des points pris en préparation. Par ailleurs, les candidats oublient trop souvent de légender leurs courbes.

Il est indispensable de connaître au moins approximativement le principe physique de fonctionnement des appareils de mesure utilisés, leurs limites et leur influence dans le montage et de pouvoir être capable de justifier ses choix d'appareils. Il est regrettable que les notices des appareils permettant de connaître leurs caractéristiques techniques ou d'avoir accès à une courbe d'étalonnage soient trop souvent absentes des paillasses.

Le jury peut fort bien se déplacer pour observer un phénomène peu visible. Néanmoins, il apprécie l'utilisation, à bon escient, des moyens modernes comme la webcam et le vidéo-projecteur.

Enfin, il s'avère que certains montages font l'objet d'impasses systématiques. Les sujets traditionnels ou anciens ne conduisent pas toujours aux meilleures notes.

Quelques points particuliers :

Optique - Les montages d'optique sont rarement réussis. Cependant, lorsqu'ils le sont, ils permettent d'obtenir d'excellentes notes. Les expériences traditionnelles conservent tout leur intérêt à condition que les montages soient soignés et les figures obtenues visibles et exploitables. L'utilisation de capteurs CCD et de l'informatique ne permettent pas de rattraper un mauvais réglage.

Thermodynamique - Les états d'équilibre ou stationnaires ou permanents sont longs à atteindre. Une bonne gestion du temps et une bonne organisation sont donc importantes.

Electronique – Le jury peut souhaiter vérifier un câblage. Il est donc important de ne pas défaire les circuits réalisés avant la fin de l'épreuve. Pour chaque circuit câblé, un schéma électrique doit

apparaître au tableau afin de permettre au jury de déceler une éventuelle erreur sans devoir suivre les fils.

La vobulation permet de visualiser la réponse d'un circuit en fonction de la fréquence. Elle n'est pas adaptée à la mesure de fréquences de coupure ou de résonance.

De même, la fonction FFT des logiciels ou des oscilloscopes permet d'obtenir le spectre ou la transformée de Fourier d'un signal. Pour mesurer la fréquence d'un signal périodique, il existe des méthodes plus simples et plus précises (utilisation d'un fréquencemètre par exemple).

Remarques particulières à certains montages

(Les numéros indiqués sont ceux de la liste 2007)

1. Dynamique newtonienne. La différence entre un pendule pesant et un pendule simple (qui en est une approximation valable dans certaines conditions) fait partie de la culture du physicien.

2. Tension superficielle. Si le candidat souhaite utiliser une balance d'arrachement, il est invité à en choisir une dont il maîtrise le fonctionnement. L'utilisation d'une webcam pour la loi de Jurin donne de meilleurs résultats qu'une projection à l'aide d'une lentille.

3. Dynamique des fluides. Le tube de Pitot n'est pas le seul instrument permettant de mesurer la vitesse d'écoulement d'un fluide.

5. Transition de phase. Il est important de ne pas se contenter d'une série d'expériences qualitatives.

6. Phénomènes de transport. Le jury attend au moins une mesure de coefficient de diffusion. Le candidat doit savoir évaluer un temps caractéristique de ce phénomène.

8. Formation des images en optique. Ce montage ne se résume pas à un catalogue exhaustif des aberrations des lentilles.

10. Diffraction des ondes lumineuses. Il ne suffit pas de présenter des expériences du niveau de la classe de seconde. Il existe d'autres sources lumineuses que les sources laser.

11. Spectrométrie optique. La mesure de longueurs d'onde est le cœur du sujet mais il faut aborder la notion de résolution des appareils de mesure et les phénomènes responsables de sa limitation.

13. Production et analyse d'une lumière polarisée. La polarisation rectiligne n'est pas la seule.

15. Lasers. Les propriétés de cohérence du faisceau laser doivent évidemment être abordées.

16. Photorécepteurs. Il existe d'autres photorécepteurs que la photodiode. Pour faire varier l'éclairement de manière contrôlée, on peut utiliser deux polariseurs conformément à la loi de Malus.

17. Production et mesure de champs magnétiques. La maîtrise du maniement de la sonde de Hall et une connaissance sommaire de son principe de fonctionnement sont indispensables.

18. Milieux magnétiques. Il faut pouvoir justifier la forme des pièces polaires de l'électro-aimant choisi.

21. Condensateurs et effets capacitifs. Le principe de fonctionnement d'un capacimètre doit être connu. Les mesures ne doivent pas se limiter à l'étude du condensateur d'Aepinus ou à des mesures de capacité : les effets capacitifs de certains composants peuvent être abordés.
22. Induction, auto-induction. Ces notions sont fondamentales. Le montage est pourtant souvent décevant, traité à un niveau trop élémentaire.
23. Conversion de puissance électrique-électrique. Il s'agit de conversion de puissance, non de conversion de signal.
24. Conversion de puissance électro-mécanique. Un effort pédagogique incluant une approche physique des phénomènes impliqués dans le fonctionnement des moteurs permet d'éviter un montage constitué d'une série de mesures sans logique apparente.
25. Capteurs et transducteurs. Le montage ne peut se résumer à un catalogue plus ou moins exhaustif des capteurs. Le jury attend au moins une étude approfondie des propriétés de l'un des capteurs présentés ainsi que celle d'un transducteur. Les principes physiques qui sous-tendent le fonctionnement des capteurs étudiés ne peuvent être ignorés des candidats.
26. Mesure des tensions et des courants. Le jury attend du candidat qu'il connaisse et illustre le principe de la mesure et les caractéristiques des multimètres ou oscilloscopes utilisés (sensibilité, bande passante...).
27. Amplification de signaux. La notion d'impédance d'entrée et d'impédance de sortie des amplificateurs doit être abordée.
28. Télécommunication : mise en forme, transmission et détection de l'information. Ce montage n'est pas souvent choisi et il est encore moins souvent réussi. Des manipulations simples de modulation et démodulation peuvent y être présentées.
30. Mesure des fréquences temporelles (domaine de l'optique exclu). Le candidat doit avoir un minimum de connaissances sur la fonction FFT des logiciels spécialisés ou des oscilloscopes.
32. Asservissement d'une grandeur physique ; applications. La connaissance du comportement en fréquence des quadripôles est nécessaire pour discuter les propriétés d'un système bouclé. Le tracé d'un diagramme de Bode peut faciliter la présentation.
33. Instabilités et phénomènes non linéaires. Eviter un choix trop ambitieux de manipulations non maîtrisées.
34. Ondes et impédances. Ce montage met traditionnellement en difficulté les candidats qui ne savent pas trop comment aborder la notion d'impédance. En 2008, le titre devient « Ondes : propagation et conditions aux limites ».
35. Ondes acoustiques. Il est conseillé de ne pas se limiter à la propagation dans l'air, ni à une gamme de fréquences restreinte aux fréquences audibles.

36. Résonance. L'étude du circuit RLC n'est pas maîtrisée et est souvent traitée de manière superficielle. La notion de facteur de qualité est importante.

37. Oscillateurs. Les oscillateurs amortis sont de peu d'intérêt au niveau de l'agrégation. En 2008, le titre de ce montage devient « Oscillateurs auto-entretenus ».

39. Filtrage. Le titre du montage est « filtrage » et non « filtres ». Il ne faut donc pas se limiter à l'étude du diagramme de Bode des circuits présentés mais étudier le filtrage des signaux. Le jury apprécie de voir d'autres filtres que de simple filtres RC ou RLC. Les candidats peuvent aborder d'autres domaines que l'électronique.

40. Constantes physiques fondamentales ; unités. En 2008, ce montage est supprimé.

16-a LEÇONS DE PHYSIQUE 2008

Les leçons sont à traiter au niveau des classes préparatoires scientifiques ou au niveau de la licence de physique. Dans ce dernier cas, il convient de se placer dans la mesure du possible au niveau des deux premières années de licence (niveaux L1 et L2).

1. Contact entre deux solides. Frottement de glissement. Applications au glissement et au roulement.
2. Caractère non galiléen du référentiel terrestre. Conséquences.
3. Mouvement d'un solide autour d'un axe fixe. Equilibrage statique et dynamique. Exemples.
4. Approximation gyroscopique. Effets dans les domaines macroscopique et microscopique.
5. Utilisation des lois de conservation dans le problème à deux corps. Applications.
6. Principes de la cinématique relativiste. Conséquences.
7. Collisions en relativité restreinte : application à l'étude des particules élémentaires.
8. Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique indépendant du temps. Applications.
9. Notion de viscosité d'un fluide. Ecoulements visqueux. Nombre de Reynolds. Exemples simples.
10. Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide; validité. Relation de Bernoulli ; limites et applications.
11. Bilans macroscopiques en mécanique des fluides : applications.
12. Modèle du gaz parfait.
13. Etat d'équilibre thermodynamique. Fonctions d'état. Identités thermodynamiques. Applications.
14. Evolution et condition d'équilibre d'un système thermodynamique fermé. Potentiels thermodynamiques.
15. Thermodynamique des phénomènes irréversibles.
16. Application des deux premiers principes de la thermodynamique au fonctionnement des machines thermiques.
17. Etude thermodynamique d'un système constitué par un corps pur sous plusieurs phases. Exemples.
18. Notion d'état microscopique. Interprétation statistique de l'entropie. Exemples.
19. Introduction au facteur de Boltzmann à partir d'un exemple au choix. Applications.
20. Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir. Applications.
21. Etude d'un phénomène de transport : conduction thermique ou diffusion de particules. Applications.
22. Conversion de puissance électromécanique. Exemples et applications.
23. Induction électromagnétique : circuit mobile dans un champ magnétique permanent, circuit fixe dans un champ variable. Applications.
24. Systèmes bouclés. Applications.
25. Traitement analogique d'un signal électrique. Etude spectrale. Filtrage linéaire. Exemples et applications.
26. Exemples de phénomènes de propagation unidimensionnels. Ondes progressives, ondes stationnaires. Aspects énergétiques.
27. Ondes sonores dans les fluides.
28. Propagation dans un milieu dispersif : vitesse de phase, vitesse de groupe. Paquets d'ondes planes et évolution. Exemples.
29. Propagation guidée. Exemples et applications.

30. Dispersion et absorption d'une onde électromagnétique plane dans un milieu diélectrique. Modélisation microscopique
31. Comportement d'une onde électromagnétique monochromatique plane à l'interface de deux milieux diélectriques. Applications.
32. Réflexion des ondes électromagnétiques planes à la surface d'un milieu conducteur dans le cas d'une incidence normale. Effet de peau.
33. Propriétés et applications du rayonnement dipolaire électrique.
34. Notion de rayon lumineux. Principe de Fermat. Conséquences et applications.
35. Application des lois de l'optique à l'étude d'un instrument d'optique au choix.
36. Obtention d'interférences à deux ondes en optique. Notion de cohérence.
37. Interféromètres à division d'amplitude. Applications.
38. Diffraction de Fraunhofer. Applications.
39. Diffraction par des structures périodiques dans différents domaines de la physique.
40. Absorption, émission spontanée ou induite du rayonnement. Coefficients d'Einstein. Applications.
41. Aspects corpusculaires du rayonnement. Notion de photon.
42. Aspects ondulatoires de la matière. Notion de fonction d'onde.
43. Exemples de phénomènes quantiques.
44. Confinement de l'électron et quantification de l'énergie. Exemples.
45. Effet tunnel. Applications.
46. Le noyau : stabilité, énergie. Applications
47. Oscillateurs à deux degrés de liberté en mécanique classique : modes propres. Systèmes à deux niveaux d'énergie en physique quantique. Analogies et différences.
48. Cohésion de la molécule et des solides. Aspects énergétiques.
49. Chaîne linéaire infinie d'oscillateurs harmoniques. Approximation des milieux continus. Aspects énergétiques.
50. Capacités thermiques : description , interprétations microscopiques.
51. Paramagnétisme, ferromagnétisme. Approximation du champ moyen.
52. Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques. Applications.
53. Mécanismes de la conduction électrique. Loi d'Ohm. Effet Hall. Applications.
54. Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique.
55. Exemples d'effets de non linéarité sur le comportement d'un oscillateur.

16-b LEÇONS DE CHIMIE 2008

1. Solutions électrolytiques ; mise en solution d'espèces ioniques ou moléculaires. (1^{ère} scientifique)
2. La conductimétrie : conductivité d'une solution ionique et application à la détermination de concentrations (dosage volumétrique exclu). (1^{ère} scientifique)
3. Le squelette carboné des hydrocarbures : relations structures - propriétés physiques, modification du squelette carboné. (nomenclature exclue). (1^{ère} scientifique)
4. Les grandes familles de réactions en chimie organique illustrées sur l'exemple des alcools. (1^{ère} scientifique)
5. Etude de l'eau de Javel : obtention, propriétés, dosage. (Terminale Sciences Médico-Sociales)
6. Principe et applications de la spectrophotométrie. (Terminale scientifique et Terminale scientifique – Spécialité)
7. Constante d'acidité ; applications. (Terminale scientifique)
8. Indicateurs colorés acido-basiques : étude, choix pour un dosage acide-base. (Terminale scientifique)
9. Cinétique de réaction (catalyse exclue). (Terminale scientifique)
10. Catalyse et catalyseurs ; applications. (Terminale scientifique)
11. Estérification et hydrolyse des esters. (Terminale scientifique)
12. Saponification des esters. Applications. (Terminale scientifique)
13. L'aspirine : synthèse, dosage, formulations. (Terminale scientifique et Terminale scientifique – Spécialité)
14. Piles : mise en jeu de transformations chimiques spontanées. (Terminale scientifique)
15. Électrolyses et accumulateurs : mise en jeu de transformations chimiques forcées. (Terminale scientifique)
16. Étude qualitative et quantitative des espèces acido-basiques dans les liquides alimentaires et ménagers. (Terminale scientifique – Spécialité)
17. Contrôle de qualité de l'eau. (Terminale scientifique – Spécialité)
18. Contrôle de qualité du vin. (Terminale scientifique – Spécialité)
19. Colorants : extraction, synthèse, identification. (Terminale scientifique – Spécialité)
20. Arômes et conservateurs : extraction, synthèse, dosage. (Terminale scientifique – Spécialité)
21. Dosages directs. (Terminale scientifique et Terminale scientifique – Spécialité)
22. Dosages indirects. (Terminale scientifique et Terminale scientifique – Spécialité)
23. Étude expérimentale du caractère évolutif des propriétés physico-chimiques dans la classification périodique. (MPSI-PTSI)
24. Structure électronique et géométrie des molécules ; illustrations expérimentales des relations structure - propriétés. (MPSI-PTSI)
25. Cristaux métalliques. (MPSI-PTSI)

26. Enthalpie de réaction : mesure et applications. (PSI-PTSI)
27. Illustrations expérimentales et applications des réactions de complexation. (MPSI-PTSI)
28. Principe et illustrations des dosages par précipitation. (MPSI-PTSI)
29. Principe et illustrations des dosages redox par potentiométrie. (MPSI-PTSI)
30. Cinétique homogène : étude expérimentale. (MPSI-PTSI)
31. Mécanismes réactionnels en cinétique homogène. (MPSI-PTSI)
32. Illustrations expérimentales et applications des lois de déplacement des équilibres. (MP-PSI-PT)
33. Mélanges binaires : équilibres liquide-vapeur ; applications (liquides non miscibles exclus). (MP)
34. Lecture et utilisation des diagrammes d'Ellingham ; application à la pyrométallurgie. (MP-PSI)
35. Hydrométallurgie du zinc. (PSI)
36. Applications des diagrammes potentiel-pH (construction exclue). (PSI)
37. Applications des courbes intensité-potentiel. (PSI)
38. Corrosion humide du fer. Protection du fer par le zinc. (PSI)
39. Exemples de mécanismes en chimie organique : additions électrophiles sur la double liaison carbone - carbone. (PSI)
40. Conformations et configurations ; illustrations expérimentales (PSI)

16-c MONTAGES 2008

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