

Sommaire

1. Composition du jury
2. Avant-propos et informations statistiques
3. 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
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 2008
13. Rapport sur la leçon de physique
14. Rapport sur la leçon de chimie
15. Rapport sur le montage de physique
16. Sujets des épreuves orales de la session 2009
17. Sujets de l'épreuve de montage de la session 2010

1. Composition du jury

FABRE Claude (M)	<i>Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie - Paris 6 Président du Jury</i>
SECRETAN Daniel	<i>Inspecteur Général de l'Education Nationale Vice-Président du Jury</i>
LE BOURHIS Jean-François	<i>Inspecteur Pédagogique Régional de l'académie de Caen Secrétaire général</i>
BESSY Geneviève	<i>Professeur au Lycée Montaigne à Bordeaux</i>
BOUGAULT Catherine	<i>Maître de conférences Université Joseph Fourier de 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>
CHOPART Jean-Paul	<i>Professeur à l'Université de Reims</i>
COTE Denis	<i>Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie - Paris 6</i>
DUBOURG Patrick	<i>Professeur au Lycée Montesquieu au Mans</i>
DUPUIS Gérard	<i>Professeur au Lycée Faidherbe à Lille</i>
GUÉRILLOT Annie	<i>Professeur au Lycée Albert Schweitzer à Mulhouse</i>
GUEST Dominique (Mme)	<i>Professeur au Lycée Louis le Grand à Paris</i>
HARE Jean	<i>Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie - Paris 6</i>
JOACHIM Olivier	<i>Professeur au Lycée Saint Louis à Paris</i>
LABASTIE Pierre	<i>Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse</i>
LEBLANC Anne	<i>Professeur au Lycée Marcelin Berthelot à St Maur</i>
LOUNIS Brahim	<i>Professeur à l'Université de Bordeaux 1</i>
MICHEL Olivier	<i>Professeur à l'Université de Nice</i>
MONANGE Alain	<i>Professeur au Lycée Paul Cézanne à Aix-en-Provence</i>
NAKATANI Keitaro	<i>Professeur à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan</i>
REZEAU Laurence	<i>Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie - Paris 6</i>
SANZ Marie-Noëlle	<i>Professeur au Lycée Saint Louis à Paris</i>

02. AVANT-PROPOS

ET INFORMATIONS STATISTIQUES

	2008	2007	2006	2005
Inscrits	1591	1691	1785	1666
Présents aux trois épreuves	748	815	853	875
Admissibles	253	289	290	326
Barre d'admissibilité	53/120	51,8/120	52/120	45,2/120
Moyenne générale du candidat classé premier	18,35/20	17,76/20	19,02/20	18,88/20
Moyenne générale du dernier candidat reçu	10,1/20	9,99/20	9,95/20	8,30/20
ADMIS	112	135	135	180

Le nombre de postes mis au concours était en 2008 de 112, soit une réduction de 17% par rapport à l'année précédente. Le nombre de candidats ayant effectivement concouru n'est en diminution que de 8%, ce qui atteste de la permanence de l'attractivité du métier de professeur agrégé de physique parmi les étudiants. Remarquons que la barre d'admission dépasse cette année pour la première fois la moyenne de 10. On constate donc que la raréfaction des postes s'accompagne d'une élévation du niveau de recrutement, ce qui montre que le vivier de très bons physiciens susceptibles de réussir au concours de l'agrégation est loin de se tarir, en dépit de la tendance à la baisse du nombre d'étudiants en sciences physiques.

Nature de l'épreuve écrite	Moyenne des candidats ayant composé	Moyenne des candidats admissibles
Composition de physique	8,00	13,20
Composition de chimie	8,17	11,77
Problème de physique	7,56	12,33

Les épreuves écrites, pour lesquelles on trouvera la distribution des notes dans la suite du rapport, ont permis de faire une première sélection sur les connaissances des candidats en physique et en chimie et leur capacité à résoudre des questions nouvelles liées aux récents développements de la science et de la technologie. Le jury a apprécié l'excellent niveau et les capacités d'un grand nombre de candidats, mais aussi déploré le nombre important de copies très insuffisantes. Il est utile de rappeler que, en physique comme en chimie, les sujets d'écrit sont établis de manière à tester de manière progressive les qualités des candidats. Ils comportent un nombre important de questions et d'applications numériques simples qui sont à la portée de tout étudiant ayant réussi un M1.

Nature de l'épreuve orale	Moyenne des candidats présents aux épreuves orales	Ecart-type
Leçon de physique	7,96/20	4,83
Leçon de chimie	9,48/20	3,94
Montage de physique	8,57/20	4,33

Les épreuves orales se sont déroulées cette année sur 3 séries seulement. Outre les connaissances théoriques et les aptitudes pratiques des candidats, elles permettent de tester leur « charisme », c'est-à-dire leur aptitude à faire passer auprès des élèves leur enthousiasme pour les sciences physiques, éveiller leur curiosité et leur donner le goût des carrières scientifiques. Le jury est attentif à l'ensemble de ces éléments, et ne s'attend donc pas à ce que les candidats reproduisent un quelconque « modèle » pré-établi de leçon ou de montage pour chacun des sujets proposés.

Les leçons doivent être traitées à un niveau donné : la Licence pour la physique, et un niveau indiqué pour chaque leçon pour la chimie. Le candidat doit donc faire un exposé qui suppose que son auditoire possède les connaissances correspondantes, mais sans nécessairement s'astreindre à suivre au pied de la lettre le programme de la classe indiquée. En effet les programmes changent au cours des années, et un professeur agrégé doit pouvoir s'adapter à leur évolution. En physique, il peut s'il le désire dépasser ce niveau dans une partie de son exposé, mais en s'efforçant de rester simple et compréhensible pour un étudiant en licence ou en classe préparatoire.

Les candidats maîtrisent bien dans l'ensemble les outils informatiques et audio-visuels mis à leur disposition, notamment la banque de documents graphiques. Rappelons qu'un logiciel de traitement de données ou de traçage de courbes n'apporte un supplément à la prestation du candidat que s'il est vraiment maîtrisé. Dans le cas contraire, il risque de lui faire perdre un temps précieux.

Il est enfin vivement recommandé aux candidats de lire avec attention les commentaires figurant dans les rapports successifs du jury avant de commencer à préparer leur épreuve. Ils y puiseront un ensemble de recommandations très utile pour leur préparation.

Elements statistiques

Répartition par date de naissance des candidats

Année de naissance	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
1986	12	10
1985	71	43
1984	55	27
1983	19	9
1982	13	5
1981	12	5
1980	12	2
1979	7	3
1978	7	2
1977	8	0
1976	3	1
1975	6	0
1974	3	0
1973	4	3
1972	4	0
1968 à 1971	13	2
antérieure à 1968	4	0

Répartition par titres et diplômes

Titre ou diplôme	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
Doctorat	25	8
DEA ou M2	14	6
Ingénieur , diplôme grande école	29	9
M1 ou équivalent	171	85
CAPES, CAPLP	11	2
Autres	2	2

Répartition par profession

Profession	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
Etudiant	134	65
Elèves d'une ENS	49	33
Elève IUFM 1 ^{ère} année	15	5
Certifiés et PLP stagiaires	10	2
Enseignant MEN	40	5
Autres ministères	1	0
Hors fonct publique/sans emploi	9	0
Autres	9	2

Répartition par sexe

	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
Homme	171	73
Femme	82	39

Les éléments statistiques sur les candidats admissibles et admis qui précèdent permettent de voir que la plupart des candidats ont préparé, puis passé le concours juste après le M1. L'agrégation externe permet donc de recruter effectivement de jeunes enseignants (93% ont moins de 30 ans). On note aussi une augmentation sensible du nombre d'admissibles qui sont déjà docteurs en physique, ce qui montre une augmentation de l'attractivité du métier d'enseignant en classe préparatoire ou en lycée au détriment de celui d'enseignant-chercheur. Gageons que les nouveaux agrégés-docteurs sauront faire profiter leurs futurs élèves de leur connaissance du monde de la recherche. Il faut noter enfin que la proportion des femmes admises, après une forte augmentation l'année dernière, est restée en 2008 stable à 35%

Le Président du jury

03. REGLEMENTATION

Programme

Il est identique à celui de la session 2007

Programme des épreuves écrites:

Epreuve A (composition de physique) : voir le [BO n°25 du 19/6/97](#)

Epreuve B (composition de chimie) : voir le [BO spécial n°13 du 30/05/2002](#)

Epreuve C (problème de physique) : voir le [BO n°25 du 19/6/97](#)

Le programme des classes préparatoires auquel il est fait référence est celui défini par les BO suivants :

-classes de MPSI, PCSI, PTSI : [BO hors série n°5 du 28/8/2003](#)

-classes de MP, PC, PT, PSI : [BO hors série n°6 du 16/9/2004](#)

-classes de BCPST1 : [BO hors série n°3 du 26/6/2003](#)

-classes de BCPST2 : [BO hors série n°3 du 29/4/2004](#)

Programme des épreuves orales

Voir le [BO spécial n°7 du 1/7/2004](#)

Epreuves :

Les épreuves écrites comportent :

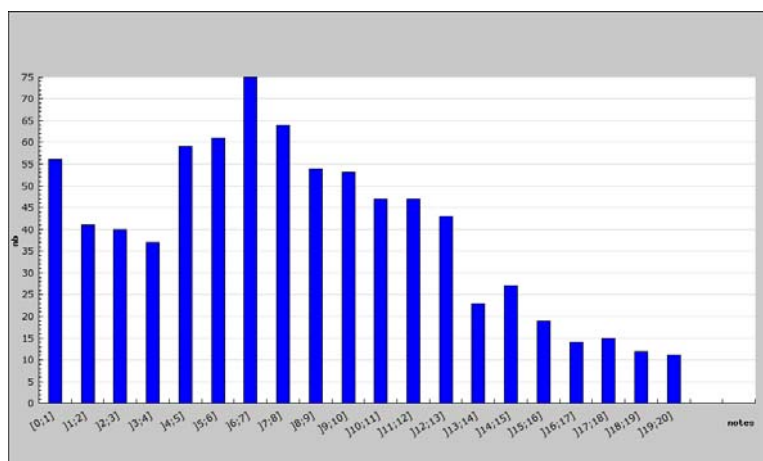
- Une composition de physique de durée 5 h (coefficient 2)
- Une composition de chimie de durée 5 h (coefficient 2)
- Un problème de physique de durée 6 h (coefficient 2)

Les épreuves orales comportent :

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

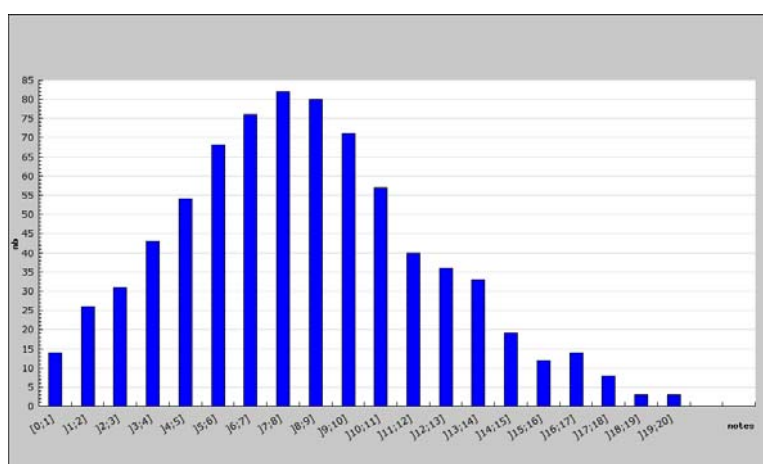
4-1 Distribution des notes pour l'ensemble des candidats aux épreuves écrites

Composition de physique



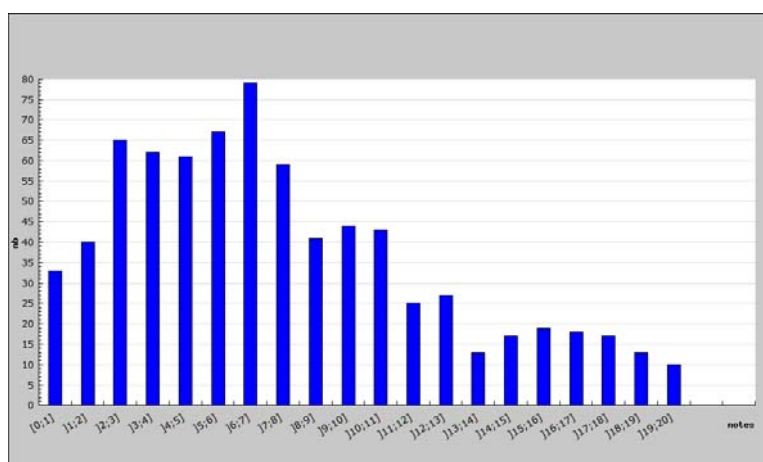
Moyenne :	8
Ecart-type :	4.78

Composition de chimie



Moyenne :	8.17
Ecart-type :	3.87

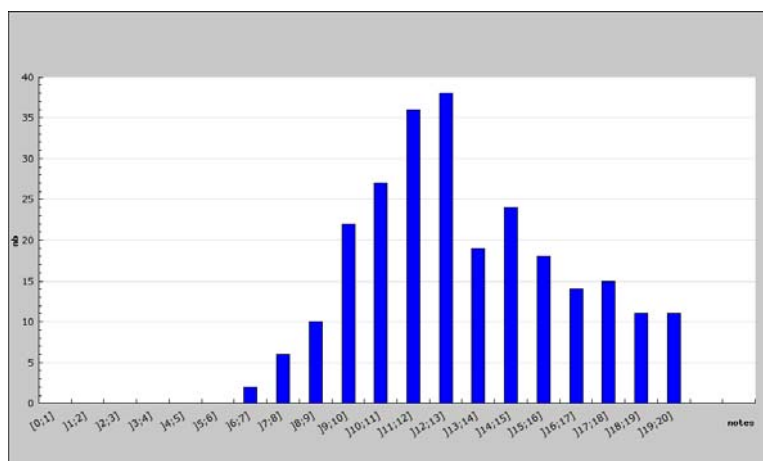
Problème de physique



Moyenne :	12.33
Ecart-type :	3.78

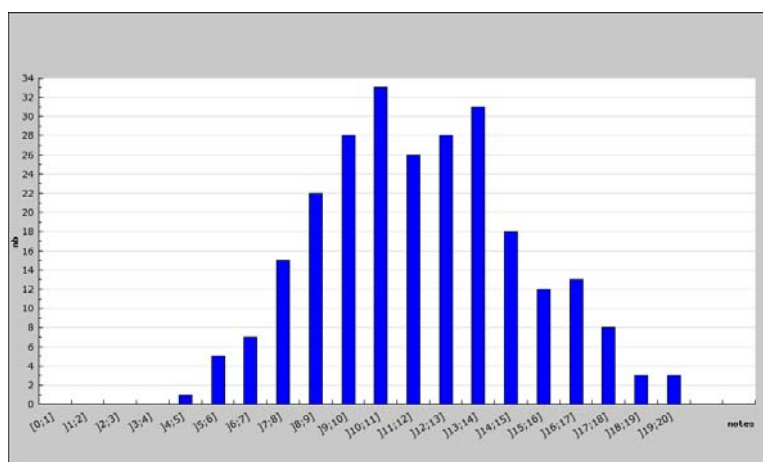
4-2 Distribution des notes pour les candidats admissibles aux épreuves écrites

Composition de physique



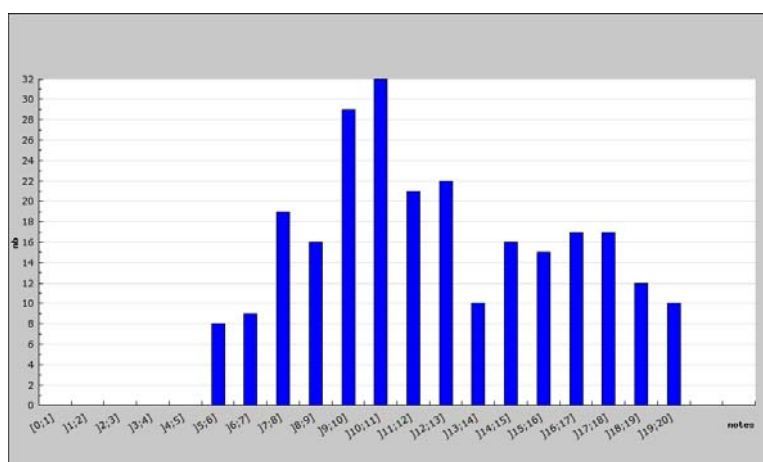
Moyenne :	13.2
Ecart-type :	3.12

Composition de chimie



Moyenne :	11.77
Ecart-type :	3.08

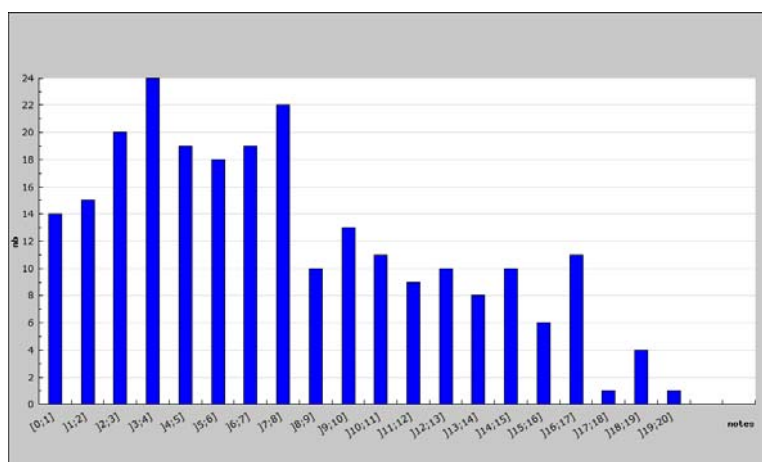
Problème de physique



Moyenne :	12.33
Ecart-type :	3.78

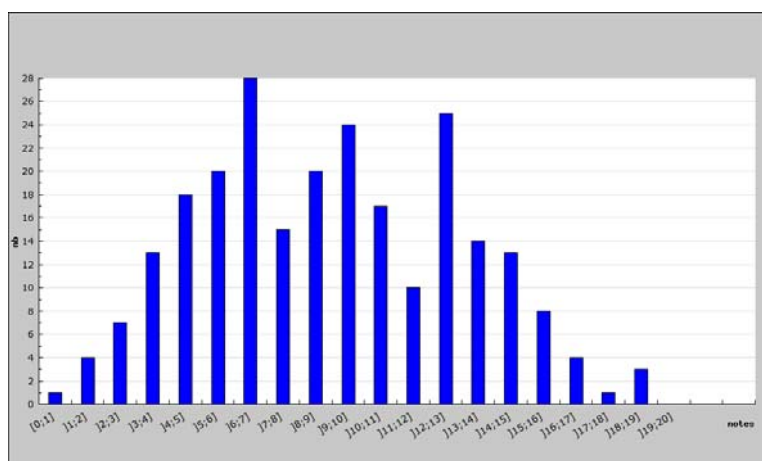
4-3 Distribution des notes aux épreuves orales

Distribution des notes d'oral des candidats admissibles pour la leçon de physique



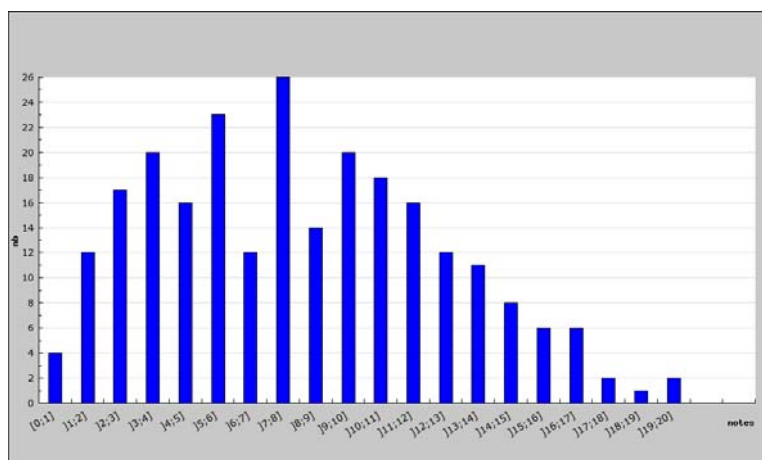
Moyenne :	7.96
Ecart-type :	4.83

Distribution des notes d'oral des candidats admissibles pour la leçon de chimie



Moyenne :	9.48
Ecart-type :	3.94

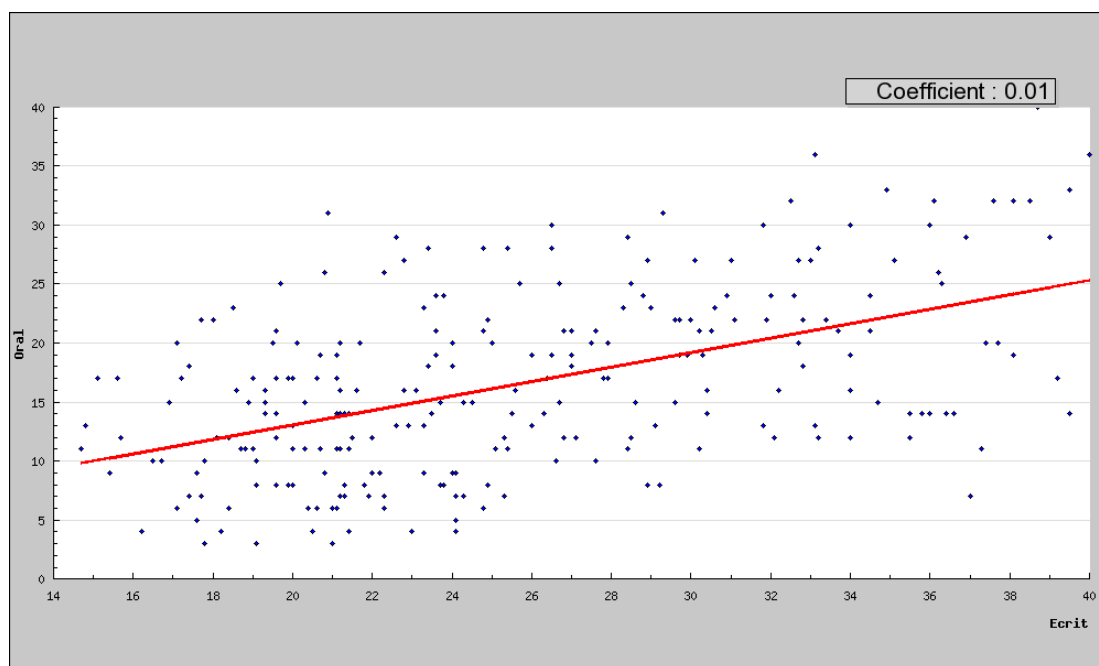
Distribution des notes d'oral des candidats admissibles pour le montage



Moyenne :	8.57
Ecart-type :	4.33

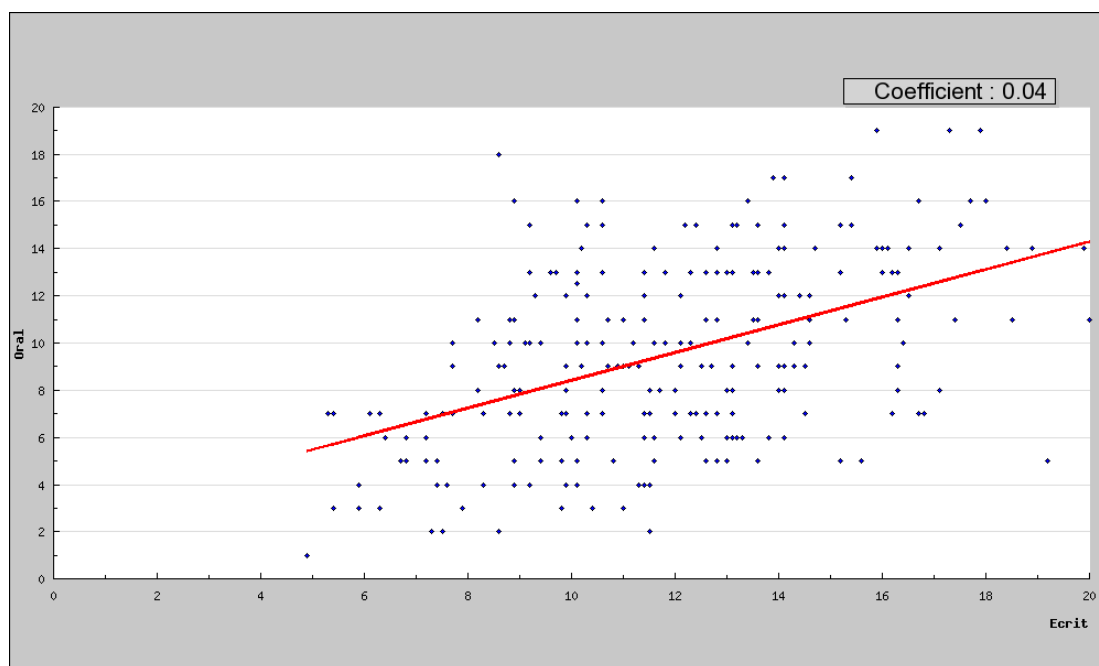
4-4 Corrélation épreuves écrites / épreuves orales

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



Coefficient : coefficient de corrélation

Composition de chimie / Leçon de chimie



Coefficient : coefficient de corrélation

ÉLECTROMAGNÉTISME

Préambule

Ce sujet comporte deux parties indépendantes :

- La première partie porte sur quelques aspects fondamentaux de l'électromagnétisme, notamment sur l'approximation des régimes quasi-stationnaires et ses conséquences sur la simplification des équations fondamentales de l'électromagnétisme.
- La deuxième partie est dédiée à l'étude de la propagation guidée dans un câble coaxial.

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

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

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

FORMULAIRE

Opérateurs vectoriels

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{\text{rot}}\vec{C}) = \overrightarrow{\text{grad}}(\text{div}\vec{C}) - \Delta\vec{C}$$

Opérateurs vectoriels en coordonnées cylindriques

$$\text{div}\vec{C} = \frac{1}{r} \frac{\partial(rC_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial C_z}{\partial z}$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{C} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial C_z}{\partial \theta} - \frac{\partial C_\theta}{\partial z} \right) \vec{u}_r + \left(\frac{\partial C_r}{\partial z} - \frac{\partial C_z}{\partial r} \right) \vec{u}_\theta + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(rC_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial C_r}{\partial \theta} \right) \vec{u}_z$$

$$\Delta f = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

$$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Première Partie

Quelques aspects fondamentaux de l'électromagnétisme

A. Des équations de Maxwell.

- I. Voici quelques-uns des plus éminents artisans de l'électromagnétisme classique : Coulomb, Ampère, Faraday, Maxwell, Hertz, Lorentz. Rappeler **brièvement** une des contributions de chacun à la construction de l'électromagnétisme.
- II. Énoncer les équations de Maxwell dans le vide en présence de charges et de courants. Pour chacune d'entre elles, en donner la forme intégrale. Suffisent-elles à rendre compte de tous les phénomènes électromagnétiques ? Si non, que faut-il leur adjoindre ?

B. De l'Approximation des Régimes Quasi-Stationnaires

L'objet de cette partie est de dégager précisément ce que recouvre l'approximation des régimes quasi-stationnaires en électromagnétisme (notée dorénavant ARQS). On commence par l'étude d'un exemple simple : la détermination du champ électromagnétique dans un condensateur plan en régime sinusoïdal forcé.

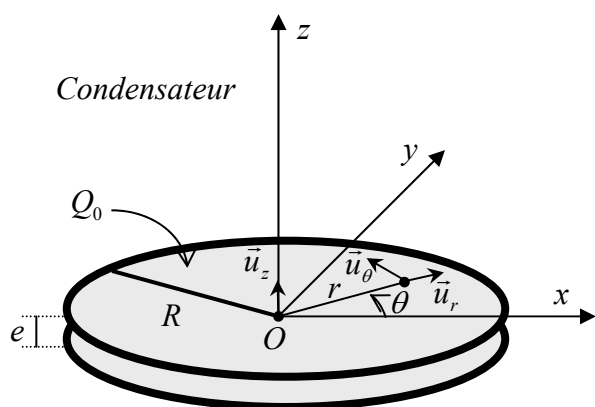


Figure 1. a

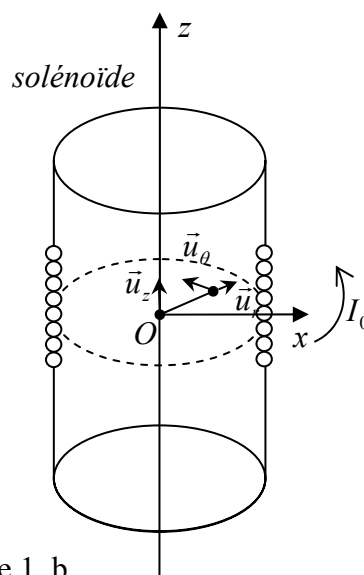


Figure 1. b

I. Condensateur plan en régime sinusoïdal forcé : première approche.

On considère un condensateur plan constitué de deux armatures planes de forme circulaire, d'axe Oz et de rayon R , distantes de e (figure 1. a). L'espace interarmatures est vide et la charge totale stockée sur l'armature supérieure du condensateur est donnée par : $Q(t) = Q_0 \exp(i\omega t)$, en notation complexe (Q_0 réel positif). On suppose que $R \gg e$, de sorte que l'on négligera tout effet de bord. Vu la géométrie du problème, on travaille en coordonnées cylindriques (r, θ, z) d'axe Oz .

On s'intéresse ici à un régime non stationnaire de fonctionnement, en l'occurrence un régime sinusoïdal forcé de pulsation ω . On se propose ici de déterminer le champ électromagnétique $[\vec{E}, \vec{B}]$ dans le condensateur par résolution directe d'une équation dans laquelle le couplage entre le champ électrique $\vec{E}$ et le champ magnétique $\vec{B}$ a disparu.

1. **a.** Par une analyse des symétries et invariances du problème, déterminer la forme a priori du champ électromagnétique $[\vec{E}, \vec{B}]$ entre les armatures.

Evaluer l'ordre de grandeur du rapport $\left| \frac{E_r}{E_z} \right|$ en supposant momentanément et en première approximation que $\vec{\text{rot}} \vec{E} = \vec{0}$.

Le fait de « négliger les effets de bords » signifie ici que $\left| \frac{E_r}{E_z} \right| \ll 1$, ce qu'on supposera dorénavant.

- b.** Justifier qu'il est légitime, compte tenu des hypothèses faites, de chercher le champ électromagnétique $[\vec{E}, \vec{B}]$ sous la forme :
$$\begin{cases} \vec{E} = E(r, t) \vec{u}_z \\ \vec{B} = B(r, t) \vec{u}_\theta \end{cases}$$

2. Montrer à partir des équations de Maxwell que la fonction $E(r, t)$ vérifie entre les

armatures l'équation : $\frac{\partial^2 E}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E}{\partial r} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$.

3. On cherche des solutions complexes de la forme : $\underline{E}(r, t) = E_0 e(r) \exp(i\omega t)$, où ω est la pulsation des oscillations et $e(0) = 1$. Etablir l'expression du champ du champ magnétique complexe $\underline{B}(r, t)$ en fonction de $e(r)$ en utilisant l'équation de Maxwell appropriée.

4. On définit la variable réelle $u = \frac{\omega r}{c}$. Etablir l'équation différentielle à laquelle obéit $e(u)$, **qu'on ne cherchera pas à résoudre**. La solution de cette équation s'écrit :

$$e(u) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(k!)^2} \left(\frac{u}{2} \right)^{2k}.$$

5. On désire maintenant trouver le développement perturbatif du champ électromagnétique $[\vec{E}, \vec{B}]$ à l'intérieur du condensateur. Alors que précédemment, nous sommes partis d'une équation aux dérivées partielles éliminant le couplage entre $\vec{E}$ et $\vec{B}$, nous cherchons ici une solution faisant apparaître ce couplage comme le cœur du problème. Bien évidemment, la forme du champ électromagnétique $[\vec{E}, \vec{B}]$ est la même que précédemment (voir B.I.1b), puisque les hypothèses sont les mêmes. En particulier, les effets de bord sont négligés. Pour plus de commodité nous travaillons, comme ci-dessus, en notation complexe. L'idée fondamentale du traitement est la suivante : à l'ordre le plus bas le champ électrique entre les armatures est approximativement uniforme (comme en électrostatique) soit en notation complexe : $\underline{\vec{E}}_0 = E_0 \exp(i\omega t) \vec{u}_z$, où E_0 est réel. Mais ce champ $\underline{\vec{E}}_0 = E_0 \exp(i\omega t) \vec{u}_z$ varie au cours du temps ; par conséquent, il crée un champ magnétique : $\underline{\vec{B}}_1 = \underline{B}_1(r, t) \vec{u}_\theta$. Ce champ $\underline{\vec{B}}_1 = \underline{B}_1(r, t) \vec{u}_\theta$ engendre à son tour un champ

électrique $\vec{E}_2 = E_2(r,t)\vec{u}_z$, qui crée lui-même un champ magnétique $\vec{B}_3 = B_3(r,t)\vec{u}_\theta$ qui engendre $\vec{E}_4 = E_4(r,t)\vec{u}_z \dots$ etc... Les termes de rang plus élevé sont des termes correctifs par rapport aux termes de rang plus bas : cette méthode itérative est qualifiée de « perturbative ».

a. Partant de la première expression approchée du champ électrique $\vec{E}_0 = E_0 \exp(i\omega t)\vec{u}_z$, calculer le champ magnétique $\vec{B}_1 = B_1(r,t)\vec{u}_\theta$ par application de l'équation de Maxwell-Ampère.

b. La présence du champ magnétique modifie le champ électrique : le champ magnétique $\vec{B}_1 = B_1(r,t)\vec{u}_\theta$ engendre un terme correctif $\vec{E}_2 = E_2(r,t)\vec{u}_z$ pour le champ électrique. De quel phénomène s'agit-il ? A l'aide de l'équation de Maxwell appropriée, calculer ce terme correctif $\vec{E}_2 = E_2(r,t)\vec{u}_z$. On ne retiendra que la solution nulle sur l'axe : pourquoi ?

c. Répéter ce développement pour aboutir à $\vec{B}_3 = B_3(r,t)\vec{u}_\theta$ puis $\vec{E}_4 = E_4(r,t)\vec{u}_z$.

d. Montrer alors que l'expression du champ électrique complexe $\underline{E}(r,t)$ à l'ordre 4 en $\frac{\omega r}{c}$ est donnée par : $\underline{E}(r,t) = E_0 \left(1 - \frac{1}{4} \left(\frac{\omega r}{c} \right)^2 + \frac{1}{64} \left(\frac{\omega r}{c} \right)^4 + \dots \right) \exp(i\omega t)$ et en déduire le développement limité de la fonction $e(u)$ à l'ordre 4.

e. Montrer que l'expression du champ magnétique complexe $\underline{B}(r,t)$ à l'ordre 3 en

$$\frac{\omega r}{c} \text{ est : } \underline{B}(r,t) = iB_0 \left(\frac{\omega r}{2c} - \frac{1}{16} \left(\frac{\omega r}{c} \right)^3 + \dots \right) \exp(i\omega t).$$

f. Etablir les expressions des amplitudes réelles E_0 et B_0 en fonction des paramètres du condensateur et les contraintes appliquées.

g. Commenter les expressions de $\underline{E}(r,t)$ et $\underline{B}(r,t)$ obtenues aux questions **d.** et **e.** en lien avec le résultat de la question **4.**

II. Solénoïde infini en régime sinusoïdal forcé.

On cherche ici à déterminer le champ électromagnétique $[\vec{E}, \vec{B}]$ créé par un solénoïde infini parcouru par une intensité $I(t) = I_0 \exp(i\omega t)$ en notation complexe (I_0 réel positif), comportant n spires jointives par unité de longueur, de section circulaire (figure 1.b).

1. Qu'entend-on par l'expression « solénoïde infini » ? Justifier qu'il est légitime, compte tenu des hypothèses faites, de chercher le champ électromagnétique $[\vec{E}, \vec{B}]$ sous la

$$\text{forme : } \begin{cases} \vec{E} = E(r,t)\vec{u}_\theta \\ \vec{B} = B(r,t)\vec{u}_z \end{cases}.$$

2. Trouver l'équation à laquelle obéit $B(r,t)$ et montrer qu'elle est analogue à celle obtenue pour $E(r,t)$ dans le cas du condensateur (B.I.2.) .

3. Dédurre sans calcul de la partie I que $\underline{B}(r,t) = B_0 e(u) \exp(i\omega t)$ ainsi que les expressions approchées des champs électromagnétiques complexes $\underline{B}(r,t)$ et $\underline{E}(r,t)$.
4. Etablir l'expression de B_0 et de E_0 en fonction de I_0 , E_0 étant l'amplitude réelle du champ électrique.

III. Considérations énergétiques en régime lentement variable

On fait maintenant l'hypothèse d'un régime « lentement variable », c'est-à-dire que l'on suppose que $\frac{\omega r}{c} \ll 1$ dans toutes les expressions calculées ci-dessus. On supposera négligeables tous les termes d'ordre supérieur ou égal à 2 dans l'expression des champs.

1. Evaluer en ordre de grandeur le domaine de fréquences correspondant à cette approximation pour les composants utilisés usuellement en montage d'électricité ou d'électronique.
2. Donner l'expression du champ électromagnétique $[\vec{E}, \vec{B}]$ à l'ordre le plus bas en $\frac{\omega r}{c}$ pour le condensateur d'une part, et pour le solénoïde d'autre part. Que peut-on dire, en ordre de grandeur, du rapport $\left| \frac{E}{cB} \right|$ pour $\frac{\omega r}{c} \ll 1$ dans le condensateur et le solénoïde ? Quel est le sens physique de ce résultat ?
3. Dans chacun de ces deux cas, donner l'expression de la densité volumique instantanée d'énergie électromagnétique $u_{em}(r,t)$ pour $\frac{\omega r}{c} \ll 1$. Quelle approximation est-il légitime de faire dans l'expression de $u_{em}(r,t)$, selon qu'il s'agit d'un condensateur ou à un solénoïde ? En comparant les expressions obtenues au cas de la densité d'énergie d'une onde électromagnétique dans le vide progressive plane, harmonique de pulsation ω , lequel des deux systèmes, parmi le condensateur et le solénoïde, qualifieriez-vous de système à dominante électrique ? magnétique ?
4. Calculer le vecteur de Poynting $\vec{\Pi}(r,t)$ dans le condensateur et dans le solénoïde, toujours pour $\frac{\omega r}{c} \ll 1$.
5. Effectuer un bilan énergétique global sur la zone d'espace correspondant à l'intérieur du condensateur d'une part, du solénoïde d'autre part. Commenter.

IV. L'Approximation des Régimes Quasi-Stationnaires : premier contact.

1. Dans l'hypothèse des régimes lentement variables énoncée et étudiée ci-dessus ($\frac{\omega r}{c} \ll 1$), déduire de ce qui précède que l'équation de Maxwell-Faraday pour un système « à dominante électrique » s'écrit de manière approchée sous la forme : $\overline{\text{rot}} \vec{E} = \vec{0}$. Que peut-on dire de l'équation de Maxwell-Ampère ?
2. De même, pour un système « à dominante magnétique », donner l'expression convenable des équations de Maxwell-Faraday et Maxwell-Ampère en régime lentement variable. Commenter.

3. Peut-on définir sans ambiguïté « l'Approximation des Régimes Quasi-Stationnaires » et formuler les équations de Maxwell de manière unique dans le cadre de cette approximation ?

V. Potentiels retardés. Définition de l'ARQS.

Nous nous proposons ici de donner la définition générale de l'ARQS avant d'envisager l'existence de deux limites « électrique » et « magnétique » de cette approximation, limites entrevues précédemment.

Soit une distribution de charges et de courants $[\rho, \vec{j}]$ de volume fini V . Cette distribution-source crée dans tout l'espace un champ électromagnétique $[\vec{E}, \vec{B}]$ régi par les équations de Maxwell.

1. Pourquoi peut-on définir un potentiel vecteur $\vec{A}$ et un potentiel scalaire V (formant le couple $[V, \vec{A}]$) dont dérive le champ électromagnétique $[\vec{E}, \vec{B}]$? Donner l'expression de $[\vec{E}, \vec{B}]$ en fonction de $[V, \vec{A}]$.
2. Pourquoi le couple $[V, \vec{A}]$ n'est-il pas défini de manière unique ? On utilise alors cette indétermination et on choisit d'imposer au couple $[V, \vec{A}]$ la condition de jauge de Lorentz. Donner la relation liant $\vec{A}$ et V correspondant à la jauge de Lorentz.
3. Démontrer, en jauge de Lorentz, les équations de propagation des potentiels V et $\vec{A}$. Leur solution dite « des potentiels retardés » s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} V(M, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint_V \frac{\rho\left(P, t - \frac{PM}{c}\right)}{PM} d^3\vec{r} \\ \vec{A}(M, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_V \frac{\vec{j}\left(P, t - \frac{PM}{c}\right)}{PM} d^3\vec{r} \end{array} \right. , \text{ où } M \text{ est un point où l'on évalue les potentiels et}$$

P désigne un point courant de la distribution-source de volume V .

4. Soit τ le temps caractéristique d'évolution des sources $[\rho, \vec{j}]$, et soit L l'ordre de grandeur caractéristique de la distance PM . On construit alors le nombre sans dimension $\alpha = \frac{L}{c\tau}$. Quel est le sens physique et la dimension de la grandeur $\frac{L}{c}$?

Par définition, l'ARQS consiste à supposer $\alpha \ll 1$. Est-ce le cas dans un montage d'électricité ou d'électronique usuel ? Dans le cas du transport de courant par ligne à haute tension ? Dans le cas du transport d'un signal TV dans un câble d'antenne à une fréquence de 500MHz par exemple ? Dans le cas du domaine de l'optique visible ?

5. Donner l'expression approximative des potentiels $[V, \vec{A}]$ dans l'ARQS. En déduire les équations locales « de Poisson » liant les sources $[\rho, \vec{j}]$ aux potentiels $[V, \vec{A}]$.

VI. Les deux limites de l'ARQS.

Nous venons de définir l'ARQS par la condition : $\alpha \ll 1$ avec $\alpha = \frac{L}{c\tau}$, L désignant la distance typique entre le point de mesure et la distribution-source, et τ le temps caractéristique d'évolution des sources $[\rho, \vec{j}]$.

Cependant, nous avons constaté sur l'exemple du condensateur plan et du solénoïde en régime sinusoïdal que l'ARQS ne se manifeste pas de la même manière selon que le système est à dominante électrique ou magnétique. Nous allons ici mettre en évidence de manière générale l'existence de deux limites « électrique » et « magnétique » de cette approximation.

Nous noterons dans toute cette partie $\tilde{\rho}$, $\tilde{j}$, $\tilde{E}$, $\tilde{B}$, $\tilde{V}$ et $\tilde{A}$ les ordres de grandeur respectifs de $|\rho|$, $\|\vec{j}\|$, $\|\vec{E}\|$, $\|\vec{B}\|$, $|V|$ et $\|\vec{A}\|$.

Soit $d \leq L$, la distance typique sur laquelle varient les champs $[\vec{E}, \vec{B}]$ et les potentiels $[V, \vec{A}]$.

Outre le nombre sans dimension ε déjà introduit, nous définissons un autre nombre sans dimension : $\beta = \frac{\tilde{j}}{c\tilde{\rho}}$.

1. Montrer que β est bien sans dimension. Donner l'ordre de grandeur de $\tilde{V}$ et $\tilde{A}$ en fonction notamment de $\tilde{\rho}$, $\tilde{j}$, V (volume de la distribution-source) et L . En déduire l'expression du rapport $\frac{c\tilde{A}}{\tilde{V}}$ en fonction de β .

2. Régime quasi-stationnaire électrique.

Considérons une situation quasi-stationnaire ($\alpha \ll 1$) où l'effet des charges est beaucoup plus important que celui des courants ($\beta \ll 1$).

a. Comparer en ordre de grandeur $-\overrightarrow{\text{grad}} V$ et $-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$. En déduire l'expression approchée du champ électrique $\vec{E}$ ainsi que la forme approchée que prend l'équation de Maxwell-Faraday sous ces hypothèses. Commenter.

b. Que peut-on dire de l'équation de Maxwell-Ampère ?

c. Evaluer le rapport $\frac{c\tilde{B}}{\tilde{E}}$ et dire pourquoi cette situation est qualifiée de limite « électrique ».

d. Peut-on simplifier l'écriture de la condition de jauge de Lorentz dans cette limite électrique de l'ARQS ? Si oui comment ?

e. Peut-on simplifier l'équation locale de conservation de la charge dans cette limite électrique de l'ARQS, et comment ? Commenter.

- 3.** En supposant seulement que la condition $\alpha \ll 1$ est remplie, montrer que :

$$\vec{\text{rot}} \vec{B} \approx \mu_0 \vec{j} - \frac{1}{c^2} \overrightarrow{\text{grad}} \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right).$$

4. Régime quasi-stationnaire magnétique.

Considérons maintenant une situation quasi-stationnaire ($\alpha \ll 1$) où l'effet des charges est beaucoup plus faible que celui des courants ($\beta \gg 1$).

- a.** Comparer en ordre de grandeur $-\frac{1}{c^2} \overrightarrow{\text{grad}} \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)$ et $\mu_0 \vec{j}$. En déduire la forme approchée

que prend l'équation de Maxwell-Ampère sous ces hypothèses. Commenter.

- b.** Que peut-on dire de l'équation de Maxwell-Faraday ? Comment s'exprime le champ $\vec{E}$ en fonction des potentiels, sous ces hypothèses ?

- c.** Evaluer le rapport $\frac{\vec{E}}{c\vec{B}}$ et dire pourquoi cette situation est qualifiée de limite « magnétique ».

- d.** Que peut-on dire de la condition de jauge de Lorentz dans cette limite magnétique de l'ARQS ? Commenter.

- e.** Que peut-on dire de l'équation locale de conservation de la charge dans cette limite magnétique de l'ARQS ? Commenter.

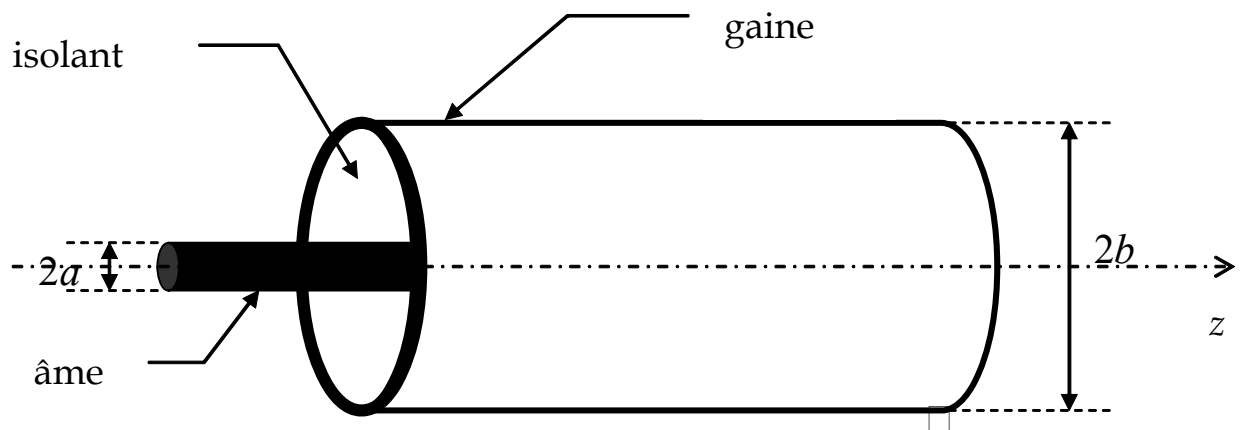
- 5.** Laquelle de ces deux limites de l'ARQS est la plus fréquente expérimentalement et est la plus connue ? Pour quelle raison fondamentale ?

Deuxième Partie

Propagation guidée dans un câble coaxial

L'objet de cette Deuxième Partie est l'étude théorique et expérimentale des phénomènes de propagation dans un câble coaxial. Celui-ci est constitué de deux cylindres conducteurs coaxiaux de section circulaire, de rayons respectifs a et b ($a < b$) de très grande longueur, séparés par un isolant. Le cylindre central (« l'âme ») est plein tandis que le cylindre extérieur (« la gaine ») est creux (figure 2):

Figure 2



Les dimensions du câble sont les suivantes : $a = 0,43$ mm et $b = 1,47$ mm.

L'isolant est un milieu diélectrique non magnétique de permittivité diélectrique relative constante $\epsilon_r = 2,25$. On travaille en coordonnées cylindriques (r, θ, z) d'axe Oz , Oz étant l'axe du câble coaxial.

Après un rappel de quelques unes des propriétés de propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu diélectrique (partie A), nous chercherons un modèle électrocinétique simple permettant de rendre compte des phénomènes de propagation observés jusqu'à des fréquences de l'ordre de quelques dizaines de MHz (partie B) dans le câble coaxial. Ce modèle est fondé sur une hypothèse particulière relative à la structure du champ électromagnétique $[\vec{E}, \vec{B}]$ se propageant dans l'isolant occupant l'espace interconducteurs. Son étude fait l'objet de la partie **B**.

A. Préambule : Propagation d'une onde électromagnétique dans un diélectrique infini

On s'intéresse dans cette partie **A**. au champ électromagnétique à l'intérieur d'un diélectrique infini.

1. Rappeler les quatre équations de Maxwell reliant $\vec{E}$, $\vec{D}$ et $\vec{B}$ aux densités de charge libres ρ_{lib} et de courant libre $\vec{j}_{lib}$ dans le diélectrique, $\vec{D}$ étant le vecteur déplacement électrique dans le milieu.

2. Le milieu diélectrique est supposé parfait, linéaire, homogène et isotrope, de permittivité diélectrique relative ϵ_r indépendante de la fréquence. Ecrire la relation reliant $\vec{E}$ et $\vec{D}$. En déduire l'écriture des quatre équations de Maxwell impliquant $\vec{E}$ et $\vec{B}$ uniquement (sans faire intervenir $\vec{D}$). Que deviennent-elles en absence de charges et de courants libres?

3. Montrer que des ondes planes de la forme
$$\begin{cases} \vec{E} = \vec{E}_0 \exp i(\omega t - kz) \\ \vec{B} = \vec{B}_0 \exp i(\omega t - kz) \end{cases}$$
 peuvent se propager

dans ce type de milieu. $\vec{k} = k \vec{u}_z$ est le vecteur d'onde dont on déterminera le module k . Caractériser la structure de ces ondes planes.

B. Mode TEM d'un câble coaxial : étude théorique et expérimentale

On aborde maintenant l'étude de la propagation le long du câble coaxial. On suppose ici que le champ électromagnétique dans le milieu isolant occupant l'espace interconducteurs est de

la forme
$$\begin{cases} \vec{E} = E_0(r, z) \exp i(\omega t - kz) \vec{u}_r \\ \vec{B} = B_0(r, z) \exp i(\omega t - kz) \vec{u}_\theta \end{cases}$$

Cela revient à considérer une solution particulière des équations de Maxwell, dite « mode Transverse Electrique et Magnétique » se propageant suivant l'axe Oz avec un vecteur d'onde $\vec{k} = k \vec{u}_z$.

I. Etude du mode TEM dans le cas d'un câble idéal.

On suppose en outre dans les seules parties I, II et III que les conducteurs sont parfaits.

1. En quoi consiste le modèle du conducteur parfait ? Qu'est-ce que cela implique relativement aux charges et aux courants ?
Les fonctions $E_0(r, z)$ et $B_0(r, z)$ doivent-elles satisfaire des conditions aux limites particulières en $r = a$ et $r = b$? On justifiera la réponse.
Justifier que, moyennant l'hypothèse des conducteurs parfaits, les deux fonctions $E_0(r, z)$ et $B_0(r, z)$ sont en fait indépendantes de la variable z .

Le champ électromagnétique complexe dans le milieu isolant entre les deux conducteurs s'écrit alors :

$$\begin{cases} \vec{E} = E_0(r) \exp i(\omega t - kz) \vec{u}_r \\ \vec{B} = B_0(r) \exp i(\omega t - kz) \vec{u}_\theta \end{cases}$$

$E_0(r)$ et $B_0(r)$ sont supposés réels.

2. Pourquoi cette solution particulière est-elle nommée « mode Transverse Electrique et Magnétique » ? Donner la relation de structure liant le champ magnétique $\vec{B}$ et le champ électrique $\vec{E}$? Commenter.

3. En utilisant l'équation de Maxwell adéquate, montrer que $E_0(r) = E_a \frac{a}{r}$, où E_a est l'amplitude du champ électrique en $r = a$. En déduire l'expression de $B_0(r)$.
4. Calculer la vitesse de phase v_ϕ de cette onde en fonction notamment de la permittivité relative ε_r du milieu. Y a-t-il dispersion ?
5. Calculer le vecteur de Poynting et la densité volumique d'énergie instantanée dans le diélectrique. En déduire la vitesse de propagation de l'énergie.
6. Calculer la puissance moyenne se propageant le long du câble.

II. Grandeurs électrocinétiques caractéristiques du câble idéal dans le mode TEM.

On se propose de montrer ici que le câble coaxial idéal utilisé dans son mode TEM peut être modélisé de manière simple en définissant un certain nombre de grandeurs électrocinétiques.

1. En intégrant l'équation de Maxwell-Ampère le long d'un contour judicieusement choisi, montrer que l'âme est parcourue par un courant d'intensité complexe $\underline{I}(z, t)$ que l'on exprimera. Calculer l'intensité complexe du courant parcourant la gaine. Commenter le résultat obtenu.
2. A z et t fixés, on définit la tension (complexe) $\underline{U}(z, t)$ entre l'âme et la gaine par la relation : $\underline{U}(z, t) = - \int_{\text{gaine}}^{\text{âme}} \vec{E}(r, z, t) \cdot d\vec{l}$, où l'on fait circuler le champ électrique (complexe) le long d'une courbe contenue dans le plan de cote z fixée.
Montrer que $\underline{U}(z, t)$ est indépendante du chemin d'intégration choisi et la calculer. Pour autant, peut-on dire que le champ électrique $\vec{E}$ dérive d'un potentiel scalaire $V(r, z, t)$? On motivera la réponse.
3. Calculer le rapport $Z_C = \frac{\underline{U}(z, t)}{\underline{I}(z, t)}$. Que remarque-t-on ? Effectuer l'application numérique.
Comment appelle-t-on cette grandeur ? Pouvez-vous citer d'autres exemples en physique ondulatoire où ce type de grandeur apparaît ?
4. Considérons maintenant une portion de câble comprise entre les cotes z et $z + dz$. On choisit dz suffisamment petit pour pouvoir considérer que la portion de longueur dz est localement dans l'ARQS. Peut-on parler ici de limite électrique ou magnétique de l'ARQS ? On justifiera la réponse.
5. Calculer l'énergie magnétique $dU_{\text{mag}}(z, t)$ contenue dans la portion de câble de longueur dz . En déduire une définition et l'expression de l'inductance propre linéique Λ du câble. Application numérique.

6. De même, calculer l'énergie $dU_{\text{elec}}(z, t)$ contenue dans le champ électrique régnant l'isolant de la portion de câble. En déduire une définition et l'expression de la capacité linéique Γ du câble. Application numérique.
7. Exprimer Z_C en fonction de Λ et Γ .

III. Modèle électrocinétique à constantes réparties et aspects expérimentaux.

1. Proposer un schéma électrocinétique équivalent à la portion de câble comprise entre les abscisses z et $z + dz$ considérée dans la partie II. On fera apparaître sur le schéma les grandeurs : $U(z, t)$, $U(z + dz, t)$, $I(z, t)$ et $I(z + dz, t)$, et on exprimera les dipôles électrocinétiques intervenant dans la modélisation en fonction de Λ et Γ .
2. Ecrire les deux équations aux dérivées partielles couplant les variations spatiales et temporelles de $U(z, t)$ et $I(z, t)$. En déduire l'équation de propagation régissant $U(z, t)$ et $I(z, t)$. Donner l'expression et la valeur numérique de la célérité v des ondes de tension et de courant ? Commenter.

3. Propagation d'une impulsion de tension le long du câble :

On connecte le câble coaxial en $z = 0$ à un générateur d'impulsions dont l'impédance interne est résistive et vaut : $R_g = 50 \Omega$. On dispose d'un potentiomètre de résistance variable de valeur R_C que l'on connecte à l'autre extrémité du câble en $z = L$ ($L = 100 \text{ m}$).

- a) Ecrire la condition aux limites en $z = L$. Calculer le coefficient de réflexion en $z = L$ pour l'onde de tension en fonction de Z_C et R_C .
- b) Quel est l'intérêt d'utiliser un générateur dont l'impédance interne vaut $R_g = 50 \Omega$?
- c) On observe la tension en $z = 0$ au moyen d'un oscilloscope. On suppose les impulsions périodiques de période $T = 5 \mu\text{s}$ et de durée $\tau \ll \frac{2L}{v} < T$. Qu'observe-t-on à l'écran dans les trois cas suivants :
 - (i) $R_C = 50 \Omega$;
 - (ii) l'extrémité $z = L$ du câble est en circuit ouvert ;
 - (iii) on court-circuite l'extrémité $z = L$ du câble.

On fera un schéma correspondant à chaque cas.

- d) On se place dans le cas (ii) précédent et on mesure un intervalle de temps $\Delta t = 1025 \text{ ns}$ entre le premier pic et le second pic appartenant au même « train » d'impulsions. En déduire la valeur expérimentale de v . Comparer à la valeur prévue par la théorie.

4. Ondes stationnaires sinusoïdales.

On alimente maintenant le câble en $z = 0$ par un générateur de signaux sinusoïdaux dont l'impédance interne vaut toujours $R_g = 50 \Omega$. On considérera ici que l'extrémité $z = L$ du câble est soit en circuit ouvert, soit en court-circuit.

a) Circuit ouvert.

Le câble étant en circuit ouvert en $z = L$, montrer que l'onde de tension est de la forme : $U(z, t) = V_0 \cos(k(z - L)) \cos(\omega t - kL)$. Donner l'expression de l'onde de courant $I(z, t)$. Commenter ce résultat.

On fait varier la fréquence de la source et on observe la tension en $z = 0$ à l'aide d'un oscilloscope. On constate alors que l'amplitude de celle-ci est maximale aux fréquences suivantes :

fréquence f(MHz)	0,94	1,93	2,88	3,92	4,82	5,84	6,82
------------------	------	------	------	------	------	------	------

Interpréter qualitativement et quantitativement ces observations.

b) Court-circuit.

Le câble est maintenant court-circuité en $z = L$. Donner l'expression de l'onde de tension $U(z, t)$ et de l'onde de courant $I(z, t)$.

On procède comme précédemment, et on observe des maxima d'amplitude en $z = 0$ aux fréquences suivantes :

fréquence f(MHz)	0,55	1,44	2,44	3,58	4,36	5,53	6,30
------------------	------	------	------	------	------	------	------

Interpréter qualitativement et quantitativement ces observations.

- c) A partir des mesures effectuées ci-dessus, pouvez-vous proposer une méthode de mesure de la célérité v des ondes dans le câble ? Application numérique.

IV. Pertes dues aux conducteurs.

On se propose ici de prendre en compte l'amortissement des ondes se propageant le long du câble du fait que les conducteurs ne sont pas idéaux : en effet, la conductivité n'étant pas infinie, le champ électromagnétique pénètre dans les conducteurs et les courants ne sont pas superficiels, donnant lieu à une dissipation d'énergie par effet Joule.

1. Effet de peau dans les métaux

Rappeler qualitativement les phénomènes physiques qui ont lieu quand une onde électromagnétique arrive sur une surface métallique. Comment varie l'amplitude d'une onde se propageant dans un métal (on n'effectuera aucun calcul) ? Qu'est-ce que l'effet de peau ? Comment varie l'épaisseur caractéristique δ de cet effet en fonction de σ , conductivité du métal et de ω , pulsation de l'onde ?

2. Distribution du courant dans un fil conducteur cylindrique.

Afin de quantifier les pertes par effet Joule dans le câble coaxial, on commence par s'intéresser à la répartition de la densité de courant et du champ électrique dans un simple fil conducteur plein et cylindrique, ayant une conductivité σ , un rayon a et une grande longueur. Le fil transporte (dans l'ARQS) un courant d'intensité complexe :

$\underline{I}(t) = I_0 \exp(i\omega t)$. On cherche à déterminer $\underline{\vec{E}}(r, t) = E(r) \exp(i\omega t) \vec{u}_z$ et $\underline{\vec{j}}(r, t) = j(r) \exp(i\omega t) \vec{u}_z$ à l'intérieur du fil.

a) On donne la conductivité du cuivre : $\sigma = 5,9 \cdot 10^7 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Quelle approximation peut-on faire concernant la densité de courant de déplacement et la densité de courant de conduction dans le métal ? Jusqu'à quelle fréquence cette approximation est-elle justifiée ? Commenter. Dorénavant, on suppose cette approximation valide.

b) Montrer que $E(r)$ est régi par l'équation aux dérivées partielles :

$$\frac{d^2 E}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dE}{dr} = i\mu_0 \sigma \omega E(r).$$

c) On suppose que dans le cuivre et aux fréquences de travail (~ 10 MHz) $\delta \ll a$. Quelle nouvelle approximation peut-on raisonnablement faire dans l'équation précédente ? En déduire que le champ électrique s'écrit, dans le conducteur :

$$\underline{\vec{E}}(r, t) \approx \frac{1+i}{2\pi a \sigma \delta} I_0 \exp\left(-\frac{a-r}{\delta}\right) \exp\left[i\left(\omega t - \frac{a-r}{\delta}\right)\right] \vec{u}_z,$$
 où l'expression de δ est à déterminer.

d) Calculer numériquement δ . L'hypothèse précédente est-elle justifiée ?

e) Calculer la puissance moyenne cédée par le champ aux charges de la portion située entre les abscisses z et $z + dz$ du conducteur. En déduire que la résistance linéique de celui-ci s'écrit : $\rho_0 = \frac{1}{\sigma 2\pi a \delta}$. Commenter ce résultat. Comment varie la résistance linéique ρ_0 en fonction de la fréquence ?

3. Bilan énergétique sur une portion de câble coaxial.

On souhaite transposer les résultats obtenus ci-dessus sur le fil conducteur simple au cas de l'âme du câble coaxial utilisé dans son mode TEM ainsi que sa gaine supposée épaisse, afin de compléter le modèle électrocinétique élaboré au III.

a) Dans le mode TEM, l'onde se propageant dans l'isolant est transverse électrique, tandis qu'on a vu ci-dessus que la présence de courants circulant selon $\vec{u}_z$ implique l'existence d'une composante E_z du champ électrique dans le conducteur. Comparer numériquement l'amplitude maximale du champ électrique dans le conducteur et l'amplitude maximale E_0 du champ électrique de l'onde se propageant le long du câble. Commenter.

Pour tenir compte de la dissipation dans l'âme et la gaine, on suppose maintenant que l'onde de courant se propageant dans l'âme est de la forme : $\underline{I}(z, t) = I_0(z) \exp[i(\omega t - kz)]$, où $I_0(z)$ est une fonction réelle positive décroissante. On suppose tous les résultats montrés au (I) transposables.

b) Montrer que la puissance moyenne $\langle dP_J \rangle$ dissipée par effet Joule dans le tronçon de câble compris entre les abscisses z et $z + dz$ s'écrit : $\langle dP_J \rangle = \frac{1}{2} \frac{I_0^2(z) dz}{\sigma 2\pi \delta} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$. Que vaut la résistance ρ par unité de longueur de câble ?

c) Effectuer un bilan énergétique sur le tronçon $[z, z + dz]$ et montrer que la fonction

$$I_0(z) \text{ vérifie l'équation différentielle : } \frac{dI_0}{dz} + \frac{1}{\ell} I_0(z) = 0 \text{ où } \ell = \frac{2\sigma\delta}{\varepsilon_0 c \sqrt{\varepsilon_r}} \frac{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b}}. \text{ Interpréter}$$

cette grandeur. Comment varie ℓ avec la fréquence ? Existe-t-il une valeur du rapport $\frac{b}{a}$ qui maximise ℓ à fréquence donnée ? Commenter en lien avec les données numériques du problème. Calculer ℓ numériquement pour $f = 1 \text{ MHz}$ et $f = 100 \text{ MHz}$.

4. *Modèle électrocinétique avec pertes.*

a) Proposer une modification du schéma électrocinétique élaboré en (III.1), incluant la résistance linéique ρ du câble. Donner l'équation de propagation vérifiée par l'onde de tension $U(z, t)$ et l'onde de courant $I(z, t)$. On fera apparaître la célérité v introduite au (III.2) et le coefficient $D = \frac{1}{\rho\Gamma}$ que l'on interprétera.

b) Donner la relation de dispersion des ondes progressives harmoniques de la forme $A \exp[i(\omega t - kz)]$. On fera apparaître le rapport $\frac{\rho}{\Lambda\omega}$ que l'on exprimera en fonction de δ , a et b . Le calculer numériquement pour $f = 1 \text{ MHz}$, $f = 10 \text{ MHz}$ et $f = 100 \text{ MHz}$.

c) Jusqu'à quel ordre faut-il pousser le développement en puissances de $\frac{\rho}{\Lambda\omega}$ pour voir apparaître un comportement dispersif ? Calculer la vitesse de phase v_ϕ et la vitesse de groupe v_g . Conclusion ?

d) Qu'en est-il de l'absorption ? Comparer aux résultats obtenus au (B. IV. 3. e.).

e) Le câble étant fermé sur une résistance de 50Ω , voici les coefficients d'atténuation $\alpha = \exp\left(-\frac{L}{\ell}\right)$ mesurés sur un câble de 100 m de long pour des fréquences variant de 1 MHz à 10 MHz.

$f(\text{MHz})$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
α	0,81	0,75	0,70	0,66	0,63	0,61	0,58	0,56	0,54	0,52

Mettre en évidence graphiquement la loi expérimentale donnant le coefficient $\frac{L}{\ell}$ en fonction de la fréquence. Commenter.

06. Rapport relatif à la composition de physique

Généralités et commentaires portant sur l'ensemble du sujet

Cette épreuve porte sur deux aspects de l'électromagnétisme et est donc divisée en deux parties indépendantes.

La première propose une discussion approfondie de ce qu'on nomme communément l'Approximation des Régimes Quasi-Stationnaires et une mise au point sur ce sujet avec les deux limites, électrique et magnétique¹. Après un court préambule historique, deux exemples « duaux » sont proposés. Il s'agit du condensateur plan et du solénoïde infini, tous deux en régime forcé sinusoïdal. Il en émerge progressivement l'idée d'une ARQS présentant deux caractères dominants. L'étude approfondie de ces deux régimes, électrique et magnétique, est ensuite envisagée et on est en mesure de conclure quant à la prédominance usuelle du régime magnétique.

La seconde partie s'attache à explorer divers points de vue relatifs à la propagation guidée dans un câble coaxial, composant d'utilisation courante. Une modélisation systématique de la propagation dans un tel guide est proposée. L'étude se limite au mode transverse électrique et magnétique (TEM). Il s'agit de faire comprendre les fondements du modèle électrocinétique (avec ou sans pertes), largement et souvent utilisé pour décrire la propagation du mode TEM. Une discussion et une interprétation de résultats expérimentaux sont enfin demandées aux candidats.

Le jury rappelle deux points importants :

Tout d'abord, il est en droit d'attendre de la part de futurs enseignants une qualité de rédaction minimale (cohérence et présentation), un niveau de correction linguistique suffisant (orthographe et syntaxe) ainsi qu'une réelle aisance dans l'expression. Il s'avère que des progrès restent à accomplir dans ce domaine.

Ensuite, le jury apprécie les candidats faisant l'effort d'aller au fond d'un problème, au lieu de papillonner d'une question à l'autre dans l'espoir (assez vain) de grappiller quelques points. Cette façon de faire, c'est-à-dire à rester à la surface des choses, n'est d'ailleurs pas réellement payante. Au contraire, à titre d'exemple, quelques candidats ont traité correctement quasiment toute la Partie I ou toute la Partie II, pratiquement sans aborder l'autre. Ils se sont vus attribuer une excellente note.

Comme les autres années, les correcteurs ont eu le plaisir d'avoir entre leurs mains d'excellentes copies qui prouvent que leurs auteurs possèdent à la fois une profonde connaissance du sujet ainsi que le savoir-faire nécessaire qui en permet la maîtrise. Malheureusement, les copies faibles restent encore trop nombreuses. Le souhait du jury et l'objectif de ce rapport sont qu'elle les soient moins.

¹ On pourra à ce sujet consulter avec profit les articles suivants :

- DOMPS A. Remarques sur l'approximation des régimes quasi-stationnaires en électromagnétisme. Bull. Un. Phys., février 2003, vol. 97, n° 851 (2), p. 159-170.

- DOMPS A. et ROUSSEAUX G. Remarques supplémentaires sur l'approximation des régimes quasi-stationnaires en électromagnétisme. Bull. Un. Phys., novembre 2004, vol. 98

Commentaires spécifiques à certaines questions

Première Partie : Quelques aspects fondamentaux de l'électromagnétisme

A. Des équations de Maxwell.

I. Cette très brève question d'histoire des sciences est convenablement traitée. Toutefois, trop de candidats ont tendance à délayer leur réponse sur plusieurs pages. Il est pourtant évident que, dans une telle question, on attend un exposé en quelques lignes des idées clés.

II. L'électromagnétisme classique ne peut pas reposer uniquement sur les équations de Maxwell. Il faut leur adjoindre la loi de force de Lorentz ou un postulat énergétique (expression et signification physique du vecteur de Poynting par exemple).

B. De l'Approximation des Régimes Quasi-Stationnaires

I.1.a Il n'est pas possible, en régime variable, de dissocier l'étude des propriétés de symétrie des champs électrique et magnétique : ils sont en effet créés par une seule et même source comportant charges et courants. Cela doit être pris en compte dans la discussion portant sur les symétries. En outre, des arguments fondés sur l'analyse des plans de symétrie et l'intersection de ceux-ci conduisent trop souvent par un raisonnement fallacieux au bon résultat (qui était donné). Enfin, l'orthogonalité des champs électrique et magnétique est souvent été invoquée. Il est vrai qu'elle est fréquente dans les systèmes présentant un haut degré de symétrie. Mais elle n'a aucun caractère fondamental ni ne découle des équations vérifiées par les rotationnels des champs électrique et magnétique.

I.5.d. Les candidats ayant procédé à une exégèse de la formule donnant le champ électrique et ayant remonté les calculs pour répondre aux questions précédentes sans comprendre ce qu'ils faisaient, n'ont évidemment pas été récompensés.

II.1. Le solénoïde infini ne peut être défini qu'en comparant deux longueurs.

III.3 et 4. Les grandeurs instantanées complexes comme les champs électrique et magnétique ainsi que les courants sont à peu près maîtrisées et correctement utilisées. Il n'en est malheureusement pas de même des grandeurs énergétiques. Trop de candidats multiplient sans précautions des grandeurs complexes et rendent le résultat obtenu réel de façon plus ou moins explicite ou illicite.

Une telle erreur n'est pas admissible à ce niveau de recrutement. Les futurs candidats devront réfléchir aux hypothèses autorisant, ou non, l'emploi de la notation complexe. Il s'agit d'un point important mais surtout d'ordre technique qu'il n'est pas très difficile de maîtriser pourvu qu'on y consacre un peu de temps.

IV.1, 2 et 3. On attend ici une simple relecture des résultats obtenus dans les deux cas du condensateur et du solénoïde, pour mettre au jour les deux limites de l'ARQS.

VI. Cette question constitue l'aboutissement de la partie I. Elle est hélas peu réussie. Il s'avère que trop de candidats sont peu habitués à raisonner en termes d'ordres de grandeur. C'est pourtant là une compétence essentielle d'un physicien.

Par ailleurs, ordre de grandeur ne signifie pas absence de rigueur. Rappelons que pour les vecteurs, les notions d'inégalité (ou de relation d'ordre) et de rapport n'ont aucun sens.

Enfin, des inégalités affirmées sans justification et sans explicitation de leur dépendance par rapport aux paramètres sans dimension α et β ne sont pas satisfaisantes.

VI.3. On pourrait penser que l'équation de Maxwell-Ampère permet de donner la réponse à cette question. Il n'en est rien. Cela a probablement égaré les candidats.

La solution est fournie grâce à l'utilisation conjointe de la jauge de Lorentz et de la définition de l'ARQS. Une autre démonstration, physiquement équivalente mais peut-être plus concrète, passe par une distinction soignée entre les échelles de variation des champs et les longueurs caractéristiques.

VI.5. Beaucoup de candidats pensent que l'ARQS électrique est plus fréquente, car « les effets du champ magnétique sont négligeables devant ceux du champ électrique ».

Cela est vrai dans certaines conditions qui ne sont pas vérifiées ici. La notion clé est la neutralité des conducteurs, ce qui conduit à la conclusion inverse.

Deuxième Partie : Propagation guidée dans un câble coaxial

B. Mode TEM d'un câble coaxial : étude théorique et expérimentale

I.1 Peu de candidats ont vu que le champ électrique étant radial, et le champ magnétique orthoradial, aucune contrainte ne leur était imposée par les conditions aux limites. La non-dépendance en z des amplitudes traduisait simplement l'absence de dissipation.

I.2. Le fait que les champs électrique et magnétique vérifient la relation $\vec{B} = \vec{k} \times \vec{E} / \omega$ n'implique pas que l'onde est plane. Ce n'était manifestement pas le cas ici.

I.5 Même remarque que ci-dessus pour les grandeurs énergétiques complexes.

III.3 et 4. Peu de candidats semblent avoir effectué des expériences de propagation d'ondes le long d'un câble coaxial. Il est clair que ceux qui disposaient d'un savoir-faire expérimental étaient avantagés par rapport aux autres dans ces questions. Le jury rappelle donc que les épreuves écrites peuvent aussi tester des compétences expérimentales.

IV. Cette partie se proposait de prendre en compte la dissipation due à l'effet Joule dans les conducteurs. Elle était plus délicate que les précédentes. Elle a néanmoins été abordée avec succès par quelques brillants candidats.

ETUDE CHIMIQUE D'UN SUPPORT DE MEMOIRE OPTIQUE

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Les disques optiques (CD, DVD, ...) font partie de notre quotidien. Il existe plusieurs types de supports pour l'enregistrement optique. La Figure 1 représente schématiquement les structures de différents types de CD. Dans ces supports, constitués majoritairement de polymères, l'information est le plus souvent inscrite sous formes de crêneaux ("creux" et "bosses"). La lecture de l'information s'effectue au moyen d'un faisceau laser qui pénètre dans le disque par l'une des faces. Ce faisceau est réfléchi à l'intérieur du disque, puis est envoyé sur un détecteur situé dans la tête de lecture. La réponse du détecteur est différente, selon que le faisceau a traversé (ou rencontré) un "creux" ou une "bosse".

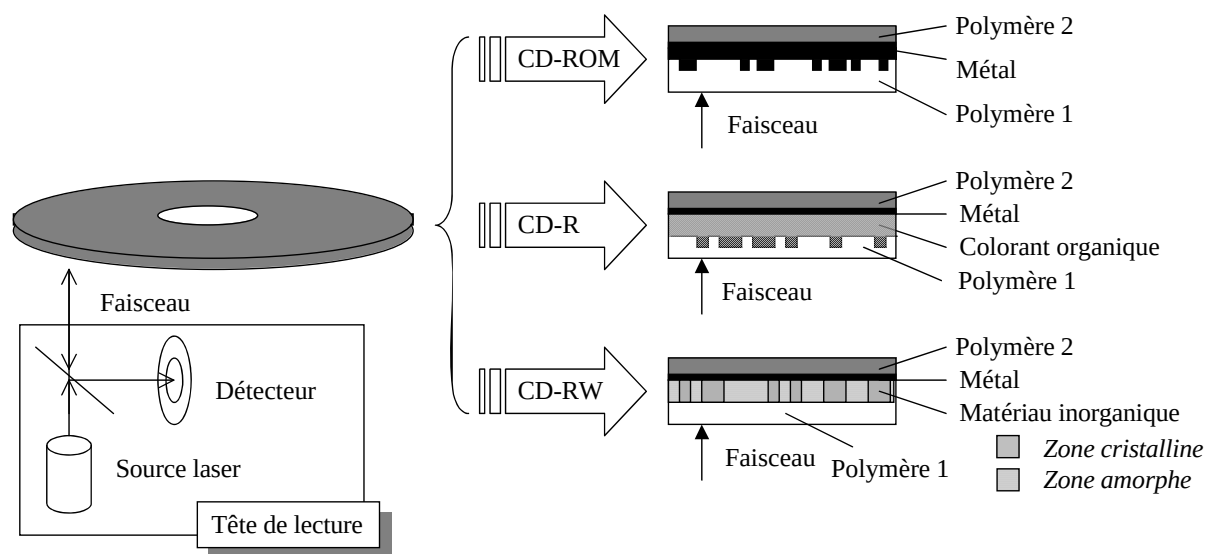


Figure 1. Schéma de principe de quelques disques optiques (certaines couches ont été omises par souci de clarté).

La structure, les matériaux utilisés et les mécanismes intervenant dans l'écriture des données diffèrent d'un type de support à l'autre :

- **CD-ROM**. Il s'agit de disques qui contiennent déjà des données lorsqu'ils sont vendus au consommateur. Ces données, non modifiables, sont transférées par pressage d'un disque de polymère ("Polymère 1") à partir d'une matrice parsemée de "creux" et de "bosses". Le dépôt de métal comble les "creux".
- **CD-R**. Il s'agit de disques qui ne contiennent pas de données lorsqu'ils sont vendus au consommateur. A l'origine, l'interface "Polymère 1"- "Colorant organique" est plane. Le consommateur y inscrit des données en créant des "creux" et des "bosses" à l'aide d'un graveur de CD, qui brûle localement la couche de colorant organique. Cette transformation étant irréversible, les données inscrites ne sont pas modifiables.
- **CD-RW**. Il s'agit de disques qui ne contiennent pas de données lorsqu'ils sont vendus au consommateur. A l'aide d'un graveur, on y inscrit des données en modifiant localement l'état du matériau inorganique (passage cristallin-amorphe). Cette transformation étant réversible, ces données sont effaçables et modifiables. L'interface "Polymère 1"- "Matériau inorganique" reste plane. L'inscription des données ne provoque pas la création de "creux" et de "bosses",

mais la réflexion du disque est différente selon que le faisceau tombe sur une zone cristalline ou une zone amorphe.

Dans ces trois exemples, le "Polymère 1" constitue la face transparente en regard de la tête de lecture et le "Polymère 2" la face protectrice, généralement opaque et qui peut comporter des inscriptions.

Quoique plus complexes, les DVD ont des structures semblables. On se propose d'étudier quelques éléments qui composent ces supports (suivant le cas, CD ou DVD) sous l'aspect chimique, notamment leur synthèse et leur structure, ainsi que quelques processus de transformation intervenant dans l'enregistrement.

N.B.

- Les parties I, II, III et IV sont indépendantes.
- Les données sont en grande majorité regroupées en tête de chaque partie. Toutes les données ne sont pas forcément utiles.
- Les réponses aux questions 2.11 et 2.16 de la partie I doivent figurer sur le document annexe (diagramme potentiel-pH de l'or), qui sera à rendre avec la copie.
- La feuille de papier millimétré, fournie avec cet énoncé, est à rendre avec la copie. Les candidats y traiteront la question 1.2 de la partie IV.

I. COUCHE MÉTALLIQUE : EXEMPLE DE L'OR

- Données**

Constante des gaz parfaits	$R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
Charge élémentaire	$e = 1,60.10^{-19} \text{ C}$
Nombre d'Avogadro	$N_A = 6,02.10^{23} \text{ mol}^{-1}$

	Cu	Ag	Au
Numéro atomique	29	47	79
Masse atomique (en g.mol^{-1})	63,5	107,9	197,0
Rayon atomique (en nm)	0,128	0,145	0,144
Energie d'ionisation (en eV)	7,73	7,58	9,23

Extrait de la classification périodique

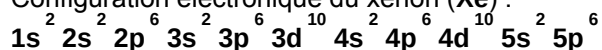
(symboles des éléments avec numéro atomique)

Rb 37	Sr 38		Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	La 57	Lu 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86

Lanthanides

Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Configuration électronique du xénon (Xe) :



Potentiels standard d'oxydation (25 °C, pH = 0)

(en V par rapport à l'électrode normale à hydrogène)

$\text{Au}^{3+} / \text{Au}^+$	1,40
Au^+ / Au	1,69
$[\text{AuBr}_4]^- / [\text{AuBr}_2]^-$	0,80
$[\text{AuBr}_2]^- / \text{Au}$	0,93
$\text{Zn}^{2+} / \text{Zn}$	-0,76

Constante de formation du complexe $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$: $\log \beta_2 = 38,3$

Constante d'acidité du couple HCN / CN^- : $\text{pK}_a = 9,2$

On assimilera concentration et activité.

Formule de Clapeyron

$$L_{ab} = \Delta V_{ab} T \frac{dP}{dT}$$

L_{ab} et ΔV_{ab} sont respectivement l'enthalpie molaire de changement d'état entre les phases a et b et la variation du volume molaire qui y est associé.

Pression de vapeur saturante de l'or (Au)

$$\log \frac{P}{P^\circ} = A + \frac{B}{T} + C \log T + D T$$

	A	B (en K)	C	D (en K ⁻¹)
Solide-vapeur	13,69	-19820	-0,306	-0,16.10 ⁻³
Liquide-vapeur	15,26	-19280	-1,01	0

T est exprimé en K et P en bar. $P^\circ = 1 \text{ bar} = 1,00.10^5 \text{ Pa}$.

Masse volumique de Au à l'état solide (sous 1 bar, 298 K) : $17,0.10^3 \text{ kg.m}^{-3}$

Température de fusion de Au (sous 1 bar) : 1064 °C

Température de vaporisation de Au (sous 1 bar) : 2856 °C

La couche métallique est généralement constituée d'un dépôt réfléchissant d'aluminium (Al) ou d'or (Au). Dans cette partie, on se propose d'étudier quelques propriétés de ce dernier et sa déposition en couche mince.

1. Atomistique

- 1.1 Rappeler brièvement la règle de Klechkowski.
- 1.2 Donner la configuration électronique de Au en supposant que la règle de Klechkowski est respectée.

En réalité, la configuration électronique de Au présente une "anomalie".

- 1.3 Proposer une configuration électronique pour Au, en justifiant le choix de celle-ci.
- 1.4 Donner la configuration électronique de Au aux degrés d'oxydation + I et + III.

2. Extraction

Contrairement à la majorité des éléments métalliques courants qui se trouvent à l'état naturel sous forme d'oxydes ou de sels, Au se trouve dans la nature à l'état d'oxydation 0, ce qui lui confère la dénomination de "métal noble". Les minerais contiennent généralement un faible taux de Au, qui est mélangé à d'autres métaux tels que l'argent (Ag).

Par conséquent, une des préoccupations dans le processus d'extraction de Au est d'oxyder ce dernier

sous une forme soluble. Cette opération est réalisée en présence d'un complexant. Après solubilisation et séparation des différents éléments, l'espèce **Au** sous forme complexée est réduite par un autre métal tel que le zinc. On se propose d'étudier l'effet de différents complexants sur le diagramme potentiel-pH de **Au** en phase aqueuse. On se place à 25 °C.

- 2.1 Quelle donnée illustre le caractère "noble" de Au ? Proposer une explication de l'origine de cette propriété.

Dans un premier temps, on donne le diagramme potentiel-pH de **Au** (document annexe). La concentration totale de l'espèce **Au** en solution est de $10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$.

- 2.2 Dédurre de ce diagramme la valeur du potentiel standard du couple $\text{Au}^{3+} / \text{Au}$. Cette valeur est-elle compatible avec les données ?
- 2.3 A l'aide du diagramme, donner la valeur du produit de solubilité de $\text{Au}(\text{OH})_3$.
- 2.4 Que représente la zone grise du diagramme potentiel-pH, comprise entre les droites " $\text{O}_2 / \text{H}_2\text{O}$ " et " $\text{H}_2\text{O} / \text{H}_2$ " ?
- 2.5 Est-il possible d'oxyder **Au(0)** par l'eau ou le dioxygène ?

Les ions halogénure, notamment le bromure (Br^-), peuvent jouer le rôle de ligand vis-à-vis de **Au**. La concentration totale en solution de l'espèce Br^- est de $10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$ et celle de l'espèce **Au** est de $10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$.

- 2.6 Donner les degrés d'oxydation de Au dans les deux complexes $[\text{AuBr}_4]^-$ et $[\text{AuBr}_2]^-$.
- 2.7 A partir des données, déterminer les constantes de formation de ces complexes.
- 2.8 Comparer l'ordre de grandeur de la concentration du complexe avec celui de l'ion "libre" pour chaque degré d'oxydation.
- 2.9 Montrer que, dans les conditions de concentration indiquées, ces complexes ont tous deux des domaines de prédominance sur le diagramme potentiel-pH.
- 2.10 Pour cette question, on considère que **Au** en solution est entièrement au degré d'oxydation + III. A quelle valeur de pH apparaît l'espèce $\text{Au}(\text{OH})_3$?
- 2.11 Sur le document annexe, tracer le diagramme potentiel-pH en présence d'ions Br^- . On admettra que, même en présence de Br^- , les espèces **Au(+I)** se dismutent aux pH supérieurs à la valeur trouvée à la question 2.10.
- 2.12 Peut-on oxyder **Au** par le dioxygène en présence de Br^- ? Si oui, écrire la(les) réaction(s) correspondante(s). Le cas échéant, préciser les conditions de pH.
- 2.13 Commenter l'utilisation que l'on peut faire des ions Br^- dans l'extraction de **Au**.

On étudie maintenant l'effet de la complexation par le ligand cyano, CN^- . La concentration totale est de $10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$ de l'espèce cyanure et de $10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$ de l'espèce **Au** en solution. Dans la suite, on considère l'espèce HCN en tant que soluté en solution aqueuse. Par ailleurs, une variation de concentration de l'ordre de quelques pourcents est considérée comme négligeable, par exemple : $(10^{-3} - 2 \cdot 10^{-5}) \approx 10^{-3}$.

- 2.14 Quel est le degré d'oxydation de **Au** dans le complexe $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$? Quel est le nom de ce complexe ?
- 2.15 Calculer l'évolution du potentiel $[\text{Au}(\text{CN})_2]^- / \text{Au}$ en fonction du pH, dans les conditions de

concentration indiquées.

- 2.16 Sur le document annexe, tracer le diagramme potentiel-pH en présence d'ions CN^- .
- 2.17 Ecrire l'équation bilan de l'action de **Zn** sur le complexe $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$, en justifiant pourquoi cette réaction a lieu.
- 2.18 Quel avantage peut-on tirer de l'existence de ce complexe dans le processus d'extraction de **Au** ?

3. *Evaporation et dépôt de couche d'or*

La couche de **Au** solide est mise en oeuvre par sublimation sous vide. **Au** est placé dans un bâti à vide sous forme solide. Sous l'effet d'un bombardement électronique, il est sublimé. Il se dépose ensuite sur un substrat. On se propose d'étudier le diagramme d'équilibre de phase (**P**, **T**), afin de modéliser les transformations de **Au**. On se propose d'établir les équations caractérisant la frontière entre deux phases a et b en équilibre pour un corps pur. On note μ_a et μ_b les potentiels chimiques respectifs de ces phases.

- 3.1 Ecrire la condition d'équilibre entre les phases a et b. Donner l'équation qui illustre le fait que l'équilibre est maintenu lors d'un déplacement infinitésimal le long de la courbe d'équilibre entre ces phases. On appellera (E) cette équation.
- 3.2 Exprimer, en fonction des grandeurs thermodynamiques usuelles, l'équation (E) sous forme d'une différentielle totale de **dP** et de **dT**.
- 3.3 A partir de l'expression trouvée en 3.2, démontrer que la formule de Clapeyron caractérise la courbe d'équilibre.

On s'intéresse, dans un premier temps, aux équilibres solide-vapeur (SV) et liquide-vapeur (LV). On suppose que :

- Les masses volumiques de **Au** en phase solide et en phase liquide sont pratiquement identiques et indépendantes de **T** et de **P**,
- **Au** en phase vapeur est un gaz parfait,
- L_{ab} s'écrit sous la forme d'un développement en série de **T**, dont on notera L_n le coefficient à l'ordre n.

Compte tenu des domaines de variation de **P**, la représentation logarithmique (**log (P / P°)**, **T**), dans laquelle **P** est remplacé par **log (P / P°)** est généralement adoptée.

- 3.4 Montrer que le volume molaire de la phase solide est négligeable devant celui de la phase vapeur sous **1 bar** à **298 K**.
- 3.5 Avec un développement à l'ordre 2 de L_{ab} , donner l'expression de **log (P / P°)** en fonction de **T**.
- 3.6 Relier les coefficients A, B, C et D des données aux coefficients L_n .
- 3.7 Calculer **log (P / P°)** pour les deux transformations à 1200 K et 1400 K. Montrer que les courbes SV et LV se croisent en un point que l'on notera τ .

La courbe solide-liquide (SL) passe également par le point τ . Par ailleurs, on suppose que la courbe SL est une droite dans le diagramme (**P**, **T**).

- 3.8 Comment est appelé τ ?

- 3.9 Tracer schématiquement les courbes SV, LV et SL de **Au**. Placer le point τ et les zones du graphe correspondant à chacune des trois phases.
- 3.10 Montrer qu'à très faible pression une pression (par exemple à 10^{-9} bar), l'utilisation du terme "sublimier" dans la description du procédé est justifiée.
- 3.11 Sur le schéma de la question 3.9, tracer le déplacement qui aboutit à la transformation solide-vapeur à pression atmosphérique, en précisant les types de transformations et les températures auxquelles elles ont lieu.
- 3.12 A l'aide de ce qui précède, décrire et commenter le déroulement du procédé de dépôt sous vide de **Au**.

II. MATERIAU POUR LES CD-RW : L'EXEMPLE DU "GST"

- **Données**

Nombre d'Avogadro	$N_A = 6,02.10^{23} \text{ mol}^{-1}$
-------------------	---------------------------------------

	Ge	Sb	Te
Numéro atomique	32	51	52
Masse atomique (en g.mol^{-1})	72,7	121,8	127,6
Rayon atomique (en nm)	0,125	0,145	0,140

Quelques données expérimentales sur le GST

	Cristal	Amorphe
Masse volumique (en kg.L^{-1})	6,13	5,86
Distance Te-Te (en nm)	0,43	non mesurée
Distance Te-Ge (en nm)	0,28	0,26
Distance Te-Sb (en nm)	0,29	0,29
Température de fusion (en °C)	615	
Température de cristallisation (en °C)		160

Les distances A-B indiquées sont les distances les plus courtes entre les atomes A et B.

Les supports de type CD-RW et DVD-RW doivent être réinscriptibles, aussi la transformation du matériau actif doit être réversible. Le matériau inorganique sur lequel les données sont enregistrées est le siège d'une transformation cristallin-amorphe et vice-versa. Un exemple est le "GST" : germanium (**Ge**), antimoine (**Sb**) et tellure (**Te**).

Pour effectuer la transformation dans le sens amorphe vers cristallin, le faisceau laser du graveur passe sur certaines parties du disque, typiquement avec une puissance de **6 mW** et un défilement de **2 m.s⁻¹**. Ceci a pour effet un échauffement local du GST. La transformation inverse est effectuée par le même faisceau, mais avec une puissance plus élevée et un temps d'exposition au faisceau plus court.

La structure cristallographique du GST peut être sommairement décrite comme un réseau cubique faces centrées (c.f.c.) d'atomes de **Te**, dans lequel les atomes de **Sb** et de **Ge** occupent aléatoirement des sites octaédriques. La formule brute est **Ge₂Sb₂Te₅**. Quant à l'état amorphe, l'empilement des mailles cristallines ne présente pas d'ordre à longue distance, mais la structure c.f.c. d'atomes de **Te** est conservée localement.

1. Structure de la forme cristalline

- 1.1 Dessiner la maille conventionnelle c.f.c. de **Te**. Dans un premier temps, on représentera uniquement les atomes de **Te**.
- 1.2 Quel serait le paramètre de maille si le réseau c.f.c. était compact et constitué uniquement d'atomes de **Te** ?

- 1.3 Calculer la masse volumique du cristal décrit à la question 1.2.
- 1.4 Placer, sur le schéma de la question 1.1, les sites octaédriques en précisant le nombre de ces sites par maille.
- 1.5 Dans le GST, quelle est la proportion de sites octaédriques occupés ?
- 1.6 Quel est le paramètre de maille minimum requis dans le réseau c.f.c. de **Te**, afin de permettre l'occupation de sites octaédriques par des atomes de **Sb** et de **Ge** ? Quelle serait alors la plus courte distance entre deux atomes de **Te** dans le cristal ?
- 1.7 Déterminer la masse volumique qu'aurait le GST avec la valeur du paramètre de maille trouvée dans la question 1.6.
- 1.8 Comparer les résultats trouvés dans les questions 1.6 et 1.7 avec les données expérimentales.

2. *Transition de phase*

- 2.1 Quel autre type de site **S** peut être occupé par un atome ou un ion dans une structure c.f.c. ? Donner le nombre de sites **S** par maille.
- 2.2 Quelle serait la distance entre un atome occupant le site **S** et l'atome (les atomes) de **Te** le(s) plus proche(s) dans une structure c.f.c. telle que celle décrite à la question 1.6 ?
- 2.3 Commenter l'hypothèse selon laquelle "lors du passage cristallin vers amorphe, un atome occupant initialement un site octaédrique se déplace en direction d'un site **S**". Quel est la nature de l'atome qui effectue ce déplacement ?

Dans ce qui suit, on tente d'expliquer la méthode employée pour induire la transformation par le faisceau laser, dans le sens amorphe vers cristallin, puis dans le sens cristallin vers amorphe.

- 2.4 Que se passe-t-il lorsqu'on élève la température d'un matériau amorphe à la température de cristallisation ? Expliquer la nécessité de porter le matériau à cette température, sachant qu'il reste cristallin après refroidissement.
- 2.5 Pour effectuer la transition dans le sens cristallin vers amorphe, à quelle température doit-on théoriquement porter le matériau ? Comment doit être la vitesse de refroidissement par rapport à celle de la question 2.4 ?
- 2.6 Expliquer comment un même graveur peut effectuer les transformations dans les deux sens, de l'état amorphe vers l'état cristallin et vice-versa.

III. POLYMERES

- **Données**

	PMMA	PC
Transmission optique sur 3 mm	90 %	92 %
Masse volumique (en kg.L^{-1})	1,19	1,20
Prise d'eau (masse d'eau / masse de polymère) à 25°C	1,9 %	0,3 %
Coefficient de dilatation thermique (en K^{-1})	2,0	1,7
Transition vitreuse (en °C)	105	145
Module de Young en traction (en GPa)	3,1	2,4

En principe, le CD ou DVD comporte deux sortes de couches de polymère. "Polymère 1" est traversé par le faisceau. Deux exemples de tels polymères sont étudiés, le polyméthacrylate de méthyle (PMMA) et le polycarbonate (PC). Ces deux polymères sont largement utilisés pour des applications où la transparence est importante comme le vitrage (fenêtres), les aquariums, la signalisation, les visières de casques, etc. Ils sont connus du grand public sous des dénominations commerciales telles qu'Altuglass[®] (PMMA), Plexiglass[®] (PMMA) ou Lexan[®] (PC).

"Polymère 2" est le plus souvent une laque qui assure la tenue mécanique et qui protège les différentes couches du disque contre les rayures. Ces laques sont souvent des résines acryliques, uréthanes ou époxy qui trouvent également des applications dans le domaine chirurgico-dentaire.

1. **Polymère pour l'optique ("Polymère 1"), exemple 1 : le Polyméthacrylate de méthyle (PMMA)**

Le polyméthacrylate de méthyle (PMMA) est synthétisé à partir du méthacrylate de méthyle (MMA, Figure 2) par une polymérisation en chaîne. On se propose d'étudier quelques aspects de cette réaction.

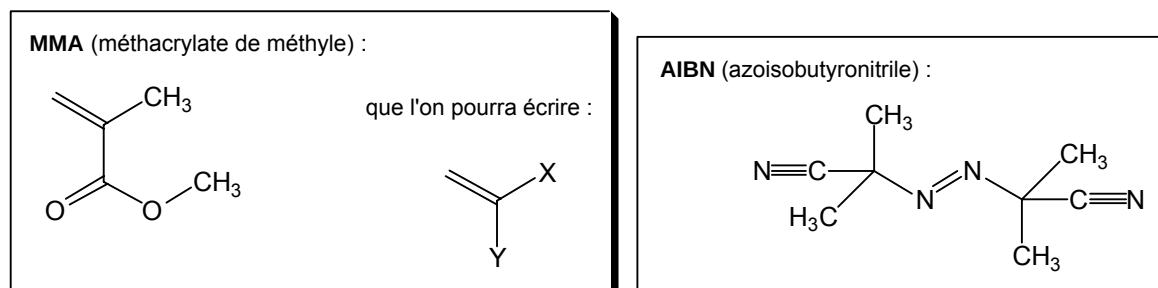
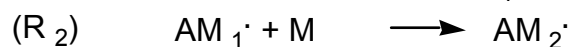
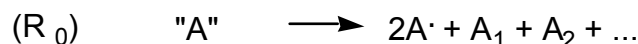
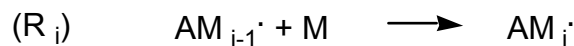


Figure 2. Formule du MMA et de l'AIBN.

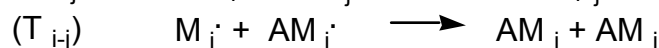
On donne les étapes élémentaires du mécanisme de la polymérisation en présence d'un amorceur radicalaire.



...



...



Un exemple de composé "A" est l'azoisobutyronitrile (AIBN, Figure 2), source de radicaux $A^\cdot$. A_1 , A_2 , ... sont d'éventuels sous-produits qui n'interviennent pas dans la suite du mécanisme.

M représente le monomère et $AM_i^\cdot$ le radical formé par réaction de $A^\cdot$ avec i monomères. $AM_{i+j}A$, AM_i et AM_j (sans radical) sont les polymères.

Pour les questions 1.1 à 1.7, on utilisera les notations X et Y dans les formules des différentes espèces.

- 1.1 Ecrire l'équation-bilan de la réaction de polymérisation du MMA en PMMA sans tenir compte de l'amorceur. Préciser les termes suivants : monomère, polymère, motif et degré de polymérisation.
- 1.2 Ecrire la réaction (R_0) dans le cas où "A" est le AIBN, sachant qu'une mole de AIBN produit deux moles du radical $A^\cdot$ et une mole de sous-produit, le diazote. S'agit-il d'une réaction de rupture homolytique ou hétérolytique ? Expliquer la différence entre ces deux types de rupture.
- 1.3 $AM_1^\cdot$ peut, a priori, correspondre à deux espèces différentes. Donner les formules de Lewis de ces espèces. Quelle est l'espèce majoritaire ? Proposer une interprétation.
- 1.4 Chaque étape de propagation (R_2 , ..., R_i , ...) peut conduire à un enchaînement "tête-à-tête" (minoritaire) ou "tête-à-queue" (majoritaire). Expliquer la différence entre ces deux enchaînements, en prenant comme exemple le passage de $AM_1^\cdot$ à $AM_2^\cdot$. On prendra comme produit de départ la forme majoritaire de $AM_1^\cdot$.
- 1.5 Le PMMA présente-t-il des atomes de carbone asymétrique ? A l'aide d'un schéma, expliquer la différence entre un polymère isotactique, syndiotactique et atactique.
- 1.6 Détailler la manière dont se déroule la disparition des radicaux lors de la réaction (T_{i+j}).
- 1.7 Lors de la réaction (T_{i-j}), l'un des atomes de carbone portant le radical est transformé en carbone insaturé et l'autre en carbone saturé. Sachant que cette disparition des radicaux s'effectue par le transfert d'un radical hydrogène $H^\cdot$ du premier radical vers le second, proposer un mécanisme pour la réaction (T_{i-j}) ainsi que des formules pour les composés AM_i et AM_j .

On étudie la cinétique de la réaction de polymérisation. On suppose que les étapes R_1 , R_2 , ..., R_i , ... ont la même constante cinétique que l'on notera k_p . On suppose également que toutes les réactions T_{i+j} et T_{i-j} ont la même constante cinétique, k_t . La constante cinétique de la réaction R_0 sera notée k_d . On définit la vitesse de la réaction de polymérisation, V_p , comme étant celle de disparition du monomère M . On notera $[R^\cdot]$ la somme des concentrations des espèces radicalaires (incluant $A^\cdot$).

- 1.8 Ecrire l'expression de V_p .

- 1.9 Déterminer $[R^{\cdot}]$ en supposant que l'approximation de l'état quasi-stationnaire (AEQS) peut être appliquée à chacune des espèces radicalaires. On montrera que $[R^{\cdot}]$ ne dépend pas de k_p .
- 1.10 Ecrire V_p en fonction des constantes cinétiques et des concentrations de M et "A".

2. Polymère pour l'optique ("Polymère 1"), exemple 2 : le Polycarbonate (PC)

La synthèse s'effectue à partir du phosgène et d'un diol tel que le bisphénol-A (BP, Figure 3). Pour des raisons de sécurité, le phosgène est parfois remplacé par le diphénylcarbonate (DPC).

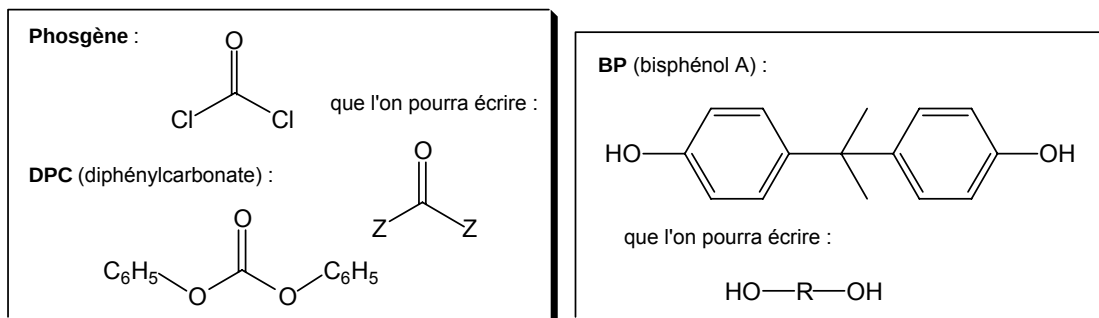


Figure 3. Formules du phosgène, du DPC et du BP.

Pour les questions 2.1 à 2.4, on utilisera les notations **Z** et **R** dans les formules des différentes espèces.

- 2.1 Ecrire la réaction de déprotonation de BP en précisant les conditions. Cette réaction peut-elle avoir lieu de façon quantitative si on remplace R par un groupe aliphatique ?
- 2.2 Dédurre le mécanisme de la réaction d'une molécule de BP avec une molécule de DPC en milieu basique. Ecrire l'équation de cette réaction.
- 2.3 L'un des produits de la réaction de la question 2.2 peut réagir avec une autre molécule de BP. Ecrire l'équation correspondante.
- 2.4 Dédurre l'équation de la polymérisation qui mène au PC.

3. Polymère pour la laque ("Polymère 2")

Une des familles de laques utilisées sont les résines uréthane-acrylique. Elles se présentent sous forme d'un polymère soluble de courte chaîne, appelé prépolymère. Le mélange prépolymère-générateur de radicaux est étalé en couche, puis irradié par une source UV ou visible pour induire la formation d'un polymère réticulé.

Dans l'exemple que l'on étudie, on forme, à partir des composés représentés en Figure 4, le prépolymère qui comporte la fonction uréthane. Cette réaction s'effectue en deux étapes dans une solution d'acétate d'éthyle. Une fois le prépolymère formé, on ajoute l'Irgacure 184 (I184, Figure 5) à la solution, qui génère des radicaux sous irradiation lumineuse.

Pour les questions 3.1 à 3.4, on utilisera les notations **R** et **R'** dans les formules des différentes espèces.

- 3.1 A partir de quelles fonctions présentes dans les composés représentés en Figure 4 peut-on créer la fonction uréthane ? Ecrire l'équation. Proposer un mécanisme.
- 3.2 Lors d'une première étape, on forme un polymère dont le motif comporte la fonction uréthane (polyuréthane). Ecrire l'équation de cette étape.
- 3.3 On ajoute le HEA lors d'une seconde étape. Ecrire l'équation de cette étape.
- 3.4 Pourquoi doit-on attendre la seconde étape pour introduire le HEA dans le milieu réactionnel ?
- 3.5 Justifier le fait qu'il se produit une réaction de polymérisation lorsque le mélange prépolymère - I184 est soumis à une irradiation lumineuse. Donner la formule du polymère obtenu, utilisé en tant que "Polymère 2".
- 3.6 A l'aide d'un schéma simple, expliquer la différence entre un polymère linéaire et un polymère réticulé. A laquelle de ces deux catégories appartiennent le prépolymère et le polymère formé à la question 3.5 ?

4. Propriétés comparées des polymères

Dans ce paragraphe, on comparera quelques propriétés des polymères étudiés dans les paragraphes précédents.

- 4.1 A partir des données sur les propriétés des polymères, établir une comparaison entre le PMMA et le PC en vue de leur utilisation dans les applications visées.
- 4.2 Donner la définition du module de Young.
- 4.3 Quelles propriétés mécaniques et thermiques attend-on du "Polymère 2" (laque) par rapport à celles du "Polymère 1" (PMMA ou PC) ?

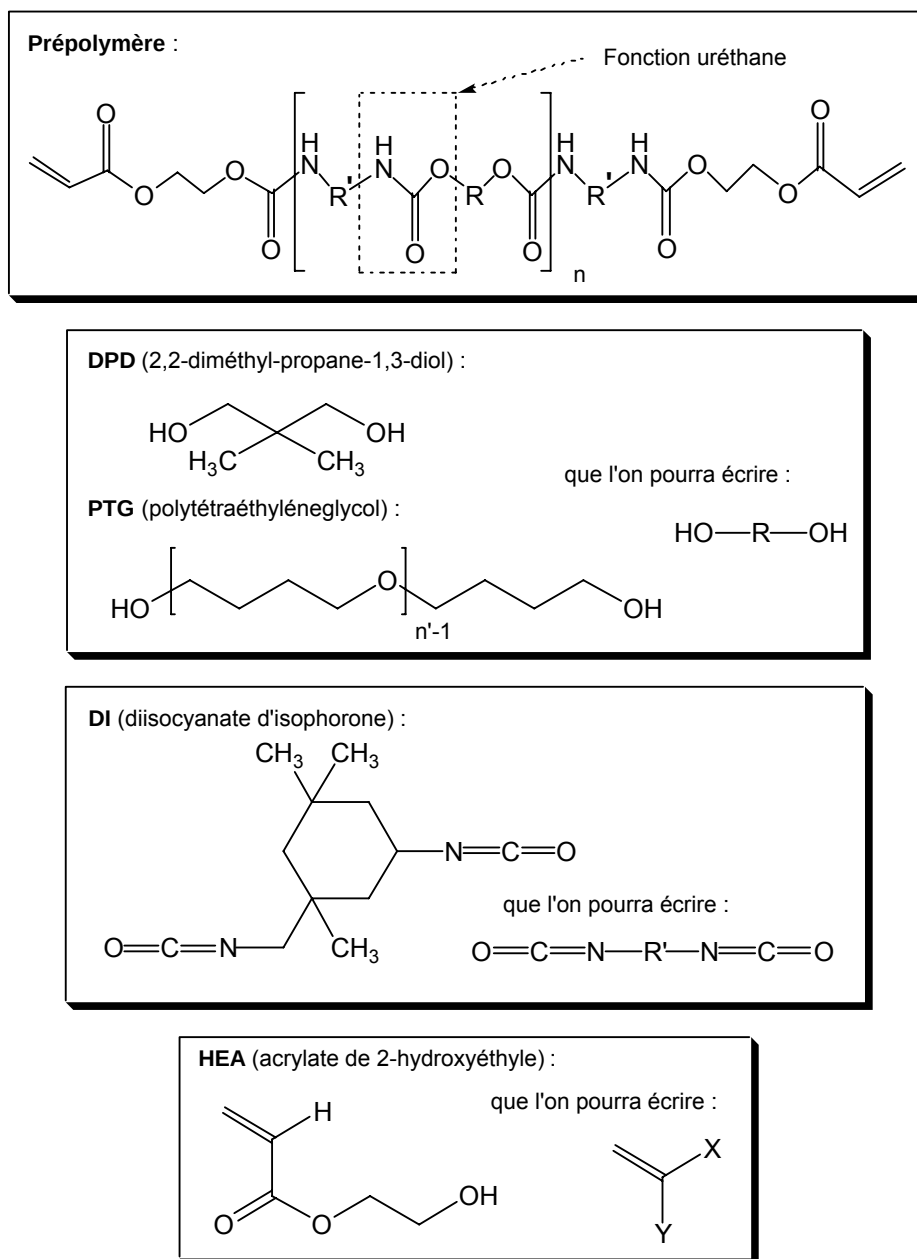


Figure 4. Formules du prépolymère et des composés intervenant dans sa synthèse.

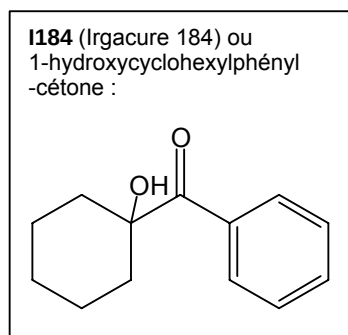


Figure 5. Formule de l'I184.

IV. COLORANTS ORGANIQUES POUR LES CD-R

- Données**

Constante de Planck	$h = 6,63.10^{-34} \text{ J.s}$
Célérité de la lumière	$c = 3,00.10^8 \text{ m.s}^{-1}$
Nombre d'Avogadro	$N_A = 6,02.10^{23} \text{ mol}^{-1}$

	H	C	N
Numéro atomique	1	6	7

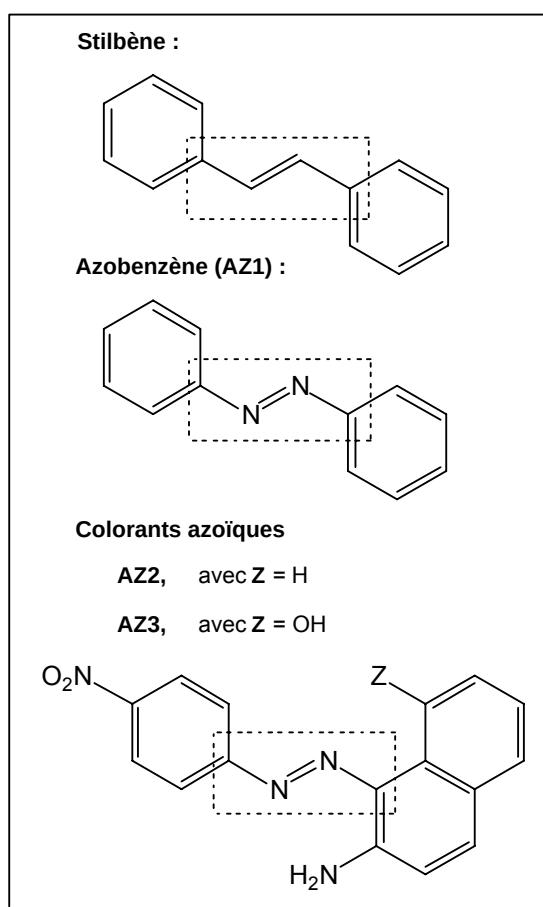
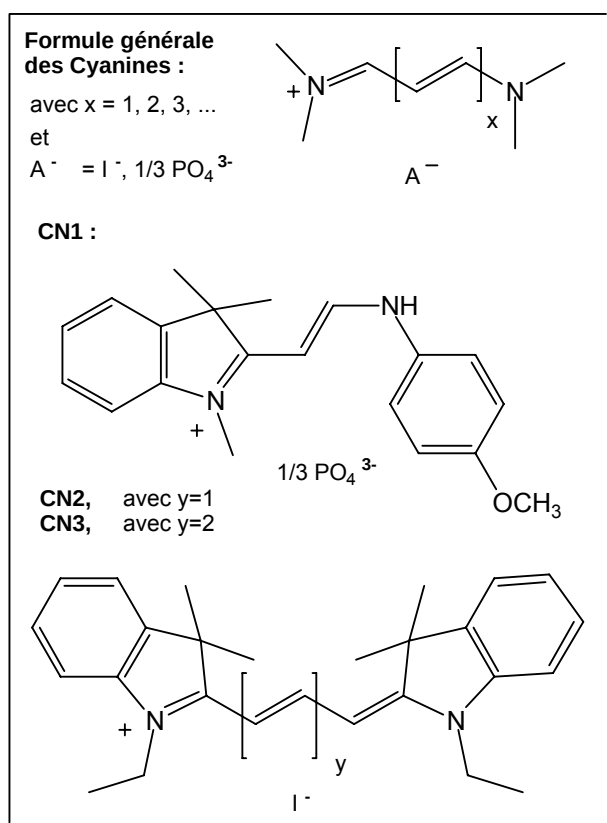


Figure 6. Architectures de base et formules de colorants organiques. Les parties encadrées en pointillés du stilbène et de l'azobenzène (AZ1) représentent respectivement les enchaînements "CCCC" et "CNNC".

Longueurs d'onde de la bande d'absorption principale :

	Ethylène	1,3-butadiène	CN1	CN2	CN3	AZ2	AZ3
λ (en nm)	180	290	416	560	660	496	547

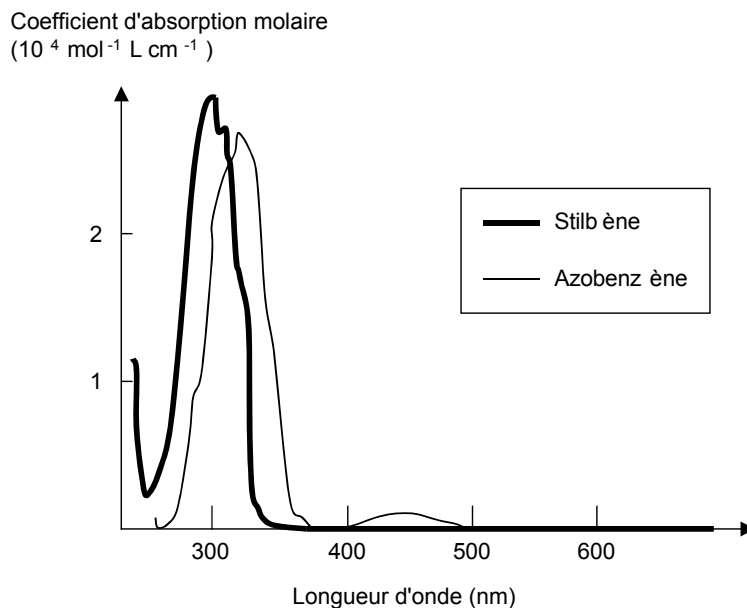


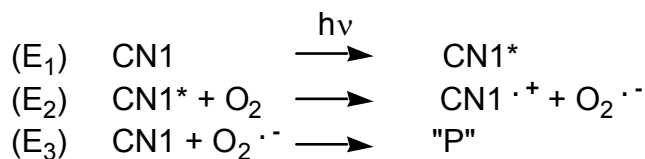
Figure 7. Spectres d'absorption du stilbène et de l'azobenzène (AZ1).

La gravure des données dans les supports de type CD-R ou DVD-R s'effectue en faisant réagir localement le colorant organique contenu dans le disque à l'aide du faisceau d'un graveur, dont la longueur d'onde est généralement autour de 650 nm dans le cas des DVD-R. L'absorption de la lumière par le colorant provoque la décomposition irréversible de ce dernier et la disparition de la couleur. Les cyanines et les azoïques sont des exemples de colorants courants (Figure 6).

Dans cette partie, on étudie la cinétique de décoloration d'une cyanine, la synthèse d'un azoïque et l'origine de l'absorption dans des composés organiques.

1. Aspect cinétique de la réaction photo-induite des cyanines

Cette étude est effectuée en laboratoire sur un composé modèle, la cyanine CN1. Bien que les conditions d'irradiation diffèrent de celles d'un graveur, on estime que les résultats obtenus sur CN1 en laboratoire peuvent aider à la compréhension du comportement des cyanines en situation réelle. La réaction photo-induite de la cyanine CN1 donne lieu à la formation d'une série de composés de dégradation de plus faible conjugaison. La réaction est décrite ci-après (Figure 8). On propose un mécanisme simplifié de la réaction lorsqu'on est en présence de dioxygène. "P" représente de manière générale les produits de dégradation, dont quelques-uns sont représentés sur la Figure 8.



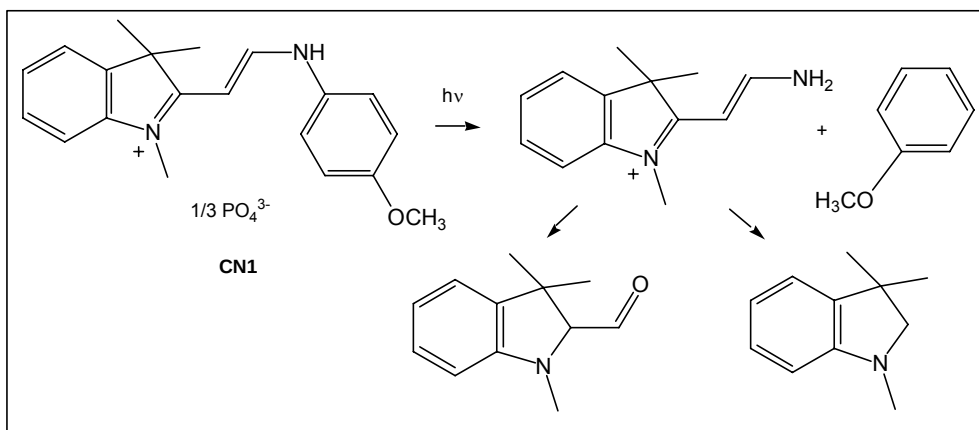


Figure 8. Réaction de photo-dégradation de la cyanine CN1.

On étudie dans cette partie la cinétique de la réaction photo-induite de la cyanine CN1 dans une solution d'acétonitrile. L'irradiation est effectuée à l'aide d'une lampe à vapeur de mercure dont on sélectionne la raie à $\lambda_{\text{irr}} = 405 \text{ nm}$, sous agitation vigoureuse et sous atmosphère ambiante (Figure 9). On note P° la puissance du faisceau lumineux incident qui est de **1 mW**. Au cours de l'irradiation, on suit **A**, l'absorbance de la solution en fonction du temps, en mesurant la puissance transmise **P** d'un faisceau sonde de puissance P_s à la longueur d'onde $\lambda_s = 416 \text{ nm}$. Aussi bien à λ_{irr} qu'à λ_s , seule CN1 absorbe. On donne son coefficient d'absorption molaire aux deux longueurs d'onde :

$$\varepsilon_{\text{irr}} = 1,5 \cdot 10^4 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{L} \cdot \text{cm}^{-1} \quad \varepsilon_s = 2,0 \cdot 10^4 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{L} \cdot \text{cm}^{-1}$$

Le parcours optique de la cuve est de $L = 1 \text{ cm}$ et le volume de la solution est de $V = 5 \text{ mL}$. La concentration initiale en CN1 est notée c_0 .

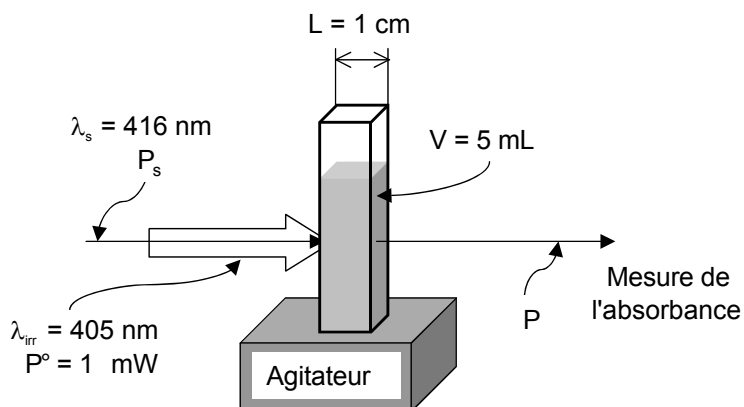


Figure 9. Montage de mesure cinétique sous irradiation.

Le résultat des mesures en fonction du temps t est donné dans le tableau suivant.

t (en min)	0	10	20	30	40	50	60
A	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$

t (en min)	70	90	110	130	160	190
A	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$

- 1.1 Ecrire la loi de Beer-Lambert. Dédurre la relation entre **A** et la concentration en CN1. Quelle est la valeur de c_0 ?
- 1.2 Tracer sur une feuille de papier millimétrée $\ln [A(0) / A(t)]$ en fonction de t. On prendra 1 cm pour 10 min pour l'axe des abscisses et 1 cm pour 0,1 unité d'absorbance pour l'axe des ordonnées.
- 1.3 Peut-on déduire un ordre pour cette réaction ? Si oui, donner l'ordre ainsi que la valeur de la constante cinétique que l'on notera k_{hv} .

On suppose que l'on se trouve dans les conditions d'application de l'approximation de l'état quasi-stationnaire (AEQS) pour les espèces **CN1*** et **O₂⁻**. On note v_1 , v_2 et v_3 les vitesses respectives des étapes **E₁**, **E₂** et **E₃** du mécanisme.

- 1.4 Montrer que la vitesse de réaction, **v**, s'écrit exclusivement en fonction de v_1 . On pourra définir **v** comme étant la vitesse de disparition de CN1.

L'étape **E₁** nécessite la présence de photons et sa vitesse ne peut en principe pas être écrite comme celle d'une étape monomoléculaire "ordinaire". Dans les questions 1.5 à 1.9, on tentera d'établir l'expression de v_1 et de montrer que, dans certaines conditions, elle est proportionnelle à **[CN1]**, la concentration de CN1. On ne tient compte que de l'absorption et on néglige les effets tels que la réfraction, la réflexion ou la diffusion de la lumière. Par ailleurs, on considère que seule une fraction Φ des photons absorbés par CN1 conduit à la réaction étudiée. On introduit ici la notion de "mole de photons", qui correspond à **N_A** photons.

- 1.5 Relier **P°** à λ_{irr} , h, c et le nombre de moles de photons incidents par unité de temps, **N_{hv}**.
- 1.6 Quel est le nombre de moles de photons absorbés par CN1 par unité de temps ?
- 1.7 Relier les expressions trouvées en 1.5 et 1.6 à v_1 .
- 1.8 Montrer que, dans certaines conditions de concentration, v_1 donne une expression d'ordre 1 par rapport à **[CN1]** et, dans d'autres, une expression d'ordre 0. Comparer ces conditions aux conditions expérimentales.
- 1.9 Dans le cas où l'on a une expression d'ordre 1, déduire l'expression de **v**. Détailler l'expression de k_{hv} en fonction de **P°**, Φ , ϵ_{irr} , **V** et **L**. Dédurre la valeur de Φ .

L'écriture dans les CD-R s'effectue suivant ce principe, mais à d'autres longueurs d'onde et avec d'autres colorants. Le volume élémentaire d'une mémoire ("bit") a pour ordre de grandeur **1 μm^3** . La gravure s'effectue en focalisant un faisceau de 10 mW à 650 nm sur ce volume. On estime que l'information a pu être gravée, lorsque la moitié des molécules de colorant auront disparu.

- 1.10 En supposant que les données et résultats précédents à 405 nm sur le composé CN1 peuvent être transposés dans le cas des autres cyanines à 650 nm, quel est le temps nécessaire pour graver un "bit" d'information ?
- 1.11 Quelle limitation à l'utilisation des DVD-R fonctionnant sur ce principe peut-on déduire de ce qui précède ?

2. Synthèse de colorants azoïques

Dans cette partie, on aborde la synthèse des colorants AZ2 et AZ3 (Figure 10). La première étape consiste à obtenir le sel de diazonium. Pour cela, dans un ballon refroidi à 5°C, on mélange 1,5 g de paranitroaniline, 5 mL d'acide chlorhydrique (HCl) concentré, 15 mL d'acide acétique (CH₃COOH) et 10 mL d'eau, puis on y ajoute 0,7 g de nitrite de sodium (NaNO₂). Lors d'une seconde étape, on ajoute la solution précédente dans 120 mL d'acide acétique contenant 1,5 g de 2-naphtylamine ou de 7-amino-1-naphthol. Le produit final précipite sous forme de cristaux oranges de AZ2 ou de AZ3.

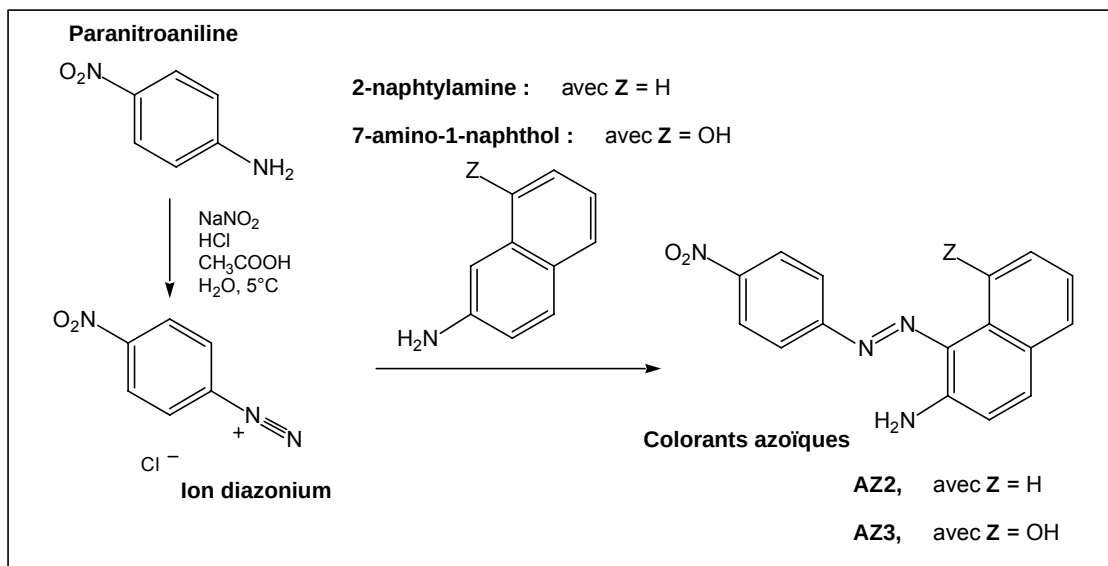


Figure 10. Synthèse des colorants azoïques AZ2 et AZ3.

- 2.1 Ecrire la formule de Lewis de l'ion nitrite. Ecrire les équations montrant qu'une protonation double de l'ion nitrite peut conduire à la formation de l'ion nitrosonium, NO^+ .
- 2.2 Proposer des formules de Lewis de NO^+ .
- 2.3 Proposer le mécanisme de formation de l'ion diazonium par réaction entre NO^+ et la paranitroaniline.
- 2.4 Ecrire des formules de Lewis mésomères pour l'ion diazonium correspondant à des localisations différentes de la charge positive.
- 2.5 Si le milieu réactionnel est porté au-dessus de 5°C, l'ion diazonium se transforme en paranitrophénol, de formule brute $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_3$, avec un dégagement gazeux. Donner la formule développée du paranitrophénol et la nature du gaz, en écrivant l'équation-bilan de la réaction de formation de ces composés.
- 2.6 Par quel type de réaction l'ion diazonium réagit-il avec le 2-naphtylamine ou le 7-amino-1-naphthol ? Donner le mécanisme de la réaction.

3. Origine de l'absorption dans les colorants

Dans cette partie, on construit le diagramme d'orbitales moléculaires (OM) de composés modèles pour rendre compte des propriétés de colorants. Pour cela, on considère différentes molécules ou fragments de molécules.

On considère l'éthylène (C_2H_4), dont on donne les OM : σ^+ , σ^- , π^+ , ... (Figure 11). Ces dernières sont construites à partir des orbitales de fragments des entités CH_2 : σ_F , π_F , n_σ , ... Ces orbitales,

appelées orbitales de fragment, sont elles-mêmes des combinaisons d'orbitales atomiques (OA) : **1s** pour les atomes d'hydrogène et **2s**, **2p_x**, **2p_y**, **2p_z** pour les atomes de carbone. Le principe de la formation des orbitales de fragment est décrit sur la Figure 11. On ne tient compte que des orbitales de valence.

- 3.1 Donner le caractère (liant, non liant ou antiliant) de chaque orbitale de fragment par rapport aux liaisons C-H, exceptée **n_σ**.
- 3.2 A quelle OA correspond l'orbitale de fragment appelée **n_p** ?
- 3.3 Quelles OA doit-on combiner pour obtenir le fragment **n_σ**. Pourquoi considère-t-on que **n_σ** est une orbitale non liante ?
- 3.4 Dessiner l'allure des 7 OM de **C₂H₄** les plus basses en énergie, en y plaçant les électrons de manière adéquate pour l'état fondamental. On adoptera par exemple le même type de représentation que pour les orbitales de fragment.
- 3.5 Expliquer les différences de dénomination des OM : a) **σ** ou **π**, b) la présence ou l'absence de *****.
- 3.6 D'après ce qui précède, déduire l'indice de liaison entre les deux atomes de carbone de l'éthylène.

On détermine les énergies des OM issues des orbitales p_z du carbone (π et π^{*}). Sauf indication contraire, on ne tiendra compte dans la suite que de ces orbitales, qui forment le "système π". On pose :

$$\alpha_i = \iiint_{\text{espace}} 2p_z(i) \hat{H} 2p_z(i) d\tau$$

$$\beta_{ij} = \iiint_{\text{espace}} 2p_z(i) \hat{H} 2p_z(j) d\tau \quad \text{pour } i \neq j$$

$$S_{ij} = \iiint_{\text{espace}} 2p_z(i) 2p_z(j) d\tau$$

2p_z(i) représente l'OA **2p_z** de l'atome de carbone numéro i. On rappelle que **β_{ij}** est négatif et que **S_{ij}** est positif et non nul. L'opérateur **$\hat{H}$** , l'hamiltonien, intervient dans l'équation de Schrödinger, tout comme E, l'énergie de l'orbitale **ψ** :

$$\hat{H} |\Psi\rangle = E |\Psi\rangle$$

- 3.7 Quel est l'intérêt d'étudier particulièrement les OM **π** et **π^{*}** ?
- 3.8 A quoi correspond **α_i** ? Quelle est la valeur de **S_{ij}** lorsque i = j ?
- 3.9 Ecrire le déterminant séculaire dans le cas de l'éthylène.
- 3.10 Calculer les énergies et les expressions des OM du "système π".
- 3.11 Démontrer que la déstabilisation de l'OM **π^{*}** est plus importante que la stabilisation de l'OM **π**.
- 3.12 Que pourrait provoquer une irradiation lumineuse d'énergie proche de la différence d'énergie entre l'OM la plus haute occupée (HO) et la plus basse vacante (BV) ?

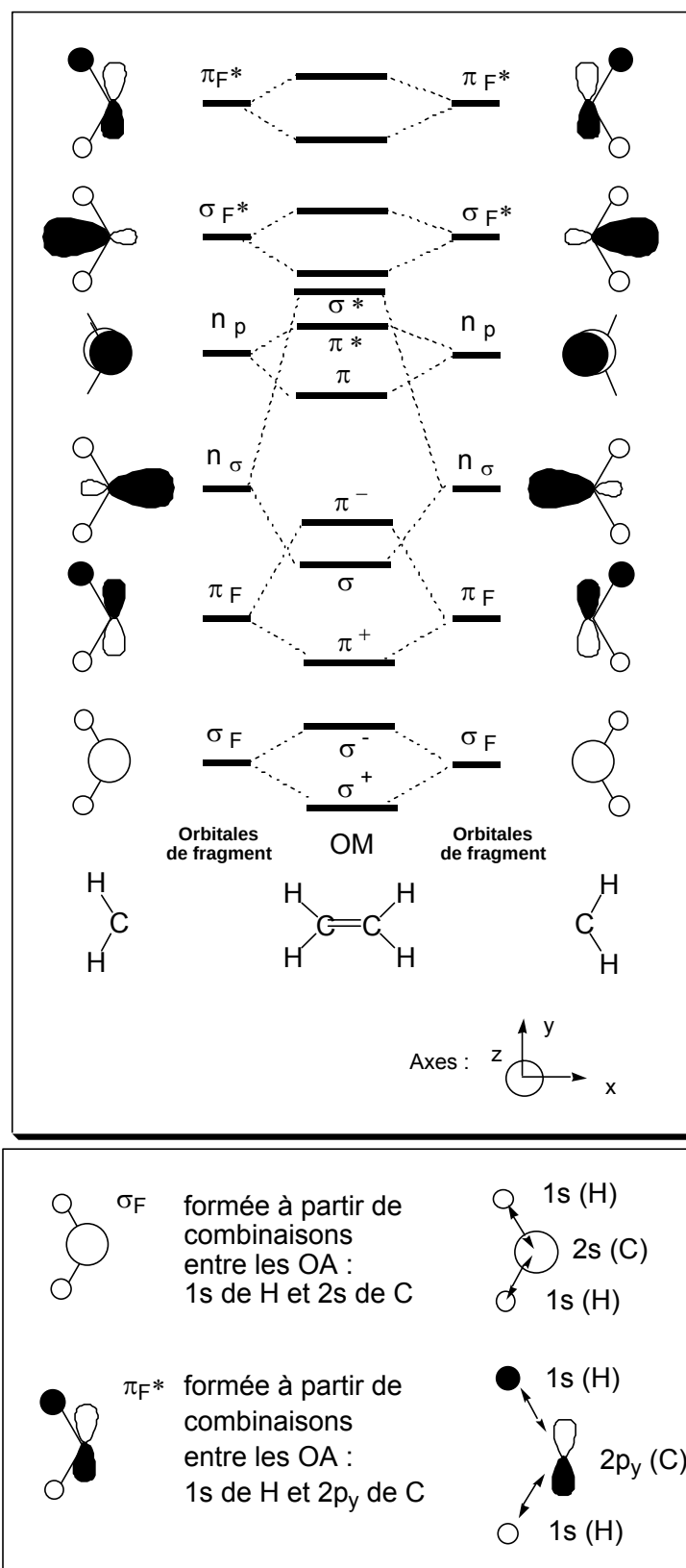


Figure 11. Haut : diagramme d'orbitales moléculaires (OM) de l'éthylène (C_2H_4) construites à partir des orbitales de fragment de CH_2 . Bas : exemples de construction d'orbitales de fragment.

Pour modéliser les propriétés spectrales de l'azobenzène (AZ1, Figure 7) et pour les comparer à celles du stilbène, on étudie le système π des enchaînements "CNNC" pour l'azobenzène et

"CCCC" pour le stilbène (Figure 6).

Cette fois-ci, on prend en compte les OA p_z des atomes de carbone et d'azote. On pose :

$$\alpha_i = \alpha_C \quad \text{pour } C$$

$$\alpha_i = \alpha_N = \alpha_C + \beta \quad \text{pour } N$$

$$\beta_{ij} = \beta (\neq 0) \quad \text{si } i \text{ et } j \text{ adjacents (C ou N)}$$

$$\beta_{ij} = 0 \quad \text{si } i \neq j \pm 1 \text{ et } i \neq j$$

$$S_{ij} = 0 \quad \text{si } i \neq j$$

3.13 Ecrire le déterminant séculaire pour "CCCC" et "CNCN".

La méthode de Hückel, appliquée à ces deux enchaînements, donne les diagrammes du système π représentés en Figure 12. Dans le cas de "CCCC", ψ_2 et ψ_3 sont respectivement la HO et la BV. Dans le cas de "CNCN", une OM supplémentaire, ψ_n , s'insère entre les orbitales ψ_2 et ψ_3 du système π . ψ_n est principalement composée d'orbitales portant les doublets non liants des atomes d'azote et ne fait elle-même pas partie du système π .

3.14 Compléter avec les électrons les OM de "CNCN" représentées sur la Figure 12 pour l'état fondamental.

3.15 Expliquer le fait que les OM de "CNCN" sont placées à des énergies plus basses que celles de "CCCC".

3.16 Donner une expression approchée du niveau d'énergie de ψ_n en fonction de α_C et de β .

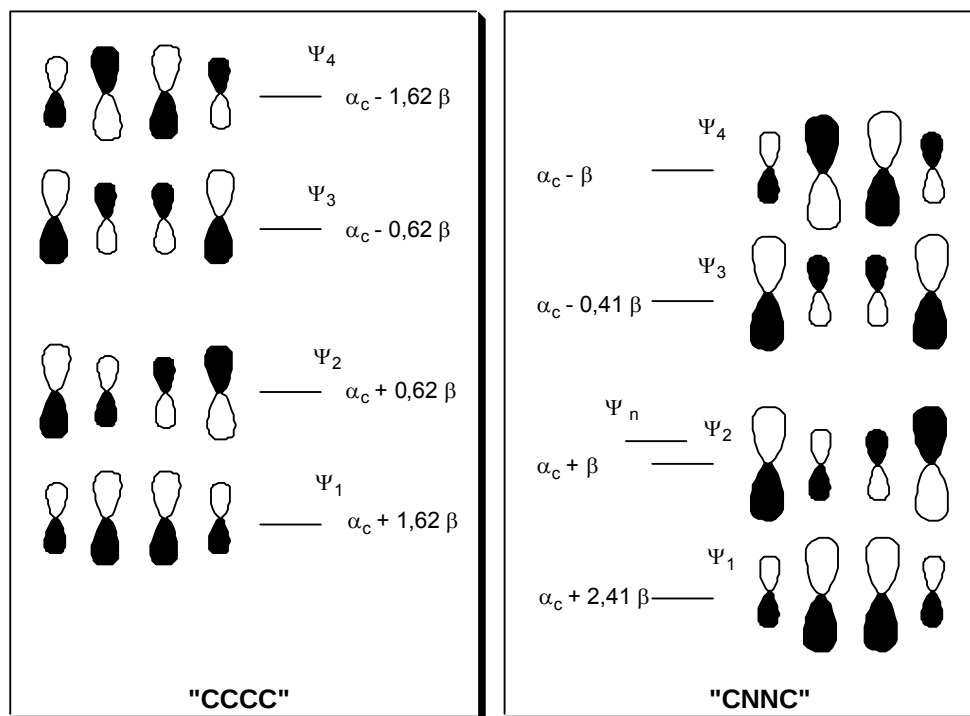


Figure 12. Orbitales du système π (et ψ_n) des enchaînements "CCCC" et "CNCN".

On examine maintenant les spectres d'absorption.

3.17 A l'aide de ce qui précède, comparer les spectres d'absorption du stilbène et de l'azobenzène AZ1 (Figure 7).

- 3.18 Commenter l'évolution de la longueur d'onde de la bande d'absorption lorsqu'on allonge la chaîne carbonée, ainsi que dans la série des cyanines (CN1, CN2 et CN3). Parmi ceux qui figurent dans les données, quel(s) est (sont) le(s) colorant(s) qui convient (conviennent) pour l'utilisation dans les DVD-R ?

08. Rapport relatif à la composition de chimie

Le fil conducteur de ce sujet est l'étude de supports d'enregistrement (CD, DVD, ...). Science liée à la transformation de la matière, la chimie intervient aussi bien dans la fabrication de ces objets que dans les processus d'écriture de données. Les quatre parties, indépendantes les unes des autres, concernent :

- L'extraction de l'or (solutions aqueuses, complexation, diagramme potentiel-pH) et son dépôt sous forme de couche mince (changements d'état).
- La structure du GeSbTe (cristallographie), un composé utilisé dans les supports réinscriptibles, et les transformations liées à l'écriture de données (transformations à l'état solide).
- La synthèse du polyméthacrylate de méthyle (PMMA), du polycarbonate et d'une laque uréthane-acrylique (réaction de polymérisation, mécanisme, cinétique) et les propriétés de polymères (relation structure-propriétés).
- La synthèse (réactions sur des composés aromatiques) et les propriétés spectrales (orbitales moléculaires) d'un colorant, ainsi que l'étude d'une réaction photochimique (cinétique) intervenant lors de la gravure de données.

Outre une couverture large des divers domaines de la chimie, un équilibre entre les questions comportant des calculs et celles portant sur la description de phénomènes (voire de sens pratique) a été recherché, afin que des candidats possédant des qualités différentes puissent s'exprimer au mieux dans ce sujet. Par ailleurs, une part non négligeable des questions consiste à remonter à des grandeurs physico-chimiques de base, habituellement fournies, à partir de données contenues dans une figure (par exemple, la détermination d'une valeur de constante à partir d'un diagramme potentiel-pH) ou encore à apporter des explications rationnelles à des résultats expérimentaux ou à des observations décrites dans l'énoncé. Cela a permis d'évaluer la capacité des candidats à exploiter des données expérimentales.

Remarques générales

Avant tout, le jury attire l'attention des candidats sur la nécessité d'utiliser correctement le vocabulaire approprié et d'être précis dans les expressions.

Les mécanismes fantaisistes sont en voie de disparition. Le jury en est très satisfait. Mais l'écriture de mécanismes en chimie organique reste perfectible (les flèches doivent partir des doublets d'électrons et non des charges). En revanche, de manière étonnante, les candidats bloquent souvent sur les questions très liées à la physique, comme la spectrophotométrie ou l'action des photons sur les molécules. Une autre faiblesse concerne les polymères. Certes, il s'agit d'un domaine de la chimie qui possède bien des spécificités. Mais les candidats ont souvent du mal à mobiliser les connaissances qu'ils possèdent dans d'autres domaines, même lorsqu'elles sont transposables aux polymères.

Une autre remarque générale concerne les questions dans lesquelles on demande de comparer le résultat d'un calcul à des données fournies dans l'énoncé. Certains candidats répondent qu'ils se sont "trompés", alors que ce n'est pas le cas. Le réflexe de se remettre en question n'est pas mauvais en soi, mais peut être révélateur d'une certaine fragilité. Ces questions devraient entraîner une réponse d'un autre ordre : apporter une explication "chimique" ou "physique" sur un écart, comme par exemple déceler les limites d'un modèle utilisé dans un calcul par rapport à la réalité expérimentale.

Un nombre non négligable de candidats, après avoir (plus ou moins bien) traité le début du sujet, s'écroulent complètement sur le reste. S'agit-il d'un manque de temps, suite à un investissement excessif sur les questions du début sans d'ailleurs que le bénéfice soit à la hauteur ? D'un déséquilibre de connaissances entre les différentes parties du programme ? D'autres, en revanche, donnent l'impression de survoler superficiellement et sans conviction l'ensemble de l'énoncé, en essayant de grappiller des miettes de points par-ci par-là. Il est de l'intérêt des candidats de mieux gérer leur épreuve et de ne pas adopter ces attitudes extrêmes.

Remarques concernant la partie I du sujet

Il s'agit de la partie qui est le plus souvent abordée, mais pas toujours de manière heureuse, même si le jury a pu admirer la virtuosité de certains candidats dans des questions très calculatoires sur les solutions aqueuses (2.7).

Plusieurs erreurs sont à déplorer dans le remplissage des orbitales (1.2), certes compliqué dans le cas de l'or en raison de la présence d'orbitales d et f.

Sur les questions qualitatives, certains candidats donnent des explications bien alambiquées sur la stabilité de l'or (2.1). D'autres évoquent des "zones communes" ou des "zones de cohabitation" sans autre précision, ou encore choisissent le terme de "stabilité", évitant ainsi le dilemme entre "prédominance" et "existence".

Les erreurs dans l'exploitation des diagrammes potentiel-pH proviennent principalement de la confusion entre le potentiel (E) et le potentiel standard (E°), ainsi que de l'incompréhension de certains candidats à réaliser que ces diagrammes sont établis dans des conditions particulières de concentration (partie 2). Dans quelques questions, certains candidats, après avoir trouvé le bon résultat, sont soudain pris d'un excès d'autocritique : par exemple, ils comparent la valeur de E° trouvée par le calcul à une valeur de E figurant dans l'énoncé et concluent qu'ils se sont trompés (2.2). Ce flou entre E et E° joue contre les candidats eux-mêmes, qui finissent par "tourner en rond" ou par se perdre lorsque des calculs longs s'imposent (2.11).

Une autre remarque négative concerne le manque de discernement de certains candidats qui ne s'inquiètent pas de trouver des valeurs de concentration de l'ordre de $10^{20} \text{ mol.L}^{-1}$ (2.8), ou qui trouvent que le pH à la précipitation est le même en présence et en absence de ligand (2.10).

La thermodynamique ne pose pas de problèmes majeurs à ceux qui la traitent, mis à part quelques confusions entre le diagramme P-T et le diagramme binaire (3.9).

Remarques concernant la partie II du sujet

Une large majorité des candidats ayant abordé cette partie connaît la structure cubique faces centrées (cfc) et mène à bien les mesures géométriques. L'impression d'ensemble sur cette partie est bonne.

La seule erreur récurrente est liée à la confusion entre la formule stœchiométrique ($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, donnée dans l'énoncé) qui fait apparaître 5 atomes de Te et la maille qui ne contient que 4 atomes de Te (1.7).

Les questions qualitatives (2.4-2.6) sur les transformations de ce matériau lors de l'écriture de données sont moins bien réussies, même si le principe en est souvent bien compris.

Remarques concernant la partie III du sujet

Il s'agit de la partie la moins réussie.

Les questions qui ne nécessitent pas de connaissances sur les polymères telles que celles sur l'AIBN (1.2) ou le phénol (2.1) sont relativement bien traitées, malgré une confusion entre ruptures hétérolytique et homolytique dans certaines copies. La qualité des réponses va *decrecendo* lorsque l'on avance dans les questions qui mènent le candidat au coeur des réactions de polymérisation. Ainsi, aussi bien la cinétique qui relève de concepts et de calculs de chimie générale (fin de la partie 1) que la synthèse qui relève d'écritures de réactions et de mécanismes de chimie organique (partie 3) sont peu ou mal traitées.

De manière plus ponctuelle, certains candidats écrivent des réactions de cyclisation intramoléculaire (partie 2), ou ajoutent le composé carbonyle à la place du bisphénol (2.3).

Remarques concernant la partie IV du sujet

Cette partie n'est également pas bien traitée. Souvent, elle n'est même pas abordée.

Autant l'énoncé de la loi de Beer-Lambert ne pose pas de problème, sauf dans certains cas isolés (1.1), autant son application donne lieu plusieurs fois à une "énormité" qui consiste à ajouter des valeurs de coefficients d'absorption molaires pris à des longueurs d'onde différentes lors de l'application de cette loi. Les circonstances s'aggravent lorsque le candidat écrit, quelques phrases plus loin, que la puissance de lumière absorbée est strictement égale à celle de la lumière incidente (1.6), même pour des valeurs d'absorbance relativement faibles. Il est navrant de constater que la fin de la partie 1 qui relève autant de la physique que de la chimie n'est abordée que par une petite minorité de candidats et correctement traitée que par une population encore plus réduite. Ceci dit, les raisonnements de cinétique posent un peu moins de problèmes que dans le cas de la polymérisation (partie III).

Même si quelques formules de Lewis laissent parfois à désirer, on peut noter un progrès sur l'écriture de ces formules dans la synthèse de colorants (partie 2).

La partie sur les orbitales moléculaires est rarement abordée. Dans ce domaine, les calculs semblent poser moins de problème que les questions "simples" dans lesquelles des explications qualitatives sont demandées : pratiquement aucun candidat ne répond que les orbitales de l'atome de carbone qui interviennent dans l'orbitale n_σ sont $2s$ et $2p_x$ (3.3), et des erreurs fréquentes sont constatées sur le caractère liant, non liant ou antiliant des orbitales (3.1). D'ailleurs, certains candidats ne semblent pas faire la différence entre une orbitale non liante et une orbitale antiliante.

Conclusion

Les remarques négatives mais, espérons-le, constructives qui figurent sur ce rapport sont apportées dans un but de perfectionnement. Le jury tient à féliciter les candidats pour leur effort et leur ténacité, aussi bien dans leur travail de préparation que pendant les cinq heures qu'a duré cette épreuve. Il apprécie en particulier la réactivité d'un bon nombre de candidats face au sujet qui leur avait été proposé.

Nanomagnétisme et sonde à effet Hall

Ce problème traite des propriétés magnétiques de la matière, à l'échelle micrométrique ou nanométrique. Les objets d'étude sont des macromolécules paramagnétiques ou ferromagnétiques organisées en cristal de taille nanométrique que l'on dépose sur la surface d'une sonde à effet Hall de taille comparable (voir figure 1). Le champ magnétique créé par la matière est obtenu en mesurant la tension de Hall de la microsonde. Cette technique présente l'avantage de pouvoir fonctionner à la fois sur une très large gamme de températures (du millikelvin à la température ambiante) et sur une très large gamme de champs magnétiques (du microtesla à la dizaine de teslas). Le candidat devra donc être particulièrement attentif aux valeurs des paramètres physiques correspondant aux conditions expérimentales de chacune des expériences décrites dans la deuxième partie.

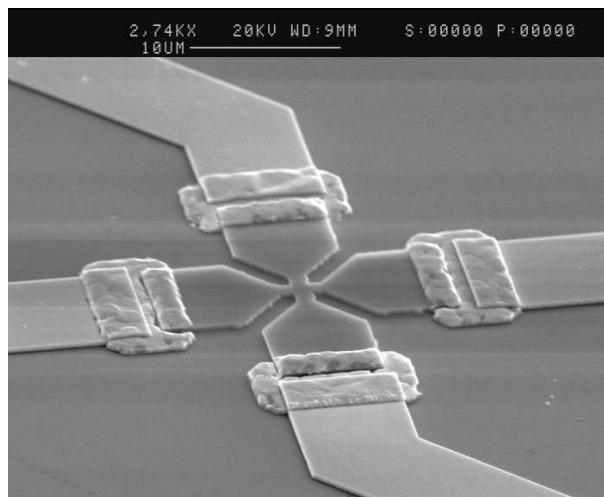


FIG. 1 – Sonde à effet Hall étudiée dans ce problème (Projet ANR NANO HALL). La partie active de la sonde est le carré central.

Ce problème comporte six questions indépendantes.

Les six questions sont organisées en deux parties.

La première partie, composée des quatre premières questions, traite de l'effet Hall et de son application à la mesure d'un champ magnétique par une microsonde. Dans la seconde partie, la sonde à effet Hall est mise en situation dans deux expériences, qui sont décrites dans les questions 5 et 6. Dans une première expérience, la sonde est utilisée pour détecter à température ambiante la résonance magnétique d'un grain paramagnétique de taille micrométrique. Dans la deuxième expérience, la sonde à effet Hall est utilisée pour mesurer l'aimantation d'un nanocristal moléculaire Fe_8 , à très basse température.

Formulaire :

On note x^* le complexe conjugué de x .

L'espace est ramené à un repère cartésien orthonormé à trois dimensions, de vecteurs de base $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$.

Lagrangien :

Soit $\mathcal{L}(\vec{r}, \vec{v}, t)$ la fonction "lagrangien" d'une particule de vitesse $\vec{v}$ à la position $\vec{r}$.

- On rappelle que dans cette description les variables $\vec{r}$ et $\vec{v}$ sont des variables indépendantes.
- On définit l'impulsion $\vec{p}$ de la particule par :

$$\vec{p} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial v_x} \vec{e}_x + \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial v_y} \vec{e}_y + \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial v_z} \vec{e}_z$$

- L'énergie de la particule est définie par la transformation de Legendre :

$$\mathcal{E} = \vec{p} \cdot \vec{v} - \mathcal{L}$$

"Fonction" $\delta(t)$ de Dirac :

- $\delta(t) = \infty$ si $t = 0$; $\delta(t) = 0$ si $t \neq 0$
- Pour toute fonction f , $\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \delta(t - t_0) dt = f(t_0)$
- $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$

Transformée de Fourier :

Définitions :

La transformée de Fourier directe d'une fonction $x(t)$ de la variable réelle t est définie pour toute fréquence f par la formule :

$$TF(x(t))(f) = \hat{x}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2i\pi f t} dt$$

La transformée de Fourier inverse de la fonction $\hat{x}(f)$ est donnée par la formule :

$$TF^{-1}(\hat{x}(f))(t) = x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{x}(f) e^{2i\pi f t} df$$

Quelques propriétés de la transformée de Fourier :

- $TF\left(\int_{-\infty}^{+\infty} x(t') y(t - t') dt'\right) = \hat{x}(f) \hat{y}(f)$;
- La transformée de Fourier de la fonction $x(t) = e^{-|t|}$ est : $\hat{x}(f) = \frac{2}{1 + 4\pi^2 f^2}$;
- La transformée de Fourier de la "fonction" $\delta(t)$ est : $\hat{\delta}(f) = 1$;

Développement en séries de Fourier d'une fonction en créneau :

Soit la fonction en créneau définie par :

$$U(t) = A \text{ pour } t \in \left[nT, nT + \frac{T}{2} \right[\text{ et } U(t) = B \text{ pour } t \in \left[nT + \frac{T}{2}, (n+1)T \right[$$

Alors :

$$U(t) = \frac{A+B}{2} + \frac{2(A-B)}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin((2n+1)\omega t)}{2n+1} \quad \text{où } \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Double produit vectoriel :

Soit $\vec{a} = \vec{a}(\vec{r}, t)$, $\vec{b} = \vec{b}(\vec{r}, t)$ et $\vec{c} = \vec{c}(\vec{r}, t)$, trois champs vectoriels :

- $\vec{a} \wedge (\vec{b} \wedge \vec{c}) = (\vec{a} \cdot \vec{c}) \vec{b} - (\vec{a} \cdot \vec{b}) \vec{c}$

Valeurs numériques de constantes fondamentales :

- Permittivité diélectrique du vide $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
- Perméabilité magnétique du vide $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$
- Vitesse de la lumière dans le vide $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- Constante de Planck réduite $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
- Constante de Boltzmann $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
- Nombre d'Avogadro $\mathcal{N} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Valeur absolue du magnéton de Bohr $|\mu_B| = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ J.T}^{-1}$
- Masse de l'électron $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- Charge élémentaire $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Première partie

Micro-sonde de Hall : de la force de Lorentz aux mesures d'aimantation

1 Mouvement d'une particule chargée dans un champ électromagnétique

On se restreint à une description non relativiste des phénomènes physiques (toutes les vitesses sont petites devant la vitesse de la lumière). Soit (K) un référentiel galiléen $(Oxyz)$ muni d'une base orthonormée $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$.

1.1 Lagrangien d'une particule dans un champ électromagnétique

En présence d'un champ électromagnétique caractérisé par le potentiel vecteur $\vec{A}(\vec{r}, t)$ et par le potentiel scalaire $\phi(\vec{r}, t)$, le lagrangien d'une particule de masse m , de charge q , située à la position $\vec{r}$ et animée de la vitesse $\vec{v}$ s'écrit :

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}mv^2 + q\vec{A} \cdot \vec{v} - q\phi$$

1. Calculer l'impulsion $\vec{p}$ et l'énergie $\mathcal{E}$ de la particule en fonction des grandeurs m , $\vec{v}$, $\vec{A}$ et ϕ .
2. (a) Montrer que l'énergie $\mathcal{E}$ de la particule peut s'écrire comme une somme de deux termes $\mathcal{E} = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_{el}$, dont on donnera l'expression ainsi qu'une interprétation physique.
(b) Montrer que $\mathcal{E}_c$ peut se mettre sous la forme :

$$\mathcal{E}_c = \frac{(\vec{p} - q\vec{A})^2}{2m}$$

1.2 Force de Lorentz et transformation des champs

L'équation de Lagrange permet d'aboutir à l'équation du mouvement :

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

1. Donner sans démonstration, l'expression des champs $\vec{E}(\vec{r}, t)$ et $\vec{B}(\vec{r}, t)$ en fonction du potentiel vecteur $\vec{A}$ et du potentiel scalaire ϕ .
2. Dans le référentiel (K) règne un champ électromagnétique $(\vec{E}(\vec{r}, t), \vec{B}(\vec{r}, t))$. Dans un référentiel (K') en translation rectiligne et uniforme par rapport à (K) à la vitesse $\vec{v}_e$, le champ électromagnétique est $(\vec{E}'(\vec{r}', t), \vec{B}'(\vec{r}', t))$.

En exprimant l'invariance des lois physiques par changement de référentiel galiléen, montrer que :

$$\vec{B}' = \vec{B} \quad \text{et} \quad \vec{E}' = \vec{E} + \vec{v}_e \wedge \vec{B}$$

3. À quelle condition portant sur le rapport $\frac{\|\vec{E}\|}{\|\vec{B}\|}$, existe-t-il un référentiel dans lequel le champ électrique $\vec{E}'$ s'annule ? Définir alors la vitesse de dérive $\vec{v}_d$ de ce référentiel (K_d) , en prenant $\vec{v}_d$ et $\vec{B}$ orthogonaux.

1.3 Mouvement d'une particule chargée dans un champ électromagnétique

Une particule de charge $q < 0$ et de masse m est placée dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$ avec $B_0 > 0$. On note $\vec{v}$ sa vitesse dans le référentiel (K) du laboratoire.

1. Montrer que la projection du mouvement de la particule dans le plan (Oxy) est un cercle décrit à la fréquence cyclotron $\omega_c = \frac{|q|B_0}{m}$ et dont on donnera le rayon.

Déterminer les expressions de $x(t)$ et de $y(t)$ pour les conditions initiales suivantes : à $t = 0$, $x = 0$, $y = 0$, $\frac{dx}{dt} = 0$ et $\frac{dy}{dt} = v_0 > 0$.

2. On place à présent la particule dans un champ magnétique constant $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$ et un champ électrique constant $\vec{E}_0 = E_0 \vec{e}_y$ avec $E_0 > 0$ et $E_0/B_0 < c$.

Montrer qu'il existe un référentiel (K_d) , (O', x', y', z') , dans lequel la particule est soumise à l'action du seul champ magnétique. Décrire le mouvement dans ce référentiel.

On donne les conditions initiales : à $t = 0$, $x' = 0$, $y' = 0$, $\frac{dx'}{dt} = 0$ et $\frac{dy'}{dt} = v_0 > 0$. On suppose de plus qu'à $t = 0$, les deux référentiels (K) et (K_d) coïncident. En déduire les expressions de $x(t)$ et de $y(t)$ dans le référentiel du laboratoire. Représenter schématiquement l'allure de la projection dans le plan (Oxy) de la trajectoire de la particule dans le référentiel du laboratoire dans les trois cas suivants : $v_0 > \frac{E_0}{B_0}$, $v_0 = \frac{E_0}{B_0}$ et $v_0 < \frac{E_0}{B_0}$.

3. On considère un plan infini d'électrons sans interaction, de densité surfacique uniforme N_S . Ces charges sont soumises à l'action d'un champ magnétique $\vec{B} = B_0 \vec{e}_z$ orthogonal au plan (Oxy) qui contient les charges et à celle d'un champ électrique $\vec{E} = E_0 \vec{e}_y$. Décrire brièvement le mouvement des charges et calculer le vecteur densité de courant moyen $\vec{j}_S$ dans le plan (Oxy) . Montrer que la grandeur $R_H = \frac{E_0}{\|\vec{j}_S\|}$ est homogène à une résistance.

Exprimer R_H en fonction de N_S , B_0 et e .

2 Sonde à effet Hall et mesure

On réalise un gaz bidimensionnel d'électrons libres, à l'interface entre deux semiconducteurs que l'on a fait croître couche atomique après couche atomique dans la direction (Oz) (voir figure 2) :

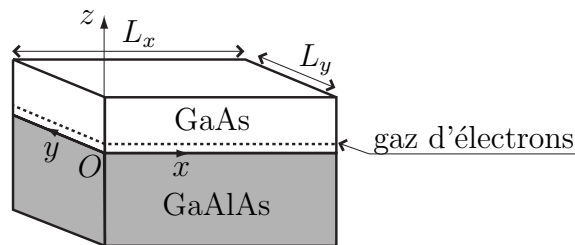


FIG. 2 – Structure de la sonde à effet Hall. Le gaz d'électrons occupe un espace bidimensionnel représenté par les pointillés.

Une barrière composée de GaAlAs est dopée en volume jusqu'au voisinage de l'interface avec le semiconducteur GaAs qui abrite le gaz d'électrons. L'énergie potentielle $V(z)$ de confinement au voisinage de l'interface est schématisée par un puits triangulaire (voir figure 3).

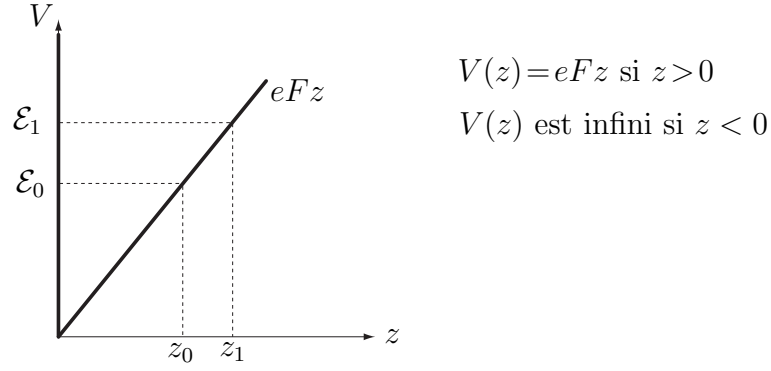


FIG. 3 – Énergie potentielle $V(z)$ de confinement au voisinage de l'interface.

2.1 Bandes d'énergie

On note F la norme du champ électrique selon l'axe z , à l'interface. Dans le plan (Oxy) de l'interface, les électrons sont considérés comme libres, à condition de prendre pour la masse de l'électron, une masse effective $m^* = 0,07m_e$ où m_e est la masse de l'électron dans le vide (Cf. formulaire). L'énergie potentielle électrostatique $V(z)$ est fonction uniquement de z .

Soit $\Psi(x, y, z)$, la fonction d'onde électronique décrivant un électron de la bande de conduction situé dans le puits triangulaire. On rappelle que la fonction Ψ obéit à l'équation de Schrödinger :

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*}\Delta\Psi(x, y, z) + V(z)\Psi(x, y, z) = \mathcal{E}\Psi(x, y, z)$$

où $\mathcal{E}$ est l'énergie de l'état quantique et où Δ désigne le laplacien.

1. On cherche les solutions de l'équation de Schrödinger sous la forme :

$$\Psi(x, y, z) = f(z)\Phi(x, y)$$

Montrer que $\Phi(x, y)$ et $f(z)$ sont solutions des équations :

$$\begin{cases} -\frac{\hbar^2}{2m^*}f''(z) + V(z)f(z) = \mathcal{E}_z f(z) \\ -\frac{\hbar^2}{2m^*}\Delta\phi(x, y) = \mathcal{E}_{x,y}\phi(x, y) \end{cases}$$

avec $\mathcal{E} = \mathcal{E}_z + \mathcal{E}_{x,y}$.

On définit une bande d'énergie associée à l'énergie $\mathcal{E}_z$, comme l'ensemble des niveaux d'énergie $\mathcal{E}_z$ fixée et d'énergie $\mathcal{E}_{xy}$ quelconque.

2. Mouvement dans le plan

- (a) On cherche $\Phi(x, y)$ sous la forme :

$$\Phi(x, y) = \frac{1}{\sqrt{L_x L_y}} \exp(ik_x x) \exp(ik_y y)$$

où L_x et L_y sont les dimensions de la sonde selon les directions Ox et Oy (voir figure 2). Donner alors l'expression de $\mathcal{E}_{x,y}$ en fonction de k_x et k_y .

- (b) Pour chaque bande d'énergie associée au mouvement selon Oz , on admet que le nombre d'états quantiques par unité de surface et d'énergie est donné par la formule (où l'on a tenu compte de la dégénérescence de spin) :

$$g_{x,y}(\mathcal{E}) = \frac{m^*}{\pi\hbar^2}$$

Vérifier l'homogénéité de cette expression et donner la valeur de cette constante pour GaAs en nombre d'états quantiques par meV (milliélectronvolt) et par m².

3. Mouvement selon Oz

On se restreint ici à l'étude du mouvement selon la direction Oz. On considère dans cette question le puits triangulaire représenté sur la figure 3, dont l'énergie s'écrit :

$$\text{pour } z < 0, \quad V(z) = +\infty \quad \text{et} \quad \text{pour } z > 0, \quad V(z) = eFz$$

Afin de trouver l'expression des énergies propres $\mathcal{E}_i$ pour le mouvement selon Oz, on utilise la condition de quantification concernant l'impulsion, écrite par Sommerfeld :

$$\int_0^{z_i} p_i(z) dz = \left(i + \frac{3}{4}\right) \pi \hbar, \quad i \in \mathbb{N}$$

où z_i vérifie $V(z_i) = \mathcal{E}_i$ (voir figure 3) et où $p_i(z)$ est la composante selon Oz, à la coordonnée z , de l'impulsion $\vec{p}_i$.

- Écrire de façon classique la conservation de l'énergie d'une particule de masse m soumise à l'énergie potentielle $V(z)$ et en déduire l'expression de l'impulsion $p_i(z)$ en fonction de l'énergie $\mathcal{E}_i$ du niveau i . Établir alors l'expression de l'énergie $\mathcal{E}_i$.
- Calculer $\mathcal{E}_0$ et $\mathcal{E}_1$ en meV dans le cas d'une jonction GaAlAs/GaAs pour laquelle $F = 6,5 \cdot 10^6 \text{ V.m}^{-1}$.

4. Cas général

On considère à présent le mouvement général dans les trois directions de l'espace.

- En utilisant les résultats des sous questions précédentes, montrer que chaque état électronique peut être caractérisé par trois paramètres (i, k_x, k_y) et que son énergie est : $\mathcal{E}(k) = \mathcal{E}_i + \Lambda k^2$ où $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ et Λ est une constante que l'on exprimera en fonction de m^* et $\hbar$. Tracer l'allure de $\mathcal{E}(k)$ pour différents niveaux $\mathcal{E}_i$.
- Exprimer le nombre maximal d'électrons par unité de surface, $N_{S\max}$, en fonction de $\mathcal{E}_0$, $\mathcal{E}_1$ et des constantes du problème, pour que seule la bande $\mathcal{E}_0$ soit peuplée, dans la limite des très basses températures. Effectuer l'application numérique.
- Le nombre d'électrons par unité de surface (ou densité surfacique) est égal à $N_S = 8 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$. Calculer l'énergie du dernier état occupé et donner un critère portant sur la température qui permet de savoir que la deuxième bande n'est pas peuplée.

Dans toute la suite, on supposera cette condition vérifiée.

2.2 Effet Hall dans la matière

La sonde est taillée dans un cristal contenant le gaz d'électrons bidimensionnel de densité surfacique N_S . La partie active est un carré de côté $L_x = L_y = L$. Elle est placée dans un champ magnétique uniforme perpendiculaire au plan (Oxy), $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$. On note $\vec{E}(\vec{r}) = E_x(\vec{r})\vec{e}_x + E_y(\vec{r})\vec{e}_y$ le champ électrique dans le plan (Oxy). On fait circuler un courant dans cette sonde et on suppose que les électrons dans le plan sont soumis à l'action de la force de Lorentz et d'une force de frottement sur le réseau cristallin $\vec{f} = -\frac{m^* \vec{v}}{\tau}$ où τ désigne un temps de collision moyen et m^* la masse effective de l'électron. Dans tous les calculs, la masse de l'électron est remplacée par sa masse effective : $m^* = 0,07m_e$.

- Écrire le principe fondamental de la dynamique appliqué à un électron, et montrer que la solution en régime permanent peut se mettre sous la forme tensorielle :

$$\begin{pmatrix} j_{Sx} \\ j_{Sy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$$

où la matrice σ est appelée *tenseur de conductivité* et où $\vec{j}_S$ est la densité surfacique de courant qui parcourt le gaz d'électrons bidimensionnel.

Exprimer les composantes du tenseur conductivité en fonction de la fréquence cyclotron (positive) $\omega_c = \frac{eB_0}{m^*}$ et de $\sigma_0 = \frac{N_s e^2 \tau}{m^*}$. Que représente ce dernier terme ?

2. Lors d'une mesure d'effet Hall, un courant circule, en régime permanent, dans la direction Ox en présence d'un champ $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$. On mesure la tension transversale V_H à l'aide d'un voltmètre d'impédance d'entrée infinie (voir figure 4) :

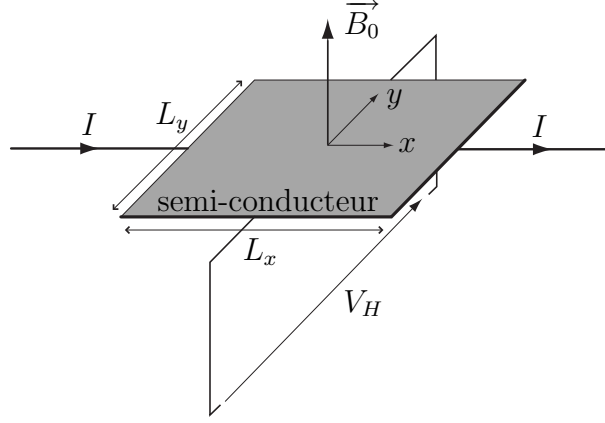


FIG. 4 – Schéma de la partie active de la sonde à effet Hall.

Établir la relation entre j_{Sx} et E_y en régime permanent en fonction de σ_0 , ω_c et τ (effet Hall).

3. En déduire l'expression de la résistance de Hall définie par : $R_H = \frac{V_H}{I}$, en fonction de e , B_0 et N_s .
4. Application numérique : on polarise une sonde à effet Hall avec une densité surfacique de courant limitée à cause des problèmes d'échauffement à $j_S = 200 \text{ A.m}^{-1}$. Exprimer la sensibilité de la sonde de Hall définie par $s = \frac{\delta V_H}{\delta B}$, en fonction de L , N_s , j_S et e . En prenant $N_s = 8 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$, calculer la sensibilité de la sonde de Hall dans les deux cas suivants : $L = 100 \text{ nm}$ et $L = 5 \text{ } \mu\text{m}$.

L'imperfection des appareils limite la précision de la mesure de la tension de Hall à $\pm 1 \text{ nV}$. Quel est le champ minimal que l'on peut mesurer à l'aide de ces deux sondes ?

3 Bruit de mesure

3.1 Signal aléatoire et densité spectrale de bruit

On considère un signal aléatoire $v(t)$ à valeurs réelles, de moyenne temporelle nulle, appelé *bruit* dans la suite du problème. On note $\hat{v}(f)$ la transformée de Fourier de $v(t)$, définie dans le formulaire. On définit la fonction de corrélation du signal $v(t)$ par :

$$C(\tau) = \langle v(t)v(t+\tau) \rangle$$

la valeur moyenne $\langle \dots \rangle$ étant une moyenne statistique sur l'ensemble des électrons. La fonction de corrélation ne dépend pas de t pour les signaux considérés.

Pour ces signaux, la valeur moyenne peut également être prise sur le temps (hypothèse ergodique) selon la formule (indépendante du choix de t_0) :

$$C(\tau) = \lim_{T_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{T_0} \int_{t_0 - T_0/2}^{t_0 + T_0/2} v(t)v(t+\tau) dt$$

On définit enfin la densité spectrale de bruit $S(f)$ par la transformée de Fourier de la fonction de corrélation, c'est-à-dire :

$$S(f) = \widehat{C}(f)$$

1. Quel est le sens de la quantité $C(0)$? Montrer que $\int_{-\infty}^{+\infty} S(f)df = \langle v^2(t) \rangle$. Justifier le terme de densité spectrale pour la quantité $S(f)$.
2. Montrer que $C(\tau) = C(-\tau)$. En déduire que la densité spectrale $S(f)$ est une fonction réelle.
3. Dans les deux cas suivants où l'on connaît la fonction de corrélation, calculer la densité spectrale du bruit, représenter la fonction $S(f)$ et interpréter le résultat obtenu pour :
 - (a) un bruit blanc, $C(\tau) = \Gamma\delta(\tau)$;
 - (b) un bruit lorentzien, $C(\tau) = C_0 \exp\left(-\left|\frac{\tau}{\tau_0}\right|\right)$.

3.2 Fluctuations de la vitesse dans les conducteurs

On considère un conducteur à l'équilibre thermodynamique à la température T , constitué d'un réseau cristallin dans lequel se déplacent des électrons à la vitesse $\vec{v}(t) = v(t)\vec{e}_x$. Les porteurs de charge sont soumis, de la part de ce réseau, à une force de frottement $\vec{f}(t) = -\frac{m^*}{\tau_0}v(t)\vec{e}_x$ qui freine leur mouvement et à une force aléatoire $\vec{f}_a(t) = m^*\eta(t)\vec{e}_x$ où m^* est la masse effective des porteurs de charge et $\eta(t)$ un bruit blanc caractérisé par les relations :

$$\langle \eta(t) \rangle = 0 \quad \text{et} \quad \langle \eta(t)\eta(t+\tau) \rangle = \Gamma\delta(\tau)$$

les valeurs moyennes $\langle \dots \rangle$ étant des moyennes statistiques sur l'ensemble des électrons.

1. Appliquer le principe fondamental de la dynamique à un électron de masse effective m^* et écrire l'équation différentielle à laquelle satisfait la vitesse $v(t)$.
2. Montrer que la solution de cette équation vérifiant $v(0) = v_0$ est :

$$v(t) = v_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) + \int_0^t \exp\left(-\frac{t-u}{\tau_0}\right) \eta(u)du$$

En déduire que le système perd rapidement la mémoire de ses états antérieurs.

Dans la suite de cette partie, on considérera que le régime transitoire est négligeable.

3. Calculer $\langle v(t) \rangle$ et donner l'expression de $\langle v^2(t) \rangle$ pour t grand devant τ_0 , en fonction de Γ et τ_0 (on pourra intervertir les intégrales temporelles et les moyennes statistiques).
4. Le théorème d'équipartition de l'énergie implique par ailleurs qu'à l'équilibre thermodynamique : $\frac{1}{2}m^* \langle v^2(t) \rangle = \frac{1}{2}k_B T$. En déduire la relation qui existe entre les deux grandeurs qui caractérisent les forces dans le conducteur, Γ et $\lambda = \frac{m^*}{\tau_0}$.
5. Montrer que la fonction de corrélation de la vitesse s'écrit :

$$\langle v(t)v(t+\tau) \rangle = \frac{k_B T}{m^*} \exp\left(-\left|\frac{\tau}{\tau_0}\right|\right)$$

Pour ce faire, on calculera $\langle v(t)v(t+\tau) \rangle$ pour t grand devant τ_0 (condition pour que le résultat ne dépende pas de t) et $\tau > 0$ et on utilisera la parité de la fonction de corrélation.

6. En déduire la densité spectrale de la vitesse $S(f)$. Tracer la courbe $20 \log(S)$ en fonction de $\log(f)$ pour $f > 0$. Mettre en évidence une fréquence de coupure f_c que l'on définira. En déduire que, pour $0 < f \ll f_c$:

$$S(f) = \frac{2k_B T \tau_0}{m^*}$$

Sachant que $\tau_0 < 10$ ns, que peut-on dire de f_c ? Dans la suite, on ne s'intéresse qu'aux fréquences inférieures à cette fréquence de coupure.

3.3 Bruit de Johnson Nyquist dans une résistance

On considère un gaz d'électrons bidimensionnel de longueur L_x et de largeur L_y (voir figure 4), de densité surfacique N_s , soumis aux forces $\vec{f}$ et $\vec{f}_a$ définies en 3.2 ainsi qu'à l'action du champ électrique $\vec{E} = E\vec{e}_x$.

1. Montrer que la conductivité surfacique de ce gaz est :

$$\sigma_S = \frac{N_s e^2 \tau_0}{m^*}$$

2. Établir l'expression de la résistance R du gaz bidimensionnel en fonction de N_s , e , m^* , τ_0 , L_x et L_y .
3. Exprimer l'intensité du courant $I(t)$ des électrons dans le semiconducteur à l'instant t en fonction de e , L_x et des vitesses $v_i(t)$ de chaque électron ($i \in (1, 2, \dots, N)$, où N est le nombre total d'électrons contenus dans le gaz bidimensionnel).

En déduire l'expression de la différence de potentiel $V(t)$ aux bornes de ce conducteur en fonction de R , e , L_x et des vitesses v_i .

4. Écrire la différence de potentiel $V(t)$ sous la forme : $V(t) = \sum_i V_i(t)$ et donner l'expression des $V_i(t)$. Exprimer la densité spectrale de la quantité $V_i(t)$, notée $S_{V_i}(f)$, en fonction de la densité spectrale de vitesse $S(f)$ dont l'expression est donnée en 3.2.6.

5. Dans le cas où $V = \sum_{i=1}^N V_i$, on admet que : $S_V(f) = N S_{V_i}(f)$. Déduire de cette relation et de la question précédente, la relation (R est la résistance) :

$$S_V(f) = 2k_B T R$$

4 Champ de moments magnétiques

4.1 Moments magnétiques et moments cinétiques. Facteur de Landé.

Soit un référentiel $(Oxyz)$ galiléen, dans lequel un ensemble de charges q , situées aux points M_n tels que $\vec{r}_n = \vec{OM}_n$, se déplacent avec la vitesse $\vec{v}_n = \frac{d\vec{OM}_n}{dt}$. Il n'y a aucun mouvement d'ensemble et $\vec{j} = \sum_n q \vec{v}_n = \vec{0}$.

On désigne par *moment magnétique* d'une collection de charge, la quantité classique, indépendante du point fixe O choisi :

$$\vec{\mathcal{M}}_O = \sum_n \frac{1}{2} \vec{r}_n \wedge q \vec{v}_n$$

1. Écrire le moment cinétique en O , $\vec{L}_O$, de l'ensemble des charges. Montrer que le moment magnétique de l'ensemble est proportionnel au moment cinétique :

$$\vec{\mathcal{M}}_O = \gamma_c \vec{L}_O$$

où γ_c est le *rapport gyromagnétique classique* dont on donnera l'expression en fonction de q et m .

2. Dès lors que l'on considère les aspects quantiques de la matière, le moment cinétique $\vec{J}$ ne se résume plus au moment orbital $\vec{L}$ mais comprend également le spin $\vec{S}$ des particules :

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

La relation entre moment cinétique et moment magnétique devient :

$$\vec{\mathcal{M}} = \gamma \vec{J} \quad \text{avec} \quad \gamma = -g \frac{e}{2m_e} \quad \text{où} \quad g \text{ est le facteur de Landé.}$$

La relation entre g et les nombres quantiques L , S et J qui caractérisent l'état quantique atomique ou moléculaire est :

$$g = \frac{3}{2} + \frac{S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

- (a) Exprimer les valeurs possibles de $\mathcal{M}_z$, projection de $\vec{\mathcal{M}}$ sur l'axe Oz , en fonction de g , du magnéton de Bohr $\mu_B = \frac{-e\hbar}{2m_e}$ et d'un nombre quantique m dont on précisera la définition et les valeurs possibles.

(b) **Le spin de l'électron**

Quelles valeurs prend le nombre m dans le cas d'un moment cinétique demi entier pour lequel $L = 0$ et $J = S = 1/2$? Calculer le facteur de Landé des spins électroniques et donner les valeurs possibles de la composante $\mathcal{M}_z$.

(c) **La molécule Fe₈**

Les propriétés magnétiques de la molécule Fe₈ (qui sera étudiée dans la deuxième partie) peuvent être correctement décrites par un "macro-spin" $S = 10$. Calculer le facteur de Landé dans le cas d'un macro-spin $S = 10$ avec $L = 0$ et $J = S = 10$. Donner les valeurs permises de la composante $\mathcal{M}_z$.

4.2 Champ créé par la matière aimantée

Dans cette question, on revient à une représentation classique. On rappelle le champ magnétique créé en un point P par un dipôle magnétique de moment $\vec{\mathcal{M}}$ situé au point O :

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu_0}{4\pi r^5} \left(3 \left(\vec{\mathcal{M}} \cdot \vec{r} \right) \vec{r} - r^2 \vec{\mathcal{M}} \right) \quad \text{où} \quad \vec{r} = \vec{OP} \quad \text{et} \quad r = OP$$

1. Champ sur l'axe d'un dipôle isolé

- (a) Exprimer le champ $\vec{B}$ créé sur l'axe Oz colinéaire à $\vec{\mathcal{M}}$, à la distance d du point O , par un dipôle magnétique de moment $\vec{\mathcal{M}}$ situé en O .
- (b) Application numérique : une nanoparticule comprenant un moment magnétique unique est déposée sur la surface d'une sonde à effet Hall. On suppose que le moment magnétique est perpendiculaire à la surface de la sonde. Le champ magnétique est mesuré au niveau du gaz électronique, soit à une distance $d = 200$ nm de la particule. Calculer le champ maximal que peut induire un seul atome de fer pour lequel $\mathcal{M} = 4\mu_B$. Même question pour une molécule Fe₈ dont le macro-spin vaut $S = 10$.

- (c) Quel est le principal obstacle à la mesure du moment magnétique d'une seule particule ou atome, si on utilise cette technique de sonde de Hall ?

2. Champ magnétique de la matière solide

On considère une sphère homogène, de rayon R , uniformément aimantée, plongée dans un champ magnétique extérieur $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$. Le vecteur aimantation (moment magnétique moyen par unité de volume) de la sphère est : $\vec{M} = M \vec{e}_z$.

- (a) Montrer que les courants d'aimantation qui apparaissent ont une densité volumique nulle et une densité surfacique (en coordonnées sphériques) :

$$\vec{J}_{Sa} = M \sin \theta \vec{e}_\varphi$$

- (b) Calculer le champ magnétique créé par ces courants au centre O de la sphère.
 (c) Calculer le champ magnétique à l'extérieur de la sphère en assimilant celle-ci à un dipôle magnétique dont on précisera le moment.
 (d) On suppose que le champ magnétique est uniforme à l'intérieur de la sphère. Montrer que cette hypothèse est compatible avec les relations de passage du champ magnétique à la surface de la sphère.
 (e) En déduire que le champ magnétique en un point situé à l'extérieur de la sphère, sur l'axe Oz , au voisinage immédiat de la surface, est :

$$\vec{B} = \frac{2}{3} \mu_0 \vec{M}$$

3. Aimantation d'un cristal ferromagnétique

Soit σ_{μ_B} le nombre de magnéton de Bohr porté par chaque atome dans un cristal composé d'un seul type d'atome. Exprimer l'aimantation à saturation du matériau en fonction de σ_{μ_B} , de la masse volumique ρ du cristal, de sa masse molaire M_o et du nombre d'Avogadro. Calculer $\mu_0 M_{\text{sat}}$ (en teslas) pour un cristal de fer pour lequel $\rho = 7,85 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$, $\sigma_{\mu_B} = 2,2$ et $M_o = 56 \text{ g.mol}^{-1}$.

4. Aimantation d'un cristal paramagnétique

On considère un grain de DPPH (Diphenylpicrylhydrazil) paramagnétique de forme sphérique. Le DPPH a une grande densité d'électrons non appariés : $n = 2 \cdot 10^{27} \text{ m}^{-3}$.

- (a) Exprimer l'aimantation à saturation en fonction de la densité d'électrons non appariés et de μ_B . Calculer $\mu_0 M_{\text{sat}}$ (en teslas). Comparer cette valeur avec la valeur obtenue pour le fer.
 (b) On note χ sa susceptibilité et on plonge l'ensemble dans un champ magnétique B_0 . On suppose que le sel paramagnétique reste dans le régime linéaire : $\mu_0 \vec{M} = \chi \vec{B}_0$. On donne : $\chi = 2,5 \cdot 10^{-5}$.
 i. Calculer la valeur de $\mu_0 M$, notée $\mu_0 M_0$, pour un champ $B_0 = 10 \text{ mT}$. Comparer cette valeur avec la valeur à saturation. L'approximation linéaire est-elle justifiée ?
 ii. On dépose un grain de DPPH sur une sonde à effet Hall placée elle-même dans un champ magnétique $\vec{B}_0$ perpendiculaire au plan d'électrons. Calculer le champ mesuré par la sonde (on supposera que le gaz bidimensionnel est à proximité immédiate de la matière aimantée). Quelle est la différence ΔB entre le champ mesuré en présence de DPPH et le champ mesuré en l'absence de DPPH ? Conclure sur la faisabilité de la mesure de χ par cette méthode.

Deuxième partie

Mesures d'aimantation

5 Résonance paramagnétique électronique

5.1 Effet gyroscopique et précession de Larmor

On place un dipôle magnétique, d'origine électronique, de moment $\vec{M}$ dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$. On rappelle la relation entre le moment magnétique et le moment cinétique associés au dipole magnétique : $\vec{M} = \gamma \vec{L}$ où le rapport gyromagnétique γ de l'électron est négatif.

1. Donner sans démonstration, les expressions de l'énergie potentielle du dipôle dans le champ magnétique, de la résultante et du moment de l'action mécanique exercée par le champ magnétique sur le dipôle.
2. Appliquer le théorème du moment cinétique au dipôle. En déduire que la norme du moment dipolaire magnétique est constante au cours du temps, de même que sa projection sur l'axe Oz . Montrer que le moment magnétique tourne autour de l'axe Oz à la pulsation de Larmor : $\omega_L = |\gamma|B$. Préciser le sens de rotation du dipôle.

5.2 Configuration de mesure

On place un grain sphérique microscopique de DPPH (Diphenylpicrylhydrazil) d'aimantation $\vec{M}$ (moment magnétique moyen par unité de volume) sur une sonde de Hall de même taille. L'ensemble est placé dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}_0$ aligné sur l'axe Oz perpendiculaire au plan de la sonde (on rappelle que la sonde de Hall est sensible au champ magnétique orthogonal à son plan). On superpose à ce champ $\vec{B}_0$ un autre champ magnétique, de norme constante, tournant à la pulsation ω dans le plan (Oxy) de la sonde : $\vec{B}_1(t) = B_1 \vec{u}_1(t)$ (où $\vec{u}_1(t)$ est un vecteur unitaire tournant dans le plan (Oxy) à la pulsation ω) (Cf. fig. 5).

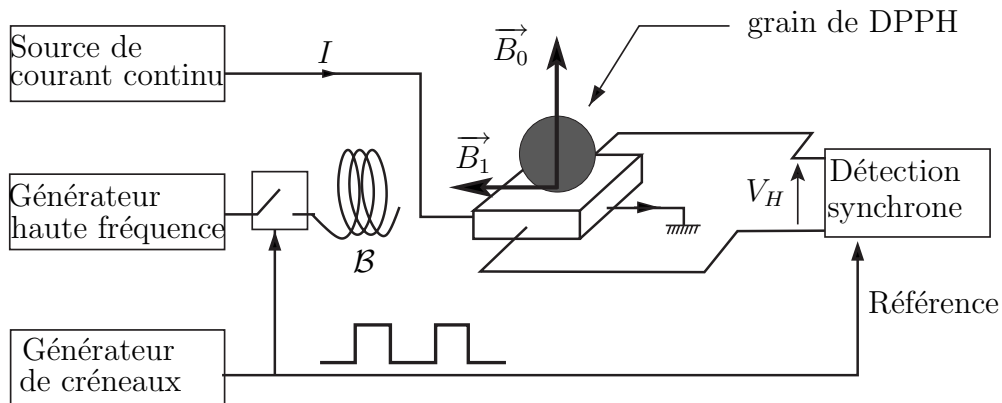


FIG. 5 – Configuration de mesure. Un grain sphérique de DPPH est déposé sur la sonde

Le champ uniforme $\vec{B}_0$ est créé par un dispositif non représenté sur la figure. Le champ $\vec{B}_1$ est créé par la bobine B . Il tourne, dans le plan de la sonde, autour de l'axe Oz , à la fréquence $f = 265$ MHz. Il est "allumé" et "éteint" périodiquement, grâce au générateur de crêteaux, avec une fréquence $f_R = 45$ kHz.

On note $\omega_0 = |\gamma|B_0 = -\gamma B_0$, $\delta\omega = \omega - \omega_0$ et $\omega_1 = |\gamma|B_1 = -\gamma B_1$. On définit (K_t) le référentiel tournant à la vitesse angulaire ω autour de Oz . On appelle (K) le référentiel du laboratoire $(Oxyz)$.

1. Appliquer le théorème du moment cinétique en O à un dipôle de moment $\vec{\mathcal{M}}$ dans le référentiel du laboratoire. En déduire l'expression de $\left(\frac{d\vec{\mathcal{M}}(t)}{dt}\right)_{(K_t)}$ dans le référentiel tournant, puis celle de $\left(\frac{d\vec{M}(t)}{dt}\right)_{(K_t)}$ dans ce même référentiel, en fonction de ω , ω_1 , ω_0 , du vecteur aimantation $\vec{M}$ et des vecteurs unitaires $\vec{e}_z$ et $\vec{u}_1(t)$.
2. Pour tenir compte des phénomènes de relaxation (interaction avec un réservoir), on introduit un couple de dissipation :

$$\vec{\Gamma}_r = \frac{\vec{M}_0 - \vec{M}(t)}{\tau}$$

où $\vec{M}_0 = M_0 \vec{e}_z$ est l'aimantation à l'équilibre créée par $\vec{B}_0$ en l'absence de $\vec{B}_1$.

Écrire la nouvelle expression de $\left(\frac{d\vec{M}(t)}{dt}\right)_{(K_t)}$.

3. Soient u , v , et M_z , les composantes cartésiennes du vecteur $\vec{M}$ dans la base orthonormée $(\vec{u}_1(t), \vec{v}_1(t), \vec{e}_z)$ où $\vec{v}_1(t)$ est un vecteur du plan (Oxy) orthogonal à $\vec{u}_1(t)$: $\vec{M}(t) = (u(t), v(t), M_z(t))$ dans cette base.

Établir les équations de Bloch qui donnent l'expression des dérivées $\frac{du(t)}{dt}$, $\frac{dv(t)}{dt}$ et $\frac{dM_z(t)}{dt}$, en fonction de $u(t)$, $v(t)$, et $M_z(t)$, ainsi que des pulsations ω_0 , ω et ω_1 .

4. On admettra que la solution de ce système en régime permanent est :

$$\begin{cases} u = -M_0 \frac{\omega_1 \delta \omega \tau^2}{1 + \delta \omega^2 \tau^2 + \omega_1^2 \tau^2} \\ v = -M_0 \frac{\omega_1 \tau}{1 + \delta \omega^2 \tau^2 + \omega_1^2 \tau^2} \\ M_z = M_0 \frac{1 + \delta \omega^2 \tau^2}{1 + \delta \omega^2 \tau^2 + \omega_1^2 \tau^2} \end{cases}$$

Tracer l'allure des courbes u , v et M_z en fonction de $\delta \omega$. Commenter. Préciser le comportement de M_z pour $\delta \omega = 0$ et donner une interprétation physique du phénomène.

5. Exprimer en fonction de μ_0 et M_0 , la différence entre la valeur de la quantité $\mu_0 M_z$ en présence du champ B_1 et en l'absence de celui-ci, à la résonance $\delta \omega = 0$: $\Delta(\mu_0 M_z) = (\mu_0 M_z)_{\text{on}} - (\mu_0 M_z)_{\text{off}}$. On donne $\tau = 60$ ns et $B_1 = 0,15$ mT. En déduire la valeur numérique du rapport $\Delta(\mu_0 M_z)/\mu_0 M_0$.
6. Le champ $\vec{B}_1$ est "allumé" et "éteint" à la fréquence $f_R = 45$ kHz. Montrer que la fonction $V_H(t)$ mesurée par la sonde à effet Hall polarisée en courant continu est une fonction en créneaux. On appellera V_0 et V_1 les valeurs minimale et maximale de $V_H(t)$ et on notera $\Delta V_H = V_1 - V_0$. On supposera acquis le résultat de la question 4.2.2 ainsi que la proportionnalité entre la mesure V_H et le champ B perpendiculaire à la sonde.

5.3 Résultats expérimentaux

L'expérience décrite précédemment est réalisée, à température ambiante $T = 300$ K, avec une sonde de Hall de côté $5 \mu\text{m}$, dont la sensibilité est : $s = 0,8 \text{ V.T}^{-1}$. On donne $B_1 = 0,15$ mT.

La courbe représentant $\Delta V_H = V_1 - V_0$ est reportée sur la figure 6¹ pour plusieurs valeurs du champ magnétique statique B_0 .

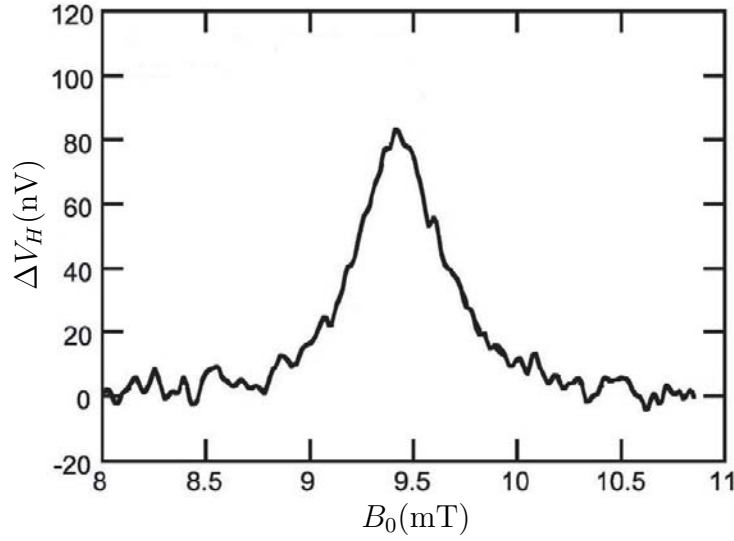


FIG. 6 – Résonance de spin pour un grain de DPPH mesuré à l'aide d'une sonde à effet Hall. En ordonnées : la mesure -en nanovolts- de la grandeur $\Delta V_H = V_1 - V_0$ définie en 5.2.6.

1. Expliquer pourquoi cette courbe présente un maximum. Montrer que la connaissance du champ B_0 à la résonance permet de calculer $|\gamma|$. Effectuer l'application numérique.
2. Évaluer la largeur du pic et donner une valeur approximative du temps de relaxation τ , en précisant le critère utilisé.
Une étude détaillée des résultats expérimentaux permettrait de trouver $\tau = 60$ ns, valeur adoptée dans la suite de la question.
3. On se propose enfin de déterminer χ pour le DPPH. Évaluer la valeur maximale de ΔV_H d'après la figure 6. En déduire la valeur de χ pour le DPPH (on utilisera la définition de χ donnée en 4.2.4.b, et on admettra le résultat de la question 4.2.2). La valeur tabulée est $\chi = 2,5 \cdot 10^{-5}$. Proposer une explication pour interpréter la différence.

5.4 Détection synchrone et bruit de mesure

Pour effectuer la mesure précédemment décrite, la tension de Hall est injectée en entrée de la détection synchrone dont l'impédance d'entrée est supposée infinie (voir figure 7).

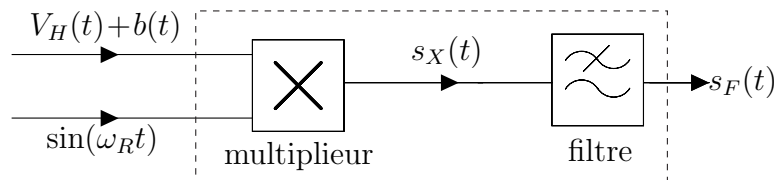


FIG. 7 – Détection synchrone

Le signal est la somme de deux termes : $s(t) = V_H(t) + b(t)$, où $b(t)$ est le bruit du composant et de la chaîne de mesure. La densité spectrale totale de bruit est la somme de la densité spectrale de bruit thermique $S_V(f)$ (étudié à la question 3.3 de la première partie), de la densité spectrale du bruit des appareils $S_A(f)$ et d'un bruit supplémentaire en $1/f$:

¹ G.Boero et al., Applied Physics Letters 79, p1498 (2001).

$$S(f) = S_V(f) + S_A(f) + \frac{\alpha}{f} \quad \text{où} \quad \alpha = \text{cste}$$

Le principe de la détection synchrone consiste dans un premier temps à multiplier le signal $s(t)$ par la composante $\sin(\omega_R t)$ où ω_R est la pulsation à laquelle on allume et on éteint le champ B_1 . Le signal de sortie du multiplieur est : $s_X(t) = (V_H(t) + b(t)) \sin(\omega_R t)$. Dans un deuxième temps, la détection synchrone filtre le signal pour ne conserver que la composante continue. On note $H(f)$ la fonction de transfert de ce filtre définie par : $\widehat{s_F}(f) = H(f)\widehat{s_X}(f)$ (voir figure 7). La fonction $H(f)$ vaut 1 si $|f| < \Delta f$, 0 sinon, avec $\Delta f \ll f_R$.

1. On suppose d'abord que le bruit est nul ($b(t) = 0$). Utiliser le formulaire pour écrire le signal $V_H(t)$ (trouvé en 5.2.6) sous forme d'une série de Fourier. Écrire le signal $s_X(t)$ en sortie du multiplieur. Le signal passe ensuite par le filtre $H(f)$. Quelle est la valeur $s_{F0}(t)$ du signal en sortie du filtre ?
2. On s'intéresse maintenant au bruit $b(t)$ caractérisé par sa densité spectrale $S(f)$. On appelle $b_X(t)$ et $b_F(t)$ les signaux obtenus respectivement en sortie du multiplieur et en sortie du filtre. Soit $C_X(\tau)$ la fonction de corrélation de $b_X(t)$ et $C(\tau)$ celle du bruit $b(t)$. On admet que :

$$C_X(\tau) = \frac{1}{2}C(\tau) \cos(\omega_R \tau)$$

- (a) Montrer que la densité spectrale du bruit (définie à la question 3.1) en sortie du multiplieur s'écrit :

$$S_X(f) = \frac{1}{4}(S(f + f_R) + S(f - f_R))$$

- (b) En déduire que la densité spectrale du bruit après le filtre est donnée par la formule :

$$S_F(f) = \frac{1}{2}S(f_R) \quad \text{si} \quad |f| < \Delta f \quad \text{et} \quad S_F(f) = 0 \quad \text{sinon.}$$

- (c) Montrer finalement que $\langle b_F^2(t) \rangle = S(f_R)\Delta f$. Comment diminuer la valeur efficace du bruit $\sqrt{\langle b_F^2(t) \rangle}$ en sortie de la détection synchrone ?
- (d) **Application numérique**

On s'intéresse au bruit de mesure que l'on peut observer sur la courbe expérimentale (figure 6). On évalue les fluctuations à $\sqrt{\langle b_F^2(t) \rangle} = 4,5 \text{ nV}$. On donne : $\Delta f = 0,24 \text{ Hz}$ et $S_A(f) = 2,5 \text{ nV}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$. La résistance de la sonde est $R = 200 \Omega$.

En utilisant le résultat de la question précédente, calculer la valeur de la densité spectrale du bruit total, en $\text{nV}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$, puis celle du bruit thermique (dont l'expression a été établie à la question 3.3) dans la même unité. En déduire la valeur de la densité spectrale du bruit en $1/f$. À quelle fréquence f'_R devrait-on travailler pour que cette valeur reste inférieure à la densité spectrale du bruit des appareils ?

6 Anisotropie magnétique et "effet tunnel de spin"

6.1 La molécule Fe_8

La molécule Fe_8 est constituée de 8 atomes de fer tenus entre eux par des ligands. Les interactions ferromagnétiques et antiferromagnétiques dans la molécule entraînent l'orientation de six spins atomiques selon l'axe Oz et deux de façon antiparallèle. Le spin équivalent est $S = 10$: la molécule Fe_8 est ainsi un "macro-spin". Ces molécules sont ensuite cristallisées en un monocristal de taille nanométrique et de symétrie triclinique, qui est déposé sur la surface d'une nanosonde à effet Hall. L'anisotropie magnétique entraîne une dépendance quadratique de l'hamiltonien en fonction des opérateurs de spin² : si Oz est l'axe facile d'aimantation et B_z le champ selon Oz ,

² C.Sangregorio et al., Physical Review Letters 78, p.4645 (1999)

$$\mathcal{H} = -\frac{D}{\hbar^2} \hat{S}_z^2 + \frac{K}{\hbar^2} (\hat{S}_x^2 - \hat{S}_y^2) - \frac{g\mu_B}{\hbar} B_z \hat{S}_z$$

où $\mu_B = \frac{-e\hbar}{2m_e}$ est le magnéton de Bohr et g le facteur de Landé ($g = 2$).

L'objectif de cette question est de déterminer les valeurs des constantes D et K à partir de résultats expérimentaux.

On note $|m\rangle_{m \in \{-10, \dots, 10\}}$ la base orthonormée des états propres de $\hat{S}_z$ qui sera utilisée tout au long de cette question :

$$\hat{S}_z |m\rangle = \hbar m |m\rangle \quad \text{avec } m \text{ entier relatif et } |m| \leq 10$$

Le terme $W = \frac{K}{\hbar^2} (\hat{S}_x^2 - \hat{S}_y^2)$ sera considéré comme une perturbation de l'hamiltonien :

$$\mathcal{H}_0 = -\frac{D}{\hbar^2} \hat{S}_z^2 - \frac{g\mu_B}{\hbar} B_z \hat{S}_z$$

1. Niveaux d'énergie

- (a) Pour $K = 0$ montrer que les vecteurs $|m\rangle$ sont également vecteurs propres de l'hamiltonien $\mathcal{H}_0$. Calculer les valeurs propres $\mathcal{E}_0(m)$ de $\mathcal{H}_0$.

Sur la figure 9 sont représentées les énergies $\mathcal{E}_0(m)$ d'une molécule Fe_8 en fonction de m ($m \in \{-10, 10\}$) pour un champ magnétique B_z nul.

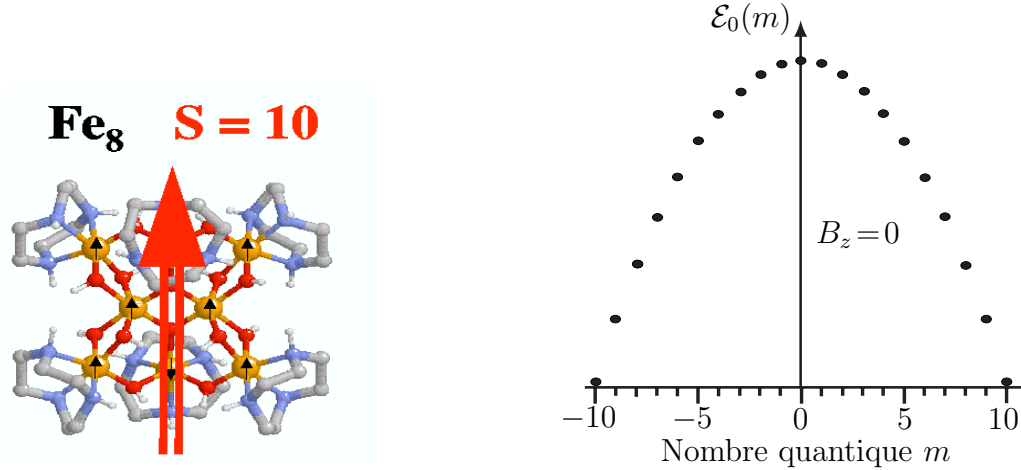


FIG. 8 – Représentation de la molécule Fe_8 .

FIG. 9 – Diagramme énergétique de $\mathcal{H}_0$ pour $B_z = 0$.

Expliquer ce diagramme. En particulier montrer que si $B_z = 0$, $\mathcal{E}_0(m) = \mathcal{E}_0(-m)$. Quelle est la valeur en énergie de la barrière d'anisotropie que doit passer un état de spin $S = \pm 10$ pour inverser son spin ?

En écrivant que cette énergie correspond à $k_B T_c$, déterminer la température T_c en dessous de laquelle il ne sera plus possible pour une molécule d'être thermiquement activée pour passer la barrière. Pour l'application numérique, on prendra $D = 0,275 k_B$.

- (b) Reprendre le schéma de la figure 9 et représenter le diagramme $\mathcal{E}_0(m)$ pour un champ $B_z \neq 0$.

Tracer, sur un même graphique, les courbes $\mathcal{E}_0(m)$ en fonction de B_z pour $m = -10, \dots, +10$. Montrer que les énergies des états $m > 0$ et celles des états $m' < 0$ se croisent pour des valeurs de B_z vérifiant :

$$B_z = n \frac{D}{g\mu_B} \quad \text{où } n \text{ est un entier relatif.}$$

- (c) On considère à présent deux niveaux ($|m\rangle$) et ($|m'\rangle$), et on se place près du champ B_z pour lequel $\mathcal{E}_0(m) = \mathcal{E}_0(m')$; on traite le terme $W = \frac{K}{\hbar^2}(\hat{S}_x^2 - \hat{S}_y^2)$ comme une perturbation de $\mathcal{H}_0$. L'objectif de cette question est de montrer que les niveaux d'énergie se séparent au lieu de se croiser et que la dégénérescence entre les états ($|m\rangle$) et ($|m'\rangle$) est levée (voir figure 11).

On part de l'équation de Schrödinger stationnaire $\mathcal{H}\Psi = \mathcal{E}\Psi$ appliquée dans l'espace des états de spins.

On note (β et δ sont deux nombres réels non nuls) :

$$\langle m|W|m'\rangle = \langle m'|W|m\rangle = \beta, \quad \langle m|\mathcal{H}_0|m\rangle = \mathcal{E}_0(m), \quad \langle m|W|m\rangle = \langle m'|W|m'\rangle = \delta$$

- i. Montrer que les états ($|m\rangle$) ne sont plus états propres de l'hamiltonien $\mathcal{H} = \mathcal{H}_0 + W$.
- ii. On cherche un nouvel état propre sous la forme :

$$|\Psi\rangle = x|m\rangle + y|m'\rangle \quad \text{avec } x \text{ et } y \text{ deux complexes}$$

Établir le système d'équations vérifié par x et y . Déterminer les deux énergies propres de l'hamiltonien $\mathcal{H}$, en fonction de $\mathcal{E}_0(m)$, $\mathcal{E}_0(m')$, δ et β . L'allure des nouvelles énergies est représentée sur la figure 11 en fonction de B_z : l'écart énergétique est minimal au niveau du croisement $\mathcal{E}_0(m) = \mathcal{E}_0(m')$. Exprimer cet écart énergétique minimal (noté Δ), en fonction de β . Déterminer les vecteurs propres dans le cas particulier où $\mathcal{E}_0(m) = \mathcal{E}_0(m')$. Interpréter physiquement ce résultat.

2. Paramagnétisme de Fe_8

Dans cette question on prend $W = 0$ donc $\mathcal{H} = \mathcal{H}_0$.

En présence d'un champ magnétique externe, les spins de la matière paramagnétique ont tendance à s'aligner le long du champ pour diminuer l'énergie potentielle. L'agitation thermique vient contrebalancer cette tendance. On décrit ici le paramagnétisme dans le cadre de la mécanique statistique en calculant la probabilité d'occupation des états quantiques et en faisant la moyenne sur N spins indépendants par unité de volume.

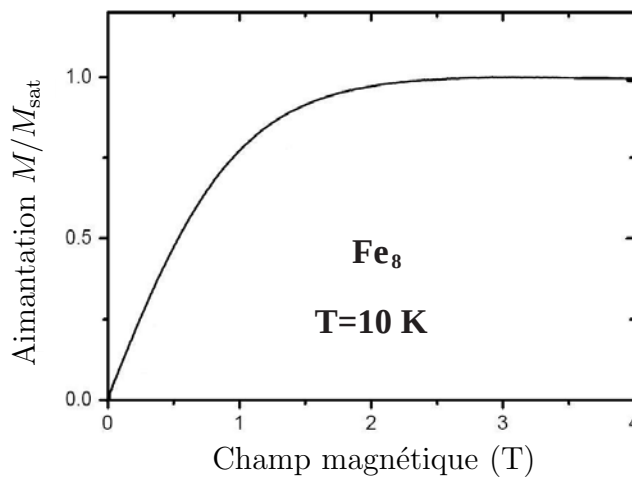


FIG. 10 – Aimantation normalisée en fonction du champ magnétique B_z .

- (a) On considère un mono-cristal de molécules Fe_8 placé dans un champ magnétique orienté selon l'axe facile Oz . Quelles sont les énergies accessibles à un macro-spin

(on rappelle que $g = 2$) ? Écrire l'expression de la fonction de partition Z pour un macro-spin ainsi que l'expression de la moyenne statistique $\langle M_z \rangle$ de l'aimantation (on rappelle que l'aimantation M_z d'un macrospin dans l'état $|m\rangle$ est $M_z = mg\mu_B$).

(b) Montrer que : $\langle M_z \rangle = Nk_B T \frac{1}{Z} \frac{dZ}{dB_z}$.

(c) Montrer que Z peut se mettre sous la forme :

$$Z = 1 + 2 \sum_{m=1}^{m=10} \exp(\alpha m^2) \text{ch}(mx)$$

où α et x sont des constantes à exprimer en fonction de g , μ_B , k_B , T , B_z et D .

(d) Calculer alors la valeur moyenne $\langle M_z \rangle$ et montrer que, pour B_z faible ou T grand :

$$\langle M_z \rangle = N \frac{(g\mu_B)^2 B_z}{k_B T} F(\alpha) \quad \text{où} \quad F(\alpha) = \frac{2 \sum_{m=1}^{m=10} m^2 \exp(\alpha m^2)}{1 + 2 \sum_{m=1}^{m=10} \exp(\alpha m^2)}$$

(e) La figure 10 représente la courbe expérimentale d'aimantation obtenue pour un cristal Fe_8 à une température $T = 10$ K. Déduire de cette courbe la valeur de $F(\alpha)$. En déduire la valeur de D/k_B à l'aide du tableau de valeurs suivant :

α	0.018	0.020	0.022	0.024	0.026	0.028	0.030	0.032	0.034	0.036
$F(\alpha)$	57.9	60.3	62.6	64.8	66.9	69.0	71.0	72.8	74.6	76.3

6.2 Effet tunnel magnétique

Un cristal de Fe_8 de taille nanométrique est déposé sur une sonde de même taille et placé dans le régime quantique à $T = 40$ mK. Expérimentalement, on constate qu'en dessous de la température de 360 mK, l'activation thermique cesse et que la relaxation des macro-spins est due uniquement aux processus tunnels. Lorsque le champ magnétique correspond à une situation de croisement, le macro-spin a une probabilité P de se retourner et de changer d'état. Il a une probabilité $1 - P$ de rester dans le même état (voir figure 11). La probabilité P est donnée par la formule (admise) de Landau-Zener-Stückelberg (appelée "formule de LZS" dans la suite du problème) :

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{\pi\Delta^2}{2\hbar g|\mu_B||m - m'| \left|\frac{dB_z}{dt}\right|}\right)$$

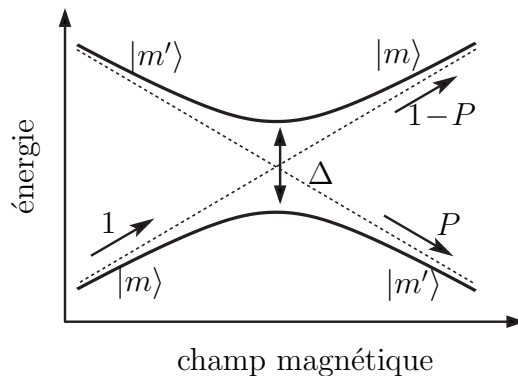


FIG. 11 – Au croisement de niveaux, le spin a la possibilité de se retourner par "effet tunnel".

Cette situation se manifeste clairement dans les cycles d'hystérésis représentés sur la figure 12³. On prépare l'échantillon dans un état tel que tous les macro-spins sont dans l'état $m = 10$ à $B_z = -1$ T. On augmente ensuite continûment le champ magnétique et l'on s'intéresse au passage par la valeur $B_z = 0$.

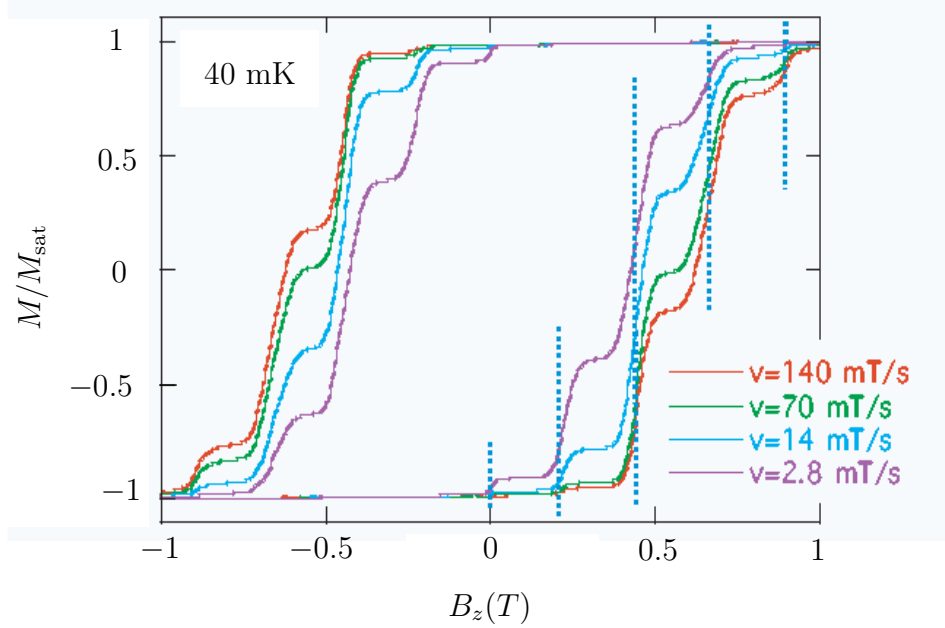


FIG. 12 – Cycles d'hystérésis de Fe_8 à $T = 40$ milli Kelvin. Les différentes courbes correspondent à différentes vitesses de balayage $v = \frac{dB_z}{dt}$ données en milli Tesla par seconde.

1. Montrer que l'aimantation ne peut évoluer tant que $B_z < 0$. Que se passe-t-il pour la valeur $B_z = 0$? En déduire le sens de parcours des cycles.
2. Lorsque le champ continue de croître, on observe une série de plateau d'aimantation. A quoi correspondent ces transitions? On s'appuiera sur la courbe $\mathcal{E}_0(m)$ en fonction de B_z pour les différentes valeurs de m , tracée à la question 6.1.1.b. Déduire de ces observations une valeur de D/k_B .
3. Montrer que les résultats expérimentaux de la figure 12, obtenus pour plusieurs vitesses de balayage en champ, corroborent la formule de LZS.

En utilisant la courbe obtenue pour la vitesse de balayage la plus faible, calculer une valeur approchée de la probabilité $P_{10,-10}$ de retournement du spin en $B_z = 0$.

4. Donner une expression approchée de la formule LZS dans le cas où la probabilité P est très inférieure à 1. Déduire de la question précédente, la valeur Δ de la séparation tunnel au niveau du croisement. Donner la valeur de Δ/k_B en μK .

Il est alors théoriquement possible de remonter à la valeur du paramètre K et l'on trouverait $K = 0,046k_B$.

Fin du problème

³ W.Wernsdorfer et al., Physical Review Letters 82, p.3903 (1999)

10. Rapport relatif au problème de physique 2008

Le problème de physique porte cette année sur le magnétisme (para ou ferro) des nanocristaux, et la mesure de ce magnétisme par des microsondes à effet Hall. Ces dernières années, les outils technologiques ont en effet permis la fabrication et le contrôle de nanocristaux aimantés à l'échelle nanométrique, ce qui a permis la mesure du magnétisme de ces nano-objets.

Ce sujet aborde naturellement dans sa première partie le problème de la mesure à bas bruit du magnétisme par une sonde de Hall.

Dans la seconde, il propose d'interpréter deux résultats expérimentaux récemment établis (voir références en notes dans l'énoncé) :

- dans la question 5, la mesure de la susceptibilité magnétique d'un composé paramagnétique par résonance paramagnétique électronique ;
- dans la question 6, la mesure de l'anisotropie magnétique dans les nanocristaux ferromagnétiques de Fe_8 .

Ce problème - à large spectre - permet aux candidats de mettre à profit leurs compétences dans les domaines suivants : électromagnétisme (y compris magnétisme), électronique, physique quantique et physique statistique. Il est construit sur une base de 6 questions indépendantes, ce qui permet aux candidats d'exprimer pleinement leurs capacités dans les domaines de leur choix.

Les correcteurs ont eu la satisfaction de voir se dégager un nombre conséquent de très bons candidats (70 copies sont créditées d'une note supérieure à 15/20), et finalement de classer efficacement les candidats admissibles.

Remarques d'ordre général

Comme à l'accoutumée, il est prévu que des applications numériques rapportent un certain nombre de points, pourvu que l'unité soit précisée et le nombre de chiffres significatifs raisonnable. Beaucoup de candidats ont négligé ces questions, peut-être pour gagner du temps, mais sacrifiant ainsi des points faciles à obtenir.

C'est pourquoi le jury rappelle l'importance des applications numériques. Non seulement elles rapportent des points, mais elles permettent aussi, après analyse de l'ordre de grandeur du résultat obtenu, de juger de la validité d'une formule théorique. De ce fait, elles sont complémentaires de l'analyse dimensionnelle. Correctement mise en œuvre, celle-ci aurait d'ailleurs permis à un grand nombre de candidats de ne pas écrire des résultats qui n'ont aucun sens. Les fautes d'homogénéité sont en effet sévèrement sanctionnées.

Il s'avère qu'il n'est pas très rentable pour un candidat de se disperser en essayant de grappiller des points par ci par là en commençant une multitude de questions sans aller jusqu'au bout. Il est bien plus payant de traiter les questions dans leur ensemble, chacune d'entre elles pouvant rapporter un nombre de points conséquent. Cela nécessite bien sûr concentration et rigueur. Ces candidats obtiennent ainsi un juste « retour sur investissement » parce qu'ils perçoivent mieux l'intérêt des phénomènes étudiés et le sens du sujet qui les guide efficacement. Dans les meilleures copies, plusieurs questions sont entièrement traitées.

Des phénomènes relevant de la physique quantique figurent dans les questions II et VI. Celles-ci sont bien réussies dans un grand nombre de copies, ce qui prouve que des efforts ont été consentis par les candidats

pour s'approprier au moins les rudiments de cette partie essentielle de la physique. Aujourd'hui, la physique quantique est quotidiennement mise en œuvre dans les laboratoires de recherche. Elle est appelée à jouer un rôle grandissant dans le matériel « grand public », du fait du développement des nanotechnologies.

Remarques portant plus spécifiquement sur la première partie

I. La première question fait appel à des connaissances de base en électromagnétisme et ne demande que des calculs élémentaires. Elle est réussie par une large majorité des candidats. Il n'en reste pas moins que le nombre de copies dans lesquelles le calcul du mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique n'est pas maîtrisé est inquiétant. Et il apparaît que, sauf exception, les candidats n'ayant pas réussi la première question, n'ont pas fait mieux ensuite.

II. Les résultats sur la deuxième question (qui a été également abordée par la quasi totalité des candidats) sont moins homogènes. L'étude porte sur la sonde de Hall, sa structure et ses propriétés conductrices. Les aspects quantiques sont limités aux notions de bande d'énergie et de densité d'états, concepts très généraux que l'on ne peut pas ignorer.

À la satisfaction des correcteurs, et peut-être grâce à un énoncé très progressif et détaillé, ces concepts paraissent relativement maîtrisés dans un grand nombre de copies.

En revanche, le jury est surpris par le nombre de candidats incapables de mener à bien le calcul de la matrice de conductivité qui est relativement élémentaire.

III. La troisième question traite du bruit de mesure, facteur limitant la résolution. Le candidat doit mener à bien des calculs plus importants que dans le reste du sujet. Cette question est peu souvent abordée et, lorsqu'elle l'est, c'est de manière superficielle, comme si les candidats s'auto-censurent sur un sujet qu'ils connaissent mal.

En réalité, seules deux ou trois sous-questions demandent un développement important. Et finalement, l'ensemble de cette question exige surtout un peu de concentration et est abordable sans connaissance particulière. D'ailleurs, une très large majorité des candidats qui s'y sont attaqués a été généreusement récompensée.

IV. Cette question IV aborde le magnétisme et son origine quantique. Le début permet de discriminer les candidats sur leurs connaissances de base dans ce domaine. Le magnétisme de la matière peut se comprendre en effet à partir du magnétisme des atomes et de leur moment cinétique total. Les candidats parvenus à la fin de cette question sont largement récompensés grâce aux nombreuses applications numériques qui rapportent des points.

Remarques portant sur la deuxième partie

V. L'expérience décrite à la question 5 est assez bien traitée par un bon nombre de candidats, exception faite de la « détection synchrone ». Trop souvent, pour un moment magnétique placé dans un champ magnétique, les expressions de l'énergie et celle du moment du couple exercé sur lui sont ignorées. Le phénomène de résonance paramagnétique électronique est complexe mais peut être facilement mis en équation. Mais, même dans le cas où il ne l'est pas, le résultat donné dans l'énoncé permet d'aller plus loin dans cette question. Finalement, quelques très bonnes copies abordent avantageusement le traitement du bruit de mesure.

VI. La question VI envisage le problème du magnétisme quand les barrières d'énergie ne peuvent plus être franchies grâce à l'agitation thermique. Dans ce cas, le nombre quantique du macro-spin ne peut évoluer que lors du croisement de niveaux quantiques. Le début fait appel à quelques notions élémentaires de mécanique quantique, comme les valeurs et vecteurs propres d'opérateurs, ainsi que la levée de dégénérescence au croisement de deux niveaux. Les correcteurs sont satisfaits du nombre de candidats qui abordent cette question et se félicitent du fait qu'ils s'en sortent en général très bien.

Cette question, la plus originale du problème, permet finalement de donner une valeur numérique aux paramètres d'anisotropie du magnétisme contenus dans l'opérateur hamiltonien. La deuxième moitié est rarement abordée.

11. DÉROULEMENT DES ÉPREUVES ORALES

SESSION 2008

Généralités

Les épreuves définitives (pratiques et orales) se sont déroulées au Lycée Marcelin Berthelot de Saint Maur du 24 juin au 16 juillet 2008. Le jury a délibéré immédiatement après la fin des épreuves. Les résultats ont été proclamés le 17 juillet, et le jury a reçu aussitôt les candidats qui le désiraient, afin de commenter leurs épreuves.

Des précisions sur le déroulement des épreuves et des renseignements pratiques figurent sur le site web de l'agrégation de physique (<http://agregation-physique.org/>).

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)

A la fin du tirage au sort, les candidats peuvent visiter les bibliothèques et la collection de matériel de physique et de chimie. Les enveloppes sont ouvertes par le candidat au début de chacune des épreuves qui commencent dès le lendemain du tirage au sort. A la session 2008, 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.

Les épreuves, qui sont publiques, se déroulent 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.

Il est demandé aux candidats de se munir d'une pièce d'identité en cours de validité, de transparents vierges, des instruments nécessaires pour écrire sur papier ou sur transparent, ainsi que d'une blouse pour la leçon de chimie. L'usage des calculatrices personnelles et des téléphones portables n'est pas autorisé.

Les candidats ont à leur disposition :

- du matériel scientifique, c'est-à-dire des appareils mis à disposition par les centres de préparation et le lycée Marcelin Berthelot ;
- des livres et manuels fournis par les centres de préparation (les photocopiés de cours sont interdits) ;

- un ordinateur équipé entre autres de la suite Office, du logiciel Synchronie et d'une banque de documents numériques, comportant plus de 2600 diapositives numérisées et une vingtaine de mini séquences vidéo ;

- un vidéo projecteur interfacé avec l'ordinateur, qui permet la projection de documents issus de la banque de données ou mis au point pendant le temps de préparation (feuilles de calculs, graphes, tableau de mesures, ...).

Peuvent être également fournis :

- une calculatrice de poche ;

- une caméra webcam ou flexcam ;

- un rétroprojecteur (les transparents vierges pour rétroprojecteur ne sont pas fournis).

Les candidats n'ont pas accès à Internet

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 bibliothèques restent ouvertes aux candidats tous les soirs de 18 h 15 à 19h30.

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 le candidat 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. Même si tous ces outils, qui sont une aide très appréciable pour les expériences, sont d'une utilisation aisée, une connaissance minimale de ces derniers est néanmoins utile. Si un candidat est dérouté par un matériel précis auquel il est peu ou pas habitué, 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 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.

12-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)

12-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.

13. Rapport relatif à la leçon de physique

Déroulement de l'épreuve

L'épreuve de la leçon de physique consiste à présenter en 50 minutes et devant un jury une leçon tirée au sort dans une liste de sujets figurant dans le rapport de l'année précédente. La leçon présentée doit se situer au niveau de la licence des Universités ou des classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE). La préparation dure 4 heures. Le candidat dispose pour cela d'une bibliothèque où sont regroupés et classés des ouvrages scientifiques (allant des manuels scolaires classiques aux ouvrages les plus spécialisés). Des membres du personnel technique sont présents pour lui remettre le matériel qu'il souhaite utiliser pour étayer sa présentation orale. Les expériences sont réalisées conformément aux prescriptions du candidat et seront développées sous sa seule responsabilité lors de la présentation de la leçon devant le jury. Le technicien est absent lors de la présentation de la leçon.

L'exposé est suivi d'un entretien de 20 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.

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. Toutes n'ont malheureusement pas été de ce niveau. 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 pas un séminaire spécialisé et ne peut pas non plus se réduire à un exposé de vulgarisation scientifique. 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, tant dans la forme que sur le fond. Il est important pour le candidat de mettre en valeur par une présentation dynamique l'intérêt du sujet qu'il expose, d'en illustrer l'importance par l'étude ou la description d'applications même si cela n'est pas explicitement indiqué dans le titre de la leçon. Les thèmes abordés doivent être traités en profondeur et les applications présentées avec rigueur et précision. 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.

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. Il est préférable d'approfondir quelques points en maintenant une rigueur nécessaire, plutôt que de survoler un trop grand nombre d'aspects. 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 constituer une stratégie pour contourner le sujet demandé.

La précision du vocabulaire et de l'expression scientifique est essentielle. La nature des paramètres et des grandeurs utilisés (vectorielle, scalaire, norme, projection, ...) doit être claire est maintenue au

cours de l'exposé. D'une manière générale, toutes les grandeurs introduites doivent être définies avec soin.

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 vivement déconseillé 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 pourra demander des précisions sur les étapes intermédiaires au cours de la séance de questions.

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 la cohérence des notations utilisées sur les documents qu'il présente, avec celles qu'il a adoptées durant son exposé. Le candidat doit pouvoir justifier la pertinence des documents présentés dans le cadre de la leçon.

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.

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.

Remarques particulières sur quelques leçons

Leçon 1 : L'approche énergétique du contact doit être développée. Le roulement est trop rarement abordé. Il convient de s'interroger sur les passages entre les différents régimes de glissement et de non glissement.

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. Cette leçon n'est ni une leçon de cinématique, ni une leçon sur les référentiels non galiléens.

Leçon 3 : Ici encore la définition correcte des référentiels est primordiale. 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. Il est rappelé que le moment cinétique et le vecteur rotation ne sont *a priori* pas colinéaires.

Leçon 5 : Il existe d'autres exemples que les interactions newtoniennes. La distinction entre le mouvement d'ensemble et le mouvement barycentrique est fondamentale.

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 toujours maîtrisé. Les candidats sont encouragés à diversifier les exemples traités.

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

Leçon 9 : La signification physique du nombre de Reynolds est ici centrale.

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. 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. Cette leçon est trop souvent réduite à la résolution d'une suite d'exercices. Pour 2009, elle est remplacée par un nouveau sujet.

Leçon 12 : Les notions de moyennes, de valeurs quadratiques moyennes ainsi que l'exploitation des hypothèses formulées pour l'étude du gaz parfait sur l'évaluation de ces grandeurs sont très souvent mal introduites, voire mal comprises.

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, sur la manière d'obtenir toute l'information sur un système parvenu dans cet état et non sur la nature de cette information. Dans la liste 2009, le titre de cette leçon est modifié.

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. Les exemples d'application sont indispensables.

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 18 : Les notions de probabilités et les statistiques mises en œuvre doivent être introduites de manière précise.

Leçon 19 : Les conditions d'utilisation du facteur de Boltzmann doivent être précisées. L'atmosphère en équilibre isotherme n'est qu'un exemple parmi d'autres permettant d'introduire le facteur de Boltzmann.

Leçon 20 : La leçon doit permettre d'aborder la notion de transfert thermique radiatif et d'en présenter des applications. La démonstration de la loi de Planck n'est pas le centre de la leçon.

Leçon 21 : L'aspect microscopique doit être abordé.

Leçons 22 : Cette leçon nécessite une bonne connaissance des machines présentées et de leurs applications.

Leçon 23 : Il faut poser des conventions précises et s'y tenir tout au long de la leçon. En outre, il est impératif de faire le lien entre f.e.m. et courant induits.

Leçon 24 : Il y a souvent confusion entre système bouclé et contre réaction. La stabilité des systèmes bouclés est mal comprise.

Leçon 25 : Il convient d'éviter de se limiter à la présentation d'un catalogue d'opérations. Pour 2009, le titre de la leçon est modifié afin d'introduire la possibilité d'opérations non linéaires.

Leçon 26 : Les notions d'impédance sont rarement maîtrisées. Un milieu unidimensionnel peut aussi être dispersif alors que les candidats n'envisagent trop souvent que des signaux monochromatiques.

Leçon 27 : L'aspect énergétique est trop souvent négligé. L'approximation acoustique est souvent mal dégagée. Pour 2009, le terme « sonore » est remplacé par le terme « acoustique » pour indiquer qu'on peut s'intéresser à des signaux non audibles par l'homme.

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 31 : Les relations de Fresnel ne sont pas le centre de cette leçon.

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 34 : L'intérêt de l'introduction de la notion de chemin optique est central dans cette leçon.

Leçon 37 : Il est indispensable de développer des applications.

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 : Les phénomènes de diffraction concernent d'autres ondes que les seules ondes électromagnétiques.

Leçon 41 : Il ne faut pas oublier que le photon possède un moment cinétique. Les applications ne se limitent pas à l'effet Compton. Les récents développements dans le monde quantique constituent une mine d'applications pour cette leçon.

Leçon 42 : La justification physique des relations de continuité aux interfaces est trop souvent éludée.

Leçon 43 : Cette leçon n'est pas un catalogue d'expériences retraçant l'histoire de la mécanique quantique. Il est indispensable de dégager les aspects propres ou spécifiques à la mécanique quantique dans les exemples choisis. Le jury a relevé que dans les leçons évoquant l'expérience des franges d'Young, la notion de la perturbation de la mesure et son lien avec la disparition du contraste n'est pas comprise.

Leçon 44 : Le modèle de Bohr a maintenant une importance surtout historique. Il est évidemment possible de l'aborder mais il n'est pas un « passage obligé » pour aborder la quantification. L'interprétation des principaux résultats de la théorie quantique de l'atome d'hydrogène est primordiale.

Leçon 45 : Ici encore la justification des relations de continuité aux interfaces est importante.

Leçon 46 : Les applications doivent être envisagées. Parmi elles, figure l'énergie nucléaire, qu'il paraît difficile de ne pas aborder.

Leçon 48 : Il est conseillé pour cette leçon d'éviter de faire un catalogue mais de présenter plutôt, sur quelques exemples, les phénomènes à l'origine de la cohésion des molécules et solides. Pour 2009, le titre de la leçon est modifié.

Leçon 49 : L'oscillateur unique, et même les deux oscillateurs couplés peuvent être considérés comme des pré-requis. Pour 2009, le qualificatif « unidimensionnelle » remplace « linéaire ».

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 53 : La conduction électrique dans les semi-conducteurs est en général présentée de manière très approximative.

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

Généralités

Le présent rapport qui correspond aux épreuves de 2008 veut aider les futurs candidats à l'épreuve orale de chimie. Il vient s'ajouter aux rapports précédents qui sont toujours d'actualité pour les remarques générales qu'ils contiennent et dont la lecture est vivement conseillée. Les rapports édités depuis 2003 sont disponibles à l'adresse <http://agregation-physique.org>. Les intitulés des leçons de la session 2008 se rapportent 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.

Durant cette session, le jury a pu assister à des prestations de très bonne qualité au cours desquelles les candidats ont montré leur aptitude à maîtriser le sujet proposé et les techniques expérimentales mises en jeu, l'étendue de leur savoir et leurs capacités à le transmettre. Le jury félicite ces candidats. En revanche, trop d'exposés ont été réalisés à un niveau inacceptable pour des futurs enseignants en classe d'enseignement secondaire et post-bac. Un manque de connaissances peut être excusable, mais le jury a sévèrement sanctionné des présentations au cours desquelles toute rigueur scientifique est absente.

Si certaines recommandations de ce rapport sont spécifiques, d'autres ont déjà été formulées dans ceux des années précédentes. Mais force est de constater que des pratiques perdurent alors même qu'elles sont préjudiciables aux candidats et qu'il faut encore les rappeler.

Après une préparation qui dure 4 heures, les candidats disposent de 50 minutes pour présenter l'exposé de la leçon. L'entretien se poursuit ensuite pendant une vingtaine de minutes par des questions dont les réponses apportées permettent au jury de vérifier les connaissances du candidat et, le cas échéant, de lui faire corriger, s'il le peut, les erreurs commises pendant l'exposé de la leçon. Durant cette d'interrogation, une aptitude à la réflexion est attendue plus que des réponses toutes faites.

La préparation

Pendant la préparation de la leçon, les candidats peuvent consulter des ouvrages du secondaire et du supérieur, les tables de données et quelques articles et revues plus spécialisés. Ces ouvrages sont disponibles pendant la leçon si les candidats désirent projeter à l'aide d'une « flexcam », certaines figures ou schémas. De plus ils ont accès à des documents numérisés dans la salle qui leur est attribuée pour la leçon. Ces documents sont utilisables pendant la présentation, tout comme certains logiciels. Toutefois, le jury rappelle que ces documents proviennent de nombreuses sources et qu'ils peuvent contenir des erreurs. Il convient donc d'avoir du recul. Le jour du tirage au sort, les candidats admissibles peuvent visiter les lieux et découvrir ces documents numérisés.

Le temps de préparation doit permettre au candidat de construire un plan de la présentation cohérent, de rechercher les données bibliographiques nécessaires et de préparer l'ensemble des expériences à réaliser pendant la présentation. Ce dernier point est important : souvent, lorsqu'une manipulation est tentée sans avoir été testée auparavant, il y a échec. Les réactifs et montages nécessaires à l'exposé doivent être prévus et installés pendant le temps de préparation. Pendant

celle-ci, il est également possible de réaliser des expériences demandant des durées importantes pour ne garder que les étapes essentielles ou la caractérisation de produits obtenus lors de la présentation. Il est toutefois important de rappeler que la leçon doit contenir des parties expérimentales réalisées devant le jury. Montrer un composé sur un filtre ou un plateau de balance, se contenter d'exhiber une courbe sur un écran d'ordinateur ne répondent pas aux exigences du jury.

Les titres et les niveaux de classe donnés aux leçons sont à lire avec attention. Cinquante minutes ne permettent pas des développements qui demandent plusieurs heures de cours dans les classes considérées. Il appartient donc au candidat de ne pas faire de longs rappels sur des notions qui doivent être connues des élèves. De même il convient aussi de limiter le volume des nouvelles connaissances à apporter pour ne pas présenter un programme trop vaste qui conduit toujours à des imprécisions dans des développements trop rapidement effectués. C'est ainsi que, au cours de la leçon 34, il est peu judicieux de traiter en détail l'ensemble de la métallurgie du zinc qui, en outre, comprend des parties hors sujet de la leçon.

Dans les leçons qui traitent de **principes**, il faut bien comprendre ce qui est attendu. Certes, une leçon sur un « principe » doit inclure des définitions, des formules, des calculs, des équations, c'est-à-dire la théorie. Mais le jury attend également que toutes « ces belles choses » aient des retombées dans les illustrations expérimentales qui suivent. Sur le premier point où il est important de bien distinguer les développements à faire et ceux à éviter, une amélioration est incontestable. Il n'en est pas de même pour le second. Par exemple, après avoir fait un développement sur ce qu'est un « bon dosage », le candidat doit se demander si l'indicateur de fin de réaction choisi joue effectivement ce rôle. Autrement dit, le « principe » ne doit pas uniquement être un développement théorique, mais doit inclure ce qui est à la base des aspects pratiques.

Pour les leçons demandant des **illustrations expérimentales et des applications**, il ne s'agit pas de développer toutes les théories et démonstrations nécessaires pendant la majeure partie du temps de la présentation et se contenter de quelques (souvent une ou deux) expériences sommaires. Ainsi, pour la leçon 32, il ne s'agit pas de se limiter à l'étude détaillée des relations concernant les variations de l'enthalpie libre lors de l'évolution d'un système ; grâce à des exemples expérimentaux qui existent en grand nombre, il faut prouver la réalité des phénomènes de déplacement d'équilibre et développer réellement les applications industrielles qui en découlent.

Présentation de la leçon (50 minutes)

L'exposé

Rappelons que les candidats disposent de 50 minutes pour exposer la leçon. Le jury les avertit lorsqu'il ne leur en reste que quelques unes. Les leçons écourtées significativement se voient sanctionnées et les candidats dépassant les cinquante minutes réglementaires sont interrompus. Il faut regretter que de nombreux candidats ne mettent pas assez à profit les 5 dernières minutes qui représentent 10% du temps de présentation. Cela permet d'exposer sereinement un point important de la leçon ou même de présenter une expérience à condition de la maîtriser suffisamment et de ne pas être pris de panique. Au lieu de cela, certains candidats se mettent en "roue libre" ou essayent de terminer par une conclusion, souvent banale.

À une leçon « clé en main » vue de nombreuses fois, le jury préfère (et le manifeste par les notes attribuées) une prestation où le candidat montre qu'il possède suffisamment de recul pour être original. Les livres de l'enseignement secondaire ne sont pas à considérer comme des textes réglementaires imposant le déroulement des leçons de façon stricte et impérative. Le jury apprécie que les candidats n'hésitent pas à utiliser **des sources bibliographiques variées**.

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 examiner une réalisation expérimentale. Cela ne doit pas perturber le candidat. Celui-ci doit se comporter comme s'il était en présence d'une classe à la compréhension particulièrement rapide et pour laquelle **il n'est pas nécessaire de développer les connaissances de base pré-requises, les calculs élémentaires** ou des précisions sur les montages expérimentaux simples.

Ce qui ne relève pas du niveau d'un concours d'agrégation (comme la détermination d'une concentration après une dilution ou un dosage) ne doit évidemment pas donner lieu à de longs développements préjudiciables au temps dont dispose le candidat. De plus, le fait d'anticiper des calculs avant la présentation devant le jury permet d'éviter des erreurs comme $6 \text{ mL} = 6 \times 10^{-9} \text{ m}^3$ qui sont dues à l'énervement. Les candidats sont amenés à tenter de justifier des résultats manifestement faux par des raisonnements les mettant eux-mêmes en défaut ou par des pirouettes comme « j'y reviendrai plus tard », phrase rituelle qui a toujours comme signification « oublions ceci le plus vite possible » puisqu'en aucun cas le problème n'est évoqué par la suite.

L'introduction et la conclusion sont des parties importantes de l'exposé que doit réaliser le candidat et le jury apprécie celles qui sont soignées. Les pré-requis nécessaires ne constituent pas une introduction. Lorsqu'elle existe, trop souvent, cette dernière n'est constituée que d'idées très vagues sur le sujet qui va ensuite être développé. De la même façon, il est rare d'entendre une conclusion correcte. Il n'y a aucun intérêt à finir par « on a vu que » suivi du rappel des différentes parties de l'exposé. En revanche le jury apprécie une fin de la forme « il faut retenir ... » ou une conclusion en ouverture par exemple sur des applications industrielles ou biologiques bien actuelles.

Un futur enseignant doit savoir que sa **façon de s'exprimer** déteindra sur ses élèves. Les sciences requièrent un vocabulaire approprié. C'est ainsi qu'on ne « lance » pas une réaction. Le terme « spectre plat » (lorsque la substance n'absorbe pas sur toute une gamme de longueurs d'onde) ne désigne pas la même chose que celui de « spectre continu ». Une « filtration » n'est pas un « filtrage » et un composé chimique peut être dissous ; il n'est pas dissolu.

De plus, il est inadmissible d'entendre des expressions qui ne relèvent même pas d'un français correct (on ne « touille » pas une solution et les particules ne se « scratchent » pas lors de collisions) ou qui sont de véritables agressions auditives (« vatêtre » pour « va être »).

Le jury apprécie l'utilisation d'**outils pédagogiques** comme la « flexcam ». Mais il est important de rappeler la nécessité d'une réflexion préalable. Projeter une expérience où il devient impossible de visualiser des changements de teintes qui sont la raison de l'expérience est dommageable. La projection ne doit pas conduire à des temps de réglage trop longs qui nuisent au déroulement de l'exposé. Le jury peut d'ailleurs se déplacer et le fait dès que le candidat le demande.

Les "illustrations" des leçons doivent marier judicieusement les expériences et les documents numérisés préférables à des figures mal dessinées et illisibles ou à des schémas bien faits mais qui demandent trop de temps au détriment du reste.

Illustration expérimentale

Le jury note sur ce point un effort indéniable, mais plus quantitatif que qualitatif, les illustrations expérimentales n'étant pas toujours comprises ou exploitées scientifiquement. Les titrages avec tracé de courbes ne doivent pas se limiter à la détermination de volume équivalent et à un calcul de concentration. Peu de candidats analysent au cours de la leçon les différentes parties de la courbe de dosage en terme d'équation chimique à considérer ou de variation de grandeurs physiques.

Il est aussi impératif de **s'interroger sur les étapes d'un protocole expérimental**. C'est ainsi que l'ajout d'un acide ou d'une base dans un milieu réactionnel à la fin d'une synthèse organique est à proscrire si le candidat ne comprend pas ce qui se passe lors de cette étape. Si tel est le cas, cette attitude est non seulement pénalisante pour la note, mais relève d'une question de sécurité, en raison de l'exothermicité de la réaction qui nécessite des précautions. De même, il est obligatoire que les composés qui sont manipulés soient correctement connus (formules chimiques, fonctions organiques principales).

Le jury ne reprochera pas à un candidat d'être scrupuleux en ce qui concerne le soin, la pédagogie ou la sécurité. Mais trop souvent le temps passé à décrire (voire répéter) des points trop élémentaires est excessif, ce qui nuit à l'efficacité et dilue le message scientifique. Par exemple s'il est recommandé d'expliquer l'écriture d'une demi-réaction redox, il est bon de ne le faire qu'une fois et non pas systématiquement.

L'aspect expérimental obligatoire permet souvent de **valider le contenu d'une leçon**. Trop souvent, le jury a l'impression d'assister à une séance de travaux pratiques parfois réalisée pour la première fois par des candidats qui ne savent pas quel va être le résultat de leurs manipulations. Ce fut en particulier plusieurs fois le cas pour les leçons 19 et 20 qui furent en plus construites comme des séries d'expériences n'ayant pas de lien entre elles. Le jury attend des candidats qu'ils possèdent une réelle maîtrise expérimentale. On ne peut pas imaginer un enseignant présentant à ses élèves des expériences inabouties ou non réussies. Après la préparation de 4 heures, le candidat doit donc être capable d'extraire pour sa présentation les parties expérimentales présentables devant le jury. Il est en effet inacceptable d'entendre en début de manipulation des commentaires comme « je ne sais pas si ça marche », qui prouvent, qu'en plus d'un vocabulaire relâché, le candidat n'a aucune idée sur le résultat escompté qu'il est censé commenter par la suite.

Lorsqu'une expérience ne donne pas des résultats satisfaisants aux yeux du candidat, très souvent, celui-ci se confond en excuses. Il serait préférable qu'il persévère en s'accrochant davantage au « peu » qu'il a obtenu. Par exemple, le mauvais rendement d'une synthèse ne doit pas empêcher le candidat de caractériser les quelques milligrammes de produit obtenu, un « bug » informatique ne dispense pas de la discussion critique des résultats sur un tableau de données écrit à la main à condition que celui-ci soit propre et ordonné.

Certains candidats montent plusieurs dosages volumétriques pendant la présentation. Le nombre en est souvent excessif. Il en résulte une exploitation superficielle et des temps de silence trop longs. Tout cela est pénalisant. De plus, le jury regrette de n'assister que trop rarement à des dosages volumétriques correctement effectués pendant la présentation : l'équivalence est souvent dépassée lorsque le candidat lit le volume, ce qui n'empêche nullement un long calcul d'incertitude ! Rappelons que la précision attendue avec les burettes dont disposent les candidats est généralement de 0,1 mL, jamais de 0,3 voire 1 mL.

Il est important de ne pas confondre vivacité et fébrilité. Par leur excitation, certains candidats arriveraient presque à étourdir le jury et parviennent à s'épuiser eux mêmes pendant la leçon, ce qui les conduit à dire ou faire des erreurs stupides et les amène à s'écrouler physiquement quand arrive le temps des questions.

Quelques aspects techniques qui doivent être rappelés.

Il y a beaucoup trop souvent des erreurs sur les formules de Lewis et VSEPR et de difficultés pour certains candidats à calculer des nombres d'oxydation à partir des formules de Lewis.

L'utilisation du banc Kofler pose toujours trop de problèmes. En plus de ne pas savoir correctement prendre la température de fusion des produits, trop de candidats oublient d'enlever le produit après la mesure et font décomposer le produit sur le banc. D'autres balaient le produit pour le faire tomber sur la paillasse.

La trompe à eau doit être ouverte à fond pour une filtration sur Büchner et, en l'absence de fiole de garde, le tuyau doit être débranché de la fiole à vide avant arrêt de la trompe à eau.

Les réfrigérants des montages à reflux doivent être alimentés en eau.

Il faut éviter de mettre des gants pour manipuler des produits d'usage courant sans danger (par exemple alimentaires) ou de dire à chaque fois "Je mets des gants, car ...".

Conclusion

Nous sommes à un moment où les problèmes scientifiques et en particulier énergétiques représentent de véritables défis. La chimie est une des voies qui doit permettre de les résoudre. Un futur enseignant de sciences physiques doit donc, notamment pour cette raison, maîtriser les notions de base de cette discipline.

Le jury a pu constater que c'est le cas pour certains candidats qui savent le montrer. Il a eu plaisir à les valoriser et les félicite chaleureusement. Il espère que ces commentaires aideront les autres et les futurs candidats à acquérir les mêmes qualités et savoirs.

15. Rapport relatif au montage de physique

Lors de cette épreuve, les candidats doivent présenter au jury un ensemble de dispositifs expérimentaux formant un tout convaincant et harmonieux et choisis de manière à illustrer le thème sélectionné parmi les des deux sujets qui leur sont proposés.

La préparation dure 4 heures et s'effectue avec l'assistance de l'équipe technique. La présentation dure 40 minutes. Il s'agit pour les candidats d'effectuer des mesures quantitatives, d'analyser la pertinence des résultats obtenus, c'est-à-dire de discuter si ceux-ci illustrent réellement et vérifient le sujet proposé.

A la fin de l'exposé, le jury interroge les candidats au sujet :

- de leurs choix concernant les manipulations présentées,
- des raisons de leurs choix du matériel utilisé et des protocoles de mesures,
- de leurs interprétations des expériences réalisées.

Il s'agit d'évaluer leur aptitude à réaliser des mesures correctes, à les interpréter et leur compréhension des phénomènes physiques analysés.

Comme chaque année, le jury a pu assister à la présentation d'excellents montages au cours desquels les expériences choisies avec pertinence et correctement menées ont conduit à l'obtention de résultats quantitatifs de grande qualité, soigneusement analysés et commentés.

Malheureusement, il y a encore trop de prestations faibles où les candidats ont montré que les compétences nécessaires à l'épreuve sont mal maîtrisées et même que la physique mise en œuvre est mal comprise. C'est à eux que ce rapport s'adresse d'abord.

En outre, afin de permettre aux futurs candidats de se préparer au mieux pour cette épreuve difficile, le présent document comporte des indications générales concernant les attentes du jury en matière de compétences expérimentales et des remarques plus spécifiques concernant des montages particuliers.

L'épreuve de montage

Elle nécessite une **approche expérimentale** et non théorique des phénomènes étudiés. Certaines leçons utilisent aussi l'expérimentation comme support pédagogique mais le montage constitue une épreuve différente. Il s'agit d'évaluer les compétences expérimentales des candidats et leur aptitude à réaliser et interpréter des mesures. Les lois faisant l'objet de vérifications expérimentales n'ont pas à être démontrées mais le protocole de mesure est souvent fortement lié aux hypothèses conditionnant leur validité. Par conséquent, une bonne connaissance du modèle théorique permet un choix pertinent des expériences et des protocoles de mesure.

Les candidats sont libres de choisir les expériences illustrant le sujet choisi. Il faut savoir qu'il n'existe pas d'expérience « incontournable ». D'autre part, **il n'est nullement nécessaire de réaliser une multitude d'expériences** pour obtenir une bonne note. C'est même dangereux et déconseillé. Des montages proposant des expériences peu nombreuses mais bien maîtrisées sont évidemment plus appréciés qu'une succession de manipulations présentées à la hâte et sans aucune mesure quantitative acceptable.

Par ailleurs, les candidats ont intérêt à adapter le niveau des expériences à leurs connaissances. Ils sauront exploiter les résultats obtenus correctement et éviter les erreurs de manipulation.

Des expériences qualitatives permettant de présenter les phénomènes physiques étudiés et de préciser des ordres de grandeur peuvent servir d'introduction. Il ne faut pas les multiplier car ce n'est pas ce qui est attendu.

Un montage ne se conçoit pas sans **mesures effectuées devant le jury avec évaluation de la précision**. La mesure doit avoir un sens : ce peut être la comparaison de la valeur obtenue avec une valeur tabulée, la vérification d'une loi, ...

Les mesures et manipulations effectuées pendant la préparation ne sont reconnues comme valables que si le candidat a soin d'en répéter au moins deux ou trois devant le jury et de montrer qu'elles sont compatibles avec les autres.

Il convient enfin de signaler deux points.

Le premier est que les **valeurs de référence prises dans les Handbooks** ou les ouvrages spécialisés sont de meilleure qualité que celles trouvées dans les livres généraux d'enseignement.

Le second est que **les données fournies par les constructeurs** comportent évidemment elles aussi des incertitudes et qu'elles sont valables dans des conditions en général assez strictes et qui sont le plus souvent précisées.

Remarques générales issues des observations du jury de la session 2008.

Présentation

Dans la mesure du possible, les montages doivent être disposés de telle sorte que le jury puisse se rendre compte du protocole expérimental et ne doivent pas être défaits pendant l'exposé. Les candidats ont donc intérêt à demander plusieurs exemplaires du même matériel plutôt que d'utiliser et d'en déplacer un seul. D'une façon générale, les collections sont suffisamment riches.

En outre, les candidats doivent utiliser une (petite) partie de la préparation à organiser leur tableau. Cela leur permet d'éviter de perdre du temps pendant l'exposé et d'effacer ce qu'ils ont écrit, conformément à ce que souhaite le jury.

Manipulations et mesures

Les manipulations doivent avoir un but clairement énoncé : lorsque le candidat prend l'initiative d'écrire une loi au tableau, les mesures réalisées doivent être en rapport avec cette celle-ci.

Les candidats doivent connaître le matériel qu'ils utilisent et pouvoir justifier le choix de tel appareil de mesure qui présente des limitations technologiques. Certaines « boîtes noires » munies de capteurs de mesure peuvent réaliser plusieurs fonctions, certains « kits de montage » peuvent sembler bien commodes d'utilisation. Mais cela ne dispense pas le candidat d'en connaître le dispositif interne. Et l'absence de l'estimation de l'incertitude de mesure ne peut pas être justifiée par celle de la notice du dispositif ou du composant.

Certains appareils sont munis de fonctions comme le *rise-time* ou la *FFT*. Les candidats doivent évidemment en connaître le cadre de validité. Comme pour toute mesure, l'utilisation de ces fonctions engendre des erreurs dont l'expérimentateur doit tenir compte.

L'aptitude des candidats à **évaluer l'incertitude des mesures** est un élément d'appréciation important pour le jury. Il leur appartient de faire preuve de discernement quant au temps qu'ils y consacrent. Il est parfois possible de se limiter à choisir un nombre de chiffres significatifs à condition de pouvoir le justifier. Mais il peut arriver que la précision des mesures ait une importance toute particulière. Il convient alors d'analyser de manière rigoureuse l'origine des différentes erreurs, aléatoires ou systématiques.

Il est fréquent que l'on ait à comparer des valeurs d'une même grandeur, l'une pouvant être directement issue de la mesure et l'autre trouvée dans un Handbook ou calculée à partir d'autres grandeurs. Il faut **analyser**

l'origine d'un éventuel désaccord et estimer pour cela les différentes incertitudes. Mais celles-ci ne peuvent en général pas expliquer un décalage relatif de 60 %.

Il convient de rappeler ici que **l'incertitude caractérise la largeur d'une distribution de probabilité**, donc un intervalle de confiance et non un « intervalle de certitude » dans lequel la valeur mesurée est obligatoirement comprise.

L'utilisation de l'outil informatique se généralise. C'est une bonne chose mais elle n'est pas obligatoire, une courbe tracée proprement au papier millimétré pouvant avoir autant de valeur qu'une courbe tracée sur un écran d'ordinateur. Les candidats doivent connaître les logiciels qu'ils utilisent. Ce n'est malheureusement pas toujours le cas et il ne faut pas rendre l'informatique responsable de la mauvaise qualité des résultats obtenus.

Enfin, lorsque des courbes ou des tableaux de valeurs sont réalisés pendant la préparation dans le but d'être réutilisés pendant l'exposé, il faut penser à enregistrer les fichiers.

L'utilisation de certains appareils pose des problèmes récurrents.

Certaines expériences, en nombre limité, nécessitent l'utilisation d'un laser He-Ne non polarisé. Elle n'est en général pas indispensable et peut conduire à des résultats bruités ou non reproductibles.

En ce qui concerne l'oscilloscope, les problèmes de mauvaise synchronisation restent trop fréquents. Les candidats doivent avoir le réflexe, chaque fois qu'une source de signaux périodiques est utilisée, de synchroniser en externe avec le signal TTL qui est très généralement fourni par l'appareil. Si l'on doit réaliser les mesures à l'oscilloscope, on doit travailler sur les calibres appropriés afin d'obtenir un affichage clair, si possible visible depuis la salle, et permettant la meilleure précision. En outre, lors des mesures de périodes ou de phases, il est préférable d'effectuer les pointés aux passages par zéro plutôt que sur les extrema dont la position est difficile à repérer.

Commentaires sur les différents montages

Les numéros indiqués sont ceux de la liste 2008.

1 Dynamique Newtonienne

Il ne faut évidemment pas se limiter à quelques vérifications de lois de conservation sur la table à coussin d'air. Un pendule pesant n'est pas forcément assimilable à un pendule simple.

2 Tension superficielle

Les balances d'arrachement sont délicates à utiliser, il est nécessaire de bien comprendre leur fonctionnement. Les ondes capillaires ne s'observent que pour un certain domaine de longueurs d'onde.

3 Dynamique des fluides

La classification des écoulements passe aussi par l'évaluation du nombre de Reynolds.

4 Thermométrie

Ce montage ne peut pas se résumer à une simple comparaison de capteurs. La notion d'échelle de température doit être dégagée. Le jury rappelle le statut particulier des thermomètres de référence (thermomètre à gaz et résistance de platine) et des points fixes.

5 Transition de phase

Ce montage doit faire l'objet de mesures. L'établissement des équilibres thermiques étant parfois long, il est nécessaire de bien gérer le temps et d'anticiper le démarrage des expériences.

La durée des régimes transitoires doit être prise en compte dans les interprétations.

6 Formation des images en optique

Il ne faut pas se limiter à une énumération des aberrations des lentilles. Les objets et leurs images peuvent aussi être étendus. Le jury apprécierait l'étude d'un instrument d'optique. C'est pourquoi, dans la liste 2009, le titre de ce montage est changé

7 Interférences lumineuses ; condition d'obtention

8 Diffraction des ondes lumineuses

Dans toute expérience d'optique, les figures sont de bien meilleure qualité quand les appareils sont convenablement alignés. Ce fut tout particulièrement le cas pour ces deux montages.

9 Spectrométrie optique

La spectrométrie par transformée de Fourier, souvent réalisée de façon semi-quantitative sur les raies du mercure ou du sodium, se prête à un enregistrement numérique, qui sans être indispensable, est bien plus démonstratif et permet des mesures sensiblement plus précises.

Si le cœur du sujet est la mesure de longueurs d'onde, les phénomènes qui affectent la résolution des spectromètres ne doivent pas être ignorés.

10 Milieux optiquement actifs : biréfringence et pouvoir rotatoire

Les notions d'axe optique et de lignes neutres sont trop mal connues.

11 Production et analyse de lumière polarisée

Sans attendre une étude exhaustive des différents types de polarisation, le jury ne saurait se satisfaire d'un exposé basé uniquement sur la polarisation rectiligne.

L'analyse d'une lumière elliptique, qu'il ne faut pas confondre avec une lumière partiellement polarisée, requiert aussi d'en déterminer les axes.

12 Emission et absorption dans le domaine optique

L'utilisation des récents spectromètres à fibre optique interfacés USB nécessite la connaissance de son mode de fonctionnement et doit s'accompagner d'une analyse critique des résultats, notamment en termes de résolution et de justesse.

13 Lasers

Il ne faut pas se limiter pas à la caractérisation du faisceau émis, mais aborder aussi la physique de ce qui se produit à l'intérieur du laser, ce qui est probablement plus facile avec les lasers à semi-conducteurs qu'avec les lasers hélium-néon.

14 Photorécepteurs

Il existe d'autres photorécepteurs que la photodiode. Un éclairage d'intensité variable peut s'obtenir en utilisant deux polariseurs conformément à la loi de Malus.

15 Production et mesure de champs magnétiques

Il est nécessaire de bien maîtriser le maniement de la sonde à effet Hall et pour cela connaître son principe de fonctionnement

16 Milieux magnétiques

L'effet Meissner ne se résume pas à une « expulsion de ligne de champ ».

Les grandeurs mesurées, telles que les champs rémanent et coercitif, doivent être comparées et/ou commentées.

17 Métaux

La mesure de la conductivité thermique d'un métal par sa réponse en température en régime variable a posé des problèmes à de nombreux candidats. Les études menées en régime permanent sont plus simples et ont donné de meilleurs résultats.

18 Matériaux semi-conducteurs

Il est essentiel de savoir différencier les régimes de conduction intrinsèque et extrinsèque.

19 Condensateurs ; effets capacitifs

Les "effets capacitifs" ne se limitent pas à l'exemple du filtre RC ou de la ligne coaxiale.

21 Conversion de puissance électrique – électrique

Le transformateur est souvent utilisé pour les montages 16, 20, 21, 40.

Les candidats ignorent généralement l'origine de la loi sur les courants pour le transformateur idéal ainsi que la notion de courant magnétisant. En outre, la visualisation à l'oscilloscope du cycle d'hystérésis est trop souvent assortie d'erreurs de calibration des axes (H, B), conduisant ainsi à des estimations de pertes par mesure d'aires dénuées de sens.

23 Capteurs et transducteurs

Le jury a assisté cette année à des études de haut-parleurs électrodynamiques dénuées de signification physique. En particulier les mesures du rendement sonore, des longueurs d'onde et du diagramme de rayonnement du HP sont très sensibles à l'environnement.

24 Mesure de tension et des courants

La notion de courte et de longue dérivation peut être utile dans des cas extrêmes (très grandes ou très petites résistances). Elle a perdu de sa pertinence avec les appareils de mesures numériques actuels, et ne doit pas être étudiée pour elle-même.

Dans la liste 2009, ce montage est remplacé par un autre.

25 Amplification de signaux

La limite de linéarité de l'amplificateur opérationnel n'a pas pour seule origine la saturation en tension.

26 Télécommunication : mise en forme, transport et détection de l'information

Une expérience qualitative de transmission par fibre optique n'a d'intérêt que si elle fait intervenir des dispositifs dont l'un au moins a été étudié par le candidat.

Dans la liste 2009, le titre de ce montage est modifié.

27 Acquisition, analyse et traitement des signaux

La partie « acquisition » est souvent omise.

30 Asservissement d'une grandeur physique ; applications

L'utilisation de boîtes noires dont le fonctionnement n'est pas maîtrisé dessert les candidats.

32 Ondes : propagation et conditions aux limites

La notion d'impédance caractéristique n'est pas spécifique au câble coaxial.

33 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.

34 Résonance

Le phénomène de résonance n'apparaît pas qu'en électricité. En outre, le circuit RLC est souvent mal connu. Le jury apprécierait de voir des résonances dans d'autres domaines de la physique, ainsi que des facteurs de qualité importants.

35 Oscillateurs auto entretenus

Les conditions d'oscillation auto-entretenues doivent être maîtrisées.

37 Filtrage

Dans la liste 2009, le titre change car le jury tient à voir du filtrage et non pas seulement l'étude de filtres. Par ailleurs, un filtre RC suivi d'un suiveur ne peut être considéré comme un filtre actif.

38 Régimes transitoires

Ce nouveau montage a été peu choisi cette année. Notons pourtant que les régimes transitoires interviennent dans de nombreux domaines de la physique et pas seulement en électricité !

39 Phénomènes de transport

40 Phénomènes dissipatifs

Pour ces deux montages, plusieurs candidats ont voulu présenter une étude dynamique du transport de la chaleur. Cette expérience est sophistiquée et assez délicate. Pour certains candidats, l'étude statique, bien plus simple à réaliser, doit être préférée.

LEÇONS DE PHYSIQUE 2009

Les leçons sont à traiter au niveau des classes préparatoires scientifiques ou au niveau de la licence de physique.

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. Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides : applications.
12. Modèle du gaz parfait.
13. Fonctions d'état caractéristiques d'un système à l'équilibre thermodynamique. Identités thermodynamiques. Applications.
14. Evolution et condition d'équilibre d'un système thermodynamique fermé. Potentiels thermodynamiques. Exemples.
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.
20. Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir. Application aux transferts thermiques radiatifs.
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. Exemples et applications.
26. Exemples de phénomènes de propagation unidimensionnels. Ondes progressives, ondes stationnaires. Aspects énergétiques.
27. Ondes acoustiques 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 matière de la molécule au solide. Aspects énergétiques.
49. Chaîne unidimensionnelle 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 2009

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

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

16-c MONTAGES 2009

1. Dynamique newtonienne.
2. Tension superficielle.
3. Dynamique des fluides.
4. Thermométrie.
5. Transitions de phase.
6. Instruments d'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. Mesures électriques.
25. Amplification de signaux.
26. 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. Systèmes bouclés (oscillateurs exclus).
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 de signaux.
38. Régimes transitoires.
39. Phénomènes de transport.
40. Phénomènes dissipatifs.

17 MONTAGES 2010

1. Quantité de mouvement, moment cinétique et énergie en mécanique classique.
2. Tension superficielle.
3. Dynamique des fluides.
4. Thermométrie.
5. Transitions de phase.
6. Instruments d'optique.
7. Interférences lumineuses ; conditions d'obtention.
8. Diffraction des ondes lumineuses.
9. Spectrométrie optique.
10. Milieux optiquement actifs : biréfringence, 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 et effets capacitifs. Applications.
20. Induction, auto-induction.
21. Conversion de puissance électrique-électrique.
22. Conversion de puissance électro-mécanique.
23. Capteurs et transducteurs.
24. Mesures électriques.
25. Amplification de signaux.
26. 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. Systèmes bouclés (oscillateurs exclus).
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 de signaux.
38. Régimes transitoires.
39. Phénomènes de transport.
40. Phénomènes dissipatifs.

Projet de liste de montages pour l'agrégation 2010

1. Quantité de mouvement, moment cinétique et énergie en mécanique classique.
2. Tension superficielle.
3. Dynamique des fluides.
4. Thermométrie.
5. Transitions de phase.
6. Instruments d'optique.
7. Interférences lumineuses ; conditions d'obtention.
8. Diffraction des ondes lumineuses.
9. Spectrométrie optique.
10. Milieux optiquement actifs : biréfringence, 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 et effets capacitifs. Applications.
20. Induction, auto-induction.
21. Conversion de puissance électrique-électrique.
22. Conversion de puissance électro-mécanique.
23. Capteurs et transducteurs.
24. Mesures électriques.
25. Amplification de signaux.
26. 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. Systèmes bouclés (oscillateurs exclus).
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 de signaux.
38. Régimes transitoires.
39. Phénomènes de transport.
40. Phénomènes dissipatifs.