

SOMMAIRE

1. Composition du jury
2. Avant-propos du président
3. Informations statistiques et réglementation
4. Distributions des notes aux épreuves écrites et orales
 - Épreuves écrites : distribution des notes de l'ensemble des candidats
 - Épreuves écrites : distribution des notes des candidats admissibles
 - Épreuves orales : distribution des notes des candidats admissibles
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 2006
13. Rapport sur la leçon de physique
14. Rapport sur la leçon de chimie
15. Rapport sur le montage de physique
16. Enoncé des sujets des épreuves orales de la session 2007

1. COMPOSITION DU JURY

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

2. AVANT-PROPOS

La session 2006 de l'agrégation externe de sciences physiques option physique est marquée par une diminution importante du nombre de postes ouverts au concours (135 à comparer aux 180 postes de la session 2005). Le bon niveau de l'ensemble des candidats a permis au jury de pourvoir tous les postes, dans d'excellentes conditions de recrutement : la barre d'admission connaît par rapport à l'an dernier une très forte progression, puisqu'elle a été portée cette année à 9,95/20, alors qu'elle était de 8,3/20 en 2005.

Comme par le passé, les candidats admissibles sont en majorité jeunes (entre 23 et 25 ans), ce qui traduit bien le dynamisme de notre discipline. Par ailleurs, l'attractivité du concours connaît depuis 3 ans une forte croissance puisqu'en trois sessions, le nombre d'inscrits a augmenté de 54%, et celui des candidats ayant terminé les trois épreuves de 24%.

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

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

Concernant plus particulièrement les leçons (de physique et de chimie), le jury insiste sur la nécessité de donner du **sens** à l'exposé, c'est-à-dire de situer la leçon dans son contexte et d'en préciser l'intérêt et les objectifs dès l'introduction, condition nécessaire pour déterminer le fil conducteur qui servira de guide à toute l'argumentation. Même si l'on ne peut pas attendre d'un candidat le professionnalisme d'un enseignant chevronné, la pédagogie doit être présente lors des présentations de leçons ; comment pourrait-il en être autrement dans le cadre d'un concours de recrutement de futurs enseignants ? De même, chaque fois que cela est possible, les exposés doivent être illustrés par des expériences bien choisies et bien réussies. Celles-ci font partie intégrante de l'argumentation scientifique et sont toujours très appréciées du jury.

Conformément aux informations communiquées dans le rapport de la session 2005, **les leçons de physique proposées désormais aux candidats** ne font plus référence individuellement à un programme précis de classe ou à niveau spécifique ; bien entendu, cette disposition a été appliquée dès la présente session. Prises dans leur ensemble, ces 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 aux niveaux des deux premières années de licence (niveaux L1 et L2). Cette mesure est la conséquence de l'organisation des études universitaires selon le schéma LMD ; elle répond par ailleurs à la volonté du jury de laisser davantage de liberté au candidat, qui n'est donc plus astreint à suivre le programme d'une classe donnée pour construire le

contenu de sa leçon de physique. Cette liberté pédagogique a été mise à profit par une partie des candidats qui ont su ainsi présenter des leçons originales et particulièrement intéressantes, conséquence d'une préparation au concours ayant intégré cette nouvelle donnée.

Comme en 2004 et en 2005, les candidats ont eu à leur disposition une banque, comportant plus de 2600 documents numérisés et une vingtaine de mini séquences vidéo, banque à l'intérieur de laquelle ils ont pu sélectionner tout ce qui leur permettait d'illustrer au mieux leurs leçons. A l'évidence, l'utilisation du vidéo projecteur (présent dans toutes les salles de présentation d'épreuves, y compris celles de montages), est aujourd'hui banalisée et les candidats utilisent cet appareil pour projeter tant des documents numérisés extraits de la banque de données, que des documents qu'ils ont préparés eux-mêmes (graphe ou tableau de mesures en montage).

Réussir aux concours nécessite une préparation active, durant toute l'année scolaire.

Le jury invite les candidats à travailler à la fois en vue des épreuves écrites et des épreuves orales ; la diffusion en début d'année scolaire des listes de montages et de leçons devrait être de nature à inciter les candidats à travailler dans ce sens. En effet, il est illusoire de penser que l'on peut réussir à l'oral en s'y préparant à la « veille » des épreuves ; faut-il rappeler que les épreuves orales jouent un rôle particulièrement important dans la phase d'admission : le coefficient qui leur est réservé (10) est supérieur à celui des épreuves écrites (6). Soulignons par ailleurs que l'année de préparation au concours est l'une des rares occasions permettant au cours de la formation universitaire de faire la synthèse des connaissances acquises année après année dans les différents domaines de la physique et de la chimie. Elle permet également d'acquérir une véritable autonomie tant en matière de recherche bibliographique que de pratique expérimentale, autonomie nécessaire au futur professeur dans la construction de son enseignement aux niveaux pré- et post-baccalauréat.

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

Le Président du jury

3. INFORMATIONS STATISTIQUES

135 places ont été mises au concours.

Le tableau ci-dessous donne des informations générales relatives à la sélection progressive des candidats au cours des épreuves, les valeurs de 2003, 2004 et 2005 étant rappelées à titre de comparaison.

	2006	2005	2004	2003
Inscrits	1785	1666	1378	1162
Présents aux trois épreuves	853	875	732	690
Admissibles	290	326	323	324
Barre d'admissibilité	52/120	45,2/120	43/120	42/120
Moyenne générale du candidat classé premier	19,02/20	18,88/20	18,54/20	17,43/20
Moyenne générale du dernier candidat reçu	9,95/20	8,30/20	8,69/20	7,82/20
ADMIS	135	180	162	175

EPREUVES ECRITES

Les épreuves écrites se sont déroulées les 10, 11 et 12 avril 2006.

Moyenne des candidats aux épreuves écrites :

Nature de l'épreuve	Moyenne des candidats ayant composé	Moyenne des candidats admissibles
Composition de physique	7,42	12,74
Composition de chimie	8,42	11,66
Problème de physique	6,51	11,06

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

EPREUVES ORALES

Les épreuves orales se sont déroulées du 22 juin au 19 juillet 2006.

Moyenne des candidats aux épreuves orales :

Nature de l'épreuve	Moyenne des candidats présents aux épreuves orales	Ecart-type
Leçon de physique	9,11/20	5,09
Leçon de chimie	8,98/20	4,17
Montage de physique	8,27/20	4,36

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

Répartition par date de naissance des candidats

Année de naissance	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
1984	13	7
1983	59	43
1982	64	39
1981	25	12
1980	11	3
1979	19	7
1978	15	4
1977	15	4
1976	12	4
1975	11	1
1974	7	1
1973	8	1
1972	5	2
1968 à 1971	17	4
antérieure à 196_	9	3

Répartition par titres et diplômes

Titre ou diplôme	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
Doctorat	27	12
DEA	22	6
Ingénieur	36	10
Maîtrise ou équivalent	178	98
CAPES, PLP	19	3
Autres	8	6

Répartition par profession

Profession	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
Etudiant	128	64
Elèves d'une ENS	53	48
Elève IUFM 1 ^{ère} année	20	1
Certifiés et PLP stagiaires	11	7
Enseignant MEN	53	12
Autres ministères	2	0
Hors fonct publique/sans emploi	22	3
Autres	1	0

Répartition par sexe

	Nombre d'admissibles	Nombre d'admis
Homme	221	102
Femme	69	33

REGLEMENTATION

Programme :

Le programme des épreuves écrites et orales de la session 2006 est décrit dans le BO spécial n°5 du 19 mai 2005.

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

Epreuves :

Les épreuves écrites comportent :

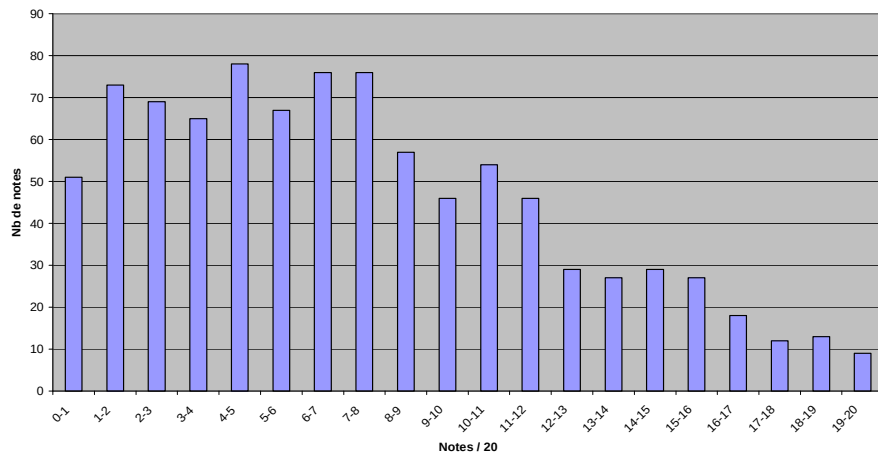
- Une composition de physique de durée 5 h (coefficient 2)
- Une composition de chimie de durée 5 h (coefficient 2)
- Un problème de physique de durée 6 h (coefficient 2)

Les épreuves orales comportent :

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

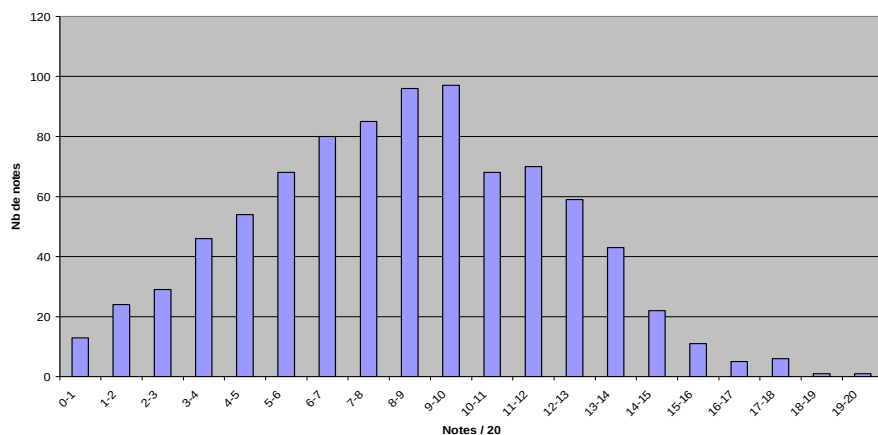
4-1 Distribution des notes pour l'ensemble des candidats aux épreuves écrites

Composition de physique



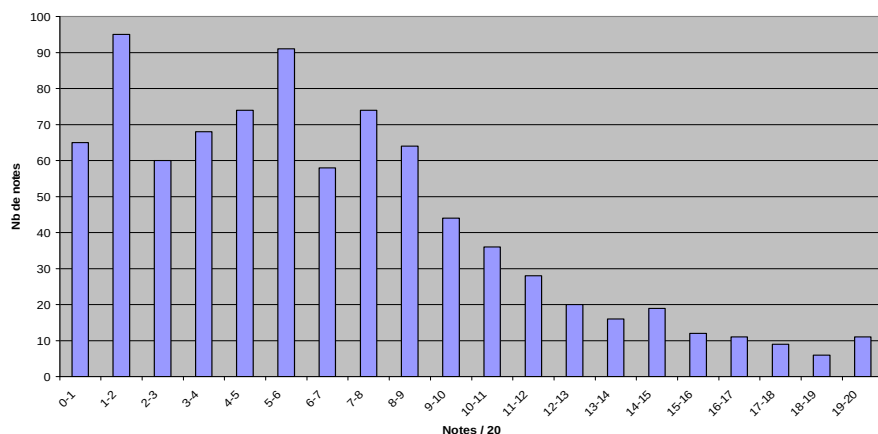
Moyenne :	7,42
Ecart-type :	4,72

Composition de chimie



Moyenne :	8,42
Ecart-type :	3,59

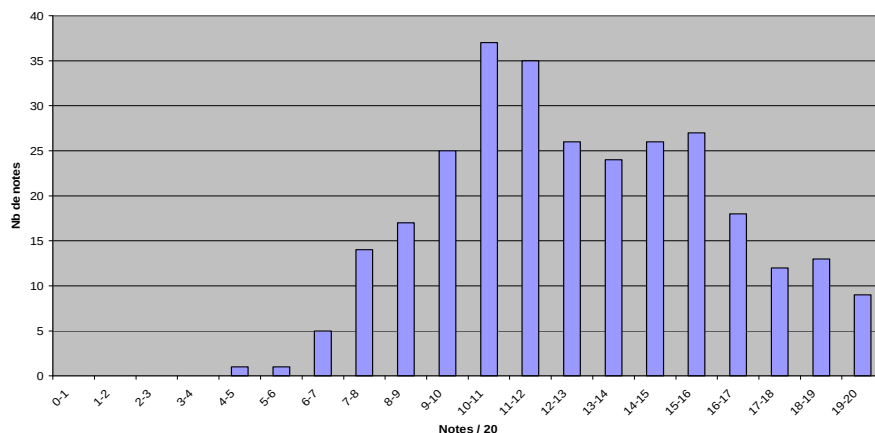
Problème de physique



Moyenne :	6,51
Ecart-type :	4,48

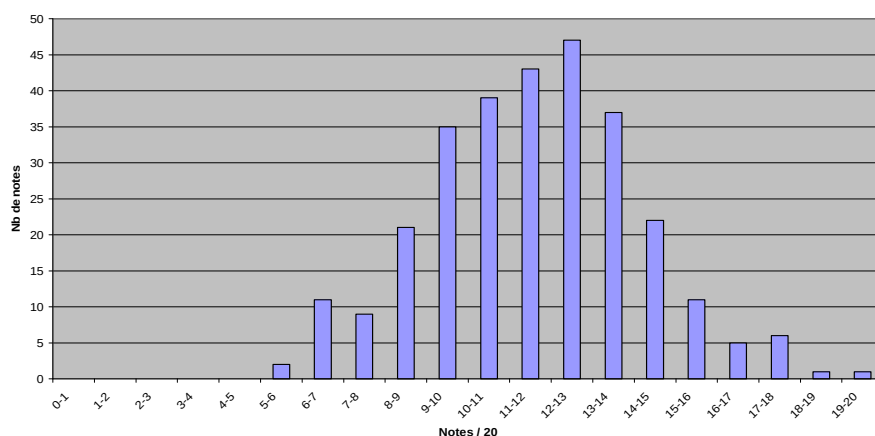
4-2 Distribution des notes pour les candidats admissibles aux épreuves écrites

Composition de physique



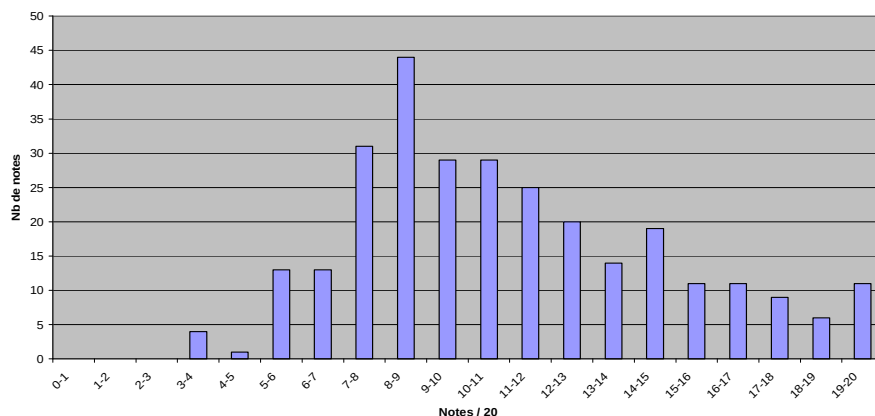
Moyenne :	12,74
Ecart-type :	3,30

Composition de chimie



Moyenne :	11,66
Ecart-type :	2,54

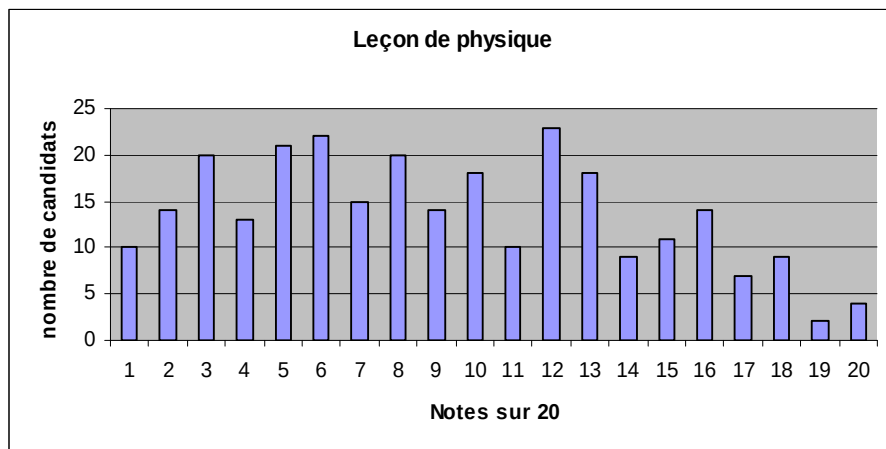
Problème de physique



Moyenne :	11,06
Ecart-type :	3,79

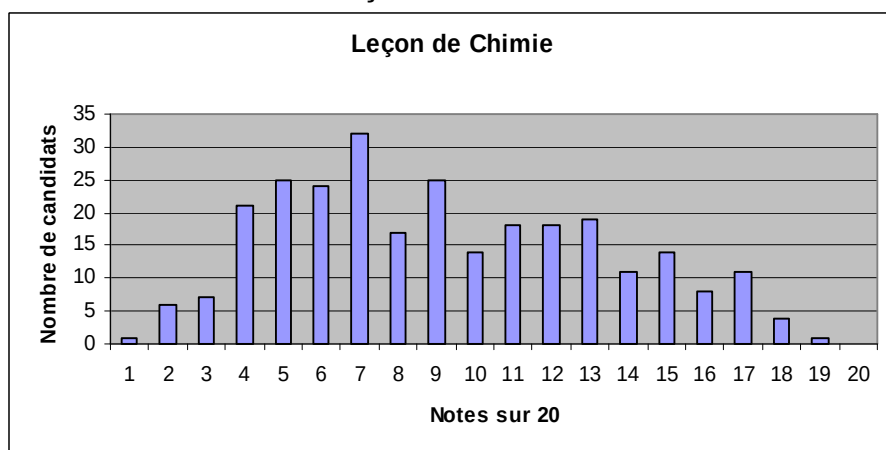
4-3 Distribution des notes aux épreuves orales

Leçon de physique



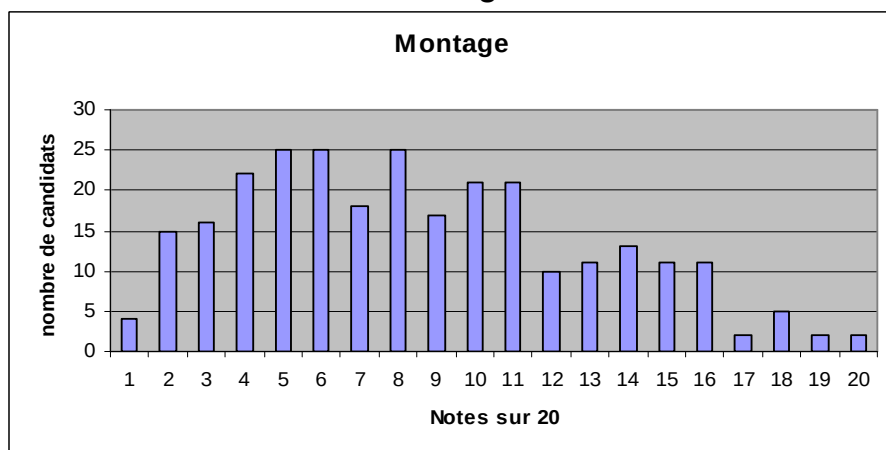
Moyenne :	9,11
Ecart-type :	5,09

Leçon de chimie



Moyenne :	8,98
Ecart-type :	4,17

Montage



Moyenne :	8,27
Ecart-type :	4,36

SESSION DE 2006**concours externe
de recrutement de professeurs agrégés****section : sciences physiques****option : physique**

composition de physique

Durée : 5 heures

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

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

Détection d'une erreur éventuelle par le candidat

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

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

Tournez la page S.V.P.

THERMODYNAMIQUE

Ce sujet aborde différents domaines de la thermodynamique à l'équilibre, des fondements à certaines applications : fluides, fil élastique, milieux magnétiques. Plusieurs questions demandent des évaluations littérales ou numériques nécessitant l'utilisation d'ordres de grandeur non donnés, qu'il conviendra de justifier. Les résultats obtenus seront brièvement commentés.

Il est demandé d'apporter aux questions faisant référence à des connaissances de cours des réponses précises et concises.

Données numériques :

Constante de Boltzmann :	$k = 1,38.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
Zéro Celsius :	$T_0 = 273,15 \text{ K}$
Nombre d'Avogadro :	$N_A = 6,02.10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Constante de Planck :	$h = 6,62.10^{-34} \text{ J.s}$
Constante de Planck réduite :	$\hbar = h / 2\pi = 1,05.10^{-34} \text{ J.s}$
Permittivité du vide :	$\epsilon_0 = 8,85.10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
Perméabilité du vide :	$\mu_0 = 4\pi.10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$
Charge élémentaire :	$e = 1,60.10^{-19} \text{ C}$
Masse de l'électron :	$m_e = 9,11.10^{-31} \text{ kg}$
Masse du proton :	$m_p = 1,67.10^{-27} \text{ kg}$
Masse du neutron :	$m_n = 1,67.10^{-27} \text{ kg}$

Formulaire :

$$I(n) = \int_0^{+\infty} x^n e^{-ax^2} dx \quad (a > 0) : \quad I(2) = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{a^3}} \quad \text{et} \quad I(4) = \frac{3}{8} \sqrt{\frac{\pi}{a^5}}$$

$$\text{Formule de Stirling pour } N \gg 1 : \quad \ln N! \sim N \ln N$$

I - Agitation thermique d'un gaz

- 1) Qu'est-ce que l'agitation thermique ?
- 2) Comment le kelvin, unité de température thermodynamique, est-il défini à partir d'un point fixe de l'eau ?
- 3) Définir la vitesse quadratique moyenne v^* des particules d'un gaz. Rappeler comment elle est reliée à la température dans un gaz parfait.
- 4) Expliquer succinctement le mouvement brownien.
- 5) Évaluer pour l'air à température et pression ambiante : la vitesse quadratique moyenne v^* , le nombre n de particules par unité de volume et la distance moyenne d entre les molécules.
- 6) Établir, à l'aide d'un modèle simple, une expression du libre parcours moyen l en fonction du nombre n de particules par unité de volume et de leur section efficace de collision σ .
- 7) Indiquer pour l'air à température et pression ambiante une valeur approximative de la section efficace de collision des molécules. En déduire une évaluation du libre parcours moyen l et de la durée moyenne entre deux chocs τ .
- 8) On envisage maintenant le gaz d'électrons libres d'un métal. Aux températures usuelles, la vitesse quadratique moyenne v^* reste constante indépendamment de T . Cette constatation va à l'encontre du résultat établi précédemment. Expliquer cette différence de comportement en quelques lignes.
- 9) Pour ce même gaz d'électrons libres, le libre parcours moyen diminue lorsque la température augmente. Expliquer.

II - Énergie interne et capacités thermiques

- 1) Qu'est-ce que l'énergie interne U d'un corps ?
- 2) Définir sa capacité thermique C_V à volume constant.
- 3) Qu'est-ce qu'un thermostat ? Que peut-on dire de sa capacité thermique ?
- 4) Proposer une méthode simple permettant de mesurer expérimentalement la capacité thermique d'un corps solide ou liquide.
- 5) Soit un système de particules dans l'approximation classique en équilibre à la température T . Donner l'expression générale normalisée de la probabilité pour le système d'être dans un état d'énergie E .

- 6) À quelle condition la probabilité pour qu'une particule d'un tel système soit dans un état d'énergie ε est-elle proportionnelle au facteur de Boltzmann : $\exp(-\varepsilon / k T)$?
- 7) Donner l'expression de l'énergie cinétique moyenne $\langle \varepsilon_c \rangle$ d'une particule d'un gaz parfait monoatomique à l'aide d'intégrales.
- 8) Calculer cette énergie cinétique à l'aide du formulaire et retrouver l'expression donnée au I-3.
- 9) Plus généralement, citer le théorème d'équipartition de l'énergie en précisant les hypothèses nécessaires.
- 10) Exprimer l'énergie interne U d'un gaz parfait monoatomique comprenant N particules. En déduire sa capacité thermique molaire à volume constant c_v .
- 11) Contrairement au gaz parfait, pourquoi l'énergie interne d'un gaz réel dépend-elle du volume ?
- 12) Soit une molécule diatomique constituée de deux atomes identiques. Donner l'allure de l'énergie potentielle d'interaction inter-atomique en fonction de la distance d séparant les deux atomes.



- 13) On note m la masse d'un atome. Puisque la molécule est susceptible de vibrer, la distance inter-atomique $d(t)$ varie dans le temps autour de sa valeur moyenne d_0 . Donner une expression de l'énergie cinétique totale de la molécule en fonction de sa vitesse de translation, de sa vitesse de rotation et de d .
- 14) Justifier la modélisation de l'interaction inter-atomique par un rappel élastique de raideur K .
- 15) Donner une expression de l'énergie potentielle ε_p de la molécule en fonction de m et f_0 la fréquence de vibration de la molécule.
- 16) Si tous les degrés de liberté de la molécule diatomique étaient excités, quelles seraient l'énergie interne et la capacité thermique molaire c_v d'un gaz parfait constitué de telles molécules ?
- 17) Établir la relation entre la capacité thermique molaire à pression constante c_p et c_v pour un gaz parfait.
- 18) À température ambiante, la molécule tourne sur elle-même mais ne vibre pas. Justifier que l'air est décrit par le coefficient $\gamma = c_p / c_v = 1,4$.
- 19) Une approche quantique de la vibration et de la rotation de la molécule fait intervenir des températures critiques, dites de gel, en dessous desquelles ces mouvements sont « gelés ». Expliquer en quelques lignes ce phénomène.

20) On donne les températures de gel T_v de vibration et T_r de rotation, justifier ces expressions.

$$T_v = \frac{h f_0}{k} \quad \text{et} \quad T_r = \frac{h^2}{k m d_0^2}.$$

21) Dans quel domaine de fréquence les molécules vibrent-elles ? Évaluer un ordre de grandeur des températures de gel T_v et T_r . Est-ce en accord avec l'observation à température ambiante ?

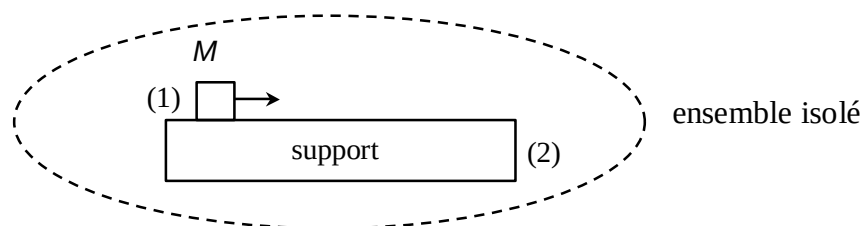
22) Dans le modèle d'Einstein, l'agitation thermique dans un solide cristallin est décrite par la vibration dans les trois directions de l'espace des atomes autour de leur position d'équilibre. Justifier que l'énergie interne peut alors se mettre sous la forme suivante pour des températures suffisamment élevées : $U = 3NkT$ où N est le nombre d'atomes.

III - Les principes de la thermodynamique

1) Quel contexte historique a permis l'émergence de la thermodynamique ?

Le premier principe

- 2) Énoncer le premier principe pour un système fermé quelconque.
- 3) Énoncer le théorème de l'énergie cinétique entre deux instants pour un système fermé quelconque.
- 4) Considérons un système ne subissant que des travaux mécaniques. Y a-t-il une différence entre les travaux pris en compte dans l'énoncé du premier principe et les travaux pris en compte dans l'énoncé du théorème de l'énergie cinétique ? Si oui, quelle différence ?
- 5) À quelle(s) condition(s) minimale(s) l'énergie interne est-elle conservée ?
- 6) Un solide (1) de masse M glisse sur un support horizontal (2) immobile. Le coefficient de frottement solide, statique et dynamique, entre ces deux corps est noté μ . La masse possède initialement la vitesse v_0 et glisse sur une distance L avant de s'arrêter. Appliquer le premier principe et le théorème de l'énergie cinétique au solide (1), au support (2) et à l'ensemble isolé. Commenter les transferts et conversions d'énergie.



- 7) Justifier, par un calcul d'ordre de grandeur, qu'en se frottant les mains on peut ressentir un échauffement notable. On envisagera une force de frottement $F \approx 10 \text{ N}$ et on prendra des valeurs plausibles pour la vitesse des mains et l'épaisseur de la couche à chauffer. La capacité thermique massique de l'eau est : $c = 4,18 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$.

Le second principe

- 8) Énoncer le second principe de la thermodynamique pour un système isolé.
- 9) Établir l'expression de l'entropie $S(T, V)$ d'un gaz parfait de coefficient γ constant en fonction de la température T et du volume V .
- 10) À quel physicien est associée l'expression statistique de l'entropie : $S = k \ln \Omega$?
- 11) Pourquoi cette expression n'est-elle valable que pour un système isolé ? Que représente Ω ?
- 12) Quelle est l'interprétation statistique du second principe ?
- 13) Une détente de Joule Gay-Lussac dans le vide double le volume d'un gaz parfait. Décrire cette détente et calculer la variation d'entropie correspondante à l'aide de l'expression $S(T, V)$.
- 14) Retrouver le résultat précédent à partir de l'expression statistique de l'entropie.
- 15) Si on verse du sirop dans de l'eau, il se répartit dans tout le volume d'eau, ceci semble en accord avec le second principe : la méconnaissance du système augmente. En revanche, si de l'huile est mise dans de l'eau, elle remonte à la surface, pour former deux phases bien distinctes. Cette observation semble en désaccord avec « l'accroissement du désordre » postulé par le second principe. Commenter.

Le troisième principe

- 16) Énoncer le troisième principe de la thermodynamique (principe de Nernst). En donner une interprétation statistique.

IV - Identité thermodynamique et détermination des fonctions d'état

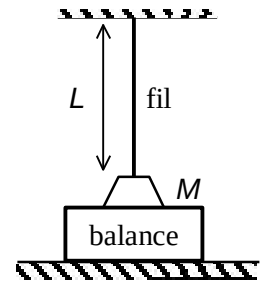
- 1) On considère un corps pur sous une phase. Des mesures expérimentales permettent de remonter aux expressions des fonctions d'état du corps. La connaissance de l'équation d'état ou des coefficients thermoélastiques permet-elle d'y parvenir ? Justifier brièvement.

Étude macroscopique de l'élasticité d'un fil

- 2) Soit un fil caractérisé par sa température T , sa tension f et sa longueur L . Quelle est l'expression du travail élémentaire réversible qu'il reçoit lors d'une variation de sa longueur de dL ? Donner l'expression de la différentielle de son entropie $S(T, L)$ et de son énergie interne $U(T, L)$. On notera C_L sa capacité thermique à L constant et $\kappa = T \left. \frac{\partial S}{\partial L} \right|_T$.

- 3) Établir les relations de Clapeyron permettant le calcul de κ et des variations de C_L à température constante à partir de la connaissance de l'équation d'état liant f , T et L .
- 4) L'expérience met en évidence une loi de Hooke dans le domaine élastique : $f = K(T)(L - L_0)$ où la raideur K ne dépend que de T . On considère également que C_L est une constante. Montrer alors que K est une fonction affine de T : $K = A T + B$.

- 5) On réalise l'expérience suivante schématisée ci-contre : un fil, dont une extrémité est fixe, est tendu par une masse M . La masse repose sur une balance électronique, tout en conservant le fil tendu. Le fil est alors chauffé à l'aide d'un briquet et on observe l'évolution de la valeur de la masse m indiquée par la balance. Quelle est la relation entre f , M et m ?

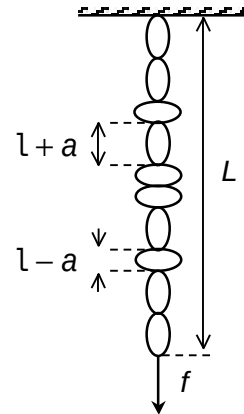


- 6) Pour un fil métallique m croît lors du chauffage, alors que pour un fil de caoutchouc m décroît. En déduire les signes de κ et A pour les deux fils étudiés.
- 7) Définir le coefficient α de dilatation à tension constante, et déterminer son signe dans les deux cas précédents.
- 8) Quel signe du coefficient de dilatation est le plus répandu dans la nature ? Pourquoi ?
- 9) Citer un autre exemple de corps ayant un coefficient de dilatation négatif. Comment l'expliquer ?
- 10) Établir l'expression de l'entropie du fil $S(T, L)$ et de son énergie interne $U(T, L)$.
- 11) Vérifier que l'énergie potentielle d'un fil élastique par rapport à son état de repos correspond à la variation isotherme de son énergie libre F .
- 12) Établir plus généralement la relation entre la variation isotherme ΔF d'énergie libre d'un système et le travail W échangé au cours d'une transformation quelconque pouvant être irréversible. Commenter.

Modélisation microscopique de l'élasticité d'un fil de caoutchouc

Le caoutchouc est constitué, à l'échelle microscopique, de longues chaînes de polymères. Une chaîne est formée par une séquence de maillons identiques, liés les uns aux autres, pouvant être dans différents états quantiques. Une tension f peut être appliquée à son extrémité.

Le modèle d'étude comprend un très grand nombre N d'éléments, dont chacun peut apparaître dans deux états : un état court de longueur $l - a$ et un état long de longueur $l + a$. On suppose pour simplifier que ces deux états ont la même énergie.



- 13) Que peut-on dire de l'énergie de la chaîne dans un tel modèle ?
- 14) Pourquoi les 2^N microétats de la chaîne sont-ils équiprobables ?
- 15) Soit n le nombre de maillons dans l'état court. Exprimer la longueur totale L de la chaîne.
- 16) Justifier l'expression de l'entropie pour une longueur L donnée : $S = k \ln \frac{N!}{n!(N-n)!}$.
- 17) La chaîne est au repos : $f = 0$. Déterminer la longueur d'équilibre L_0 .
- 18) Quelles hypothèses nécessite l'utilisation de la formule de Stirling, donnée dans le formulaire, pour simplifier l'expression de S ? Quelle est la traduction physique de ces hypothèses pour le système étudié ? Donner une expression simplifiée de S en fonction de N , a , L et L_0 .
- 19) Montrer qu'une tension f appliquée à la chaîne est liée à la variation de S selon : $f = -T \frac{dS}{dL}$.
- 20) En déduire l'expression de l'équation d'état de la chaîne : $L = L_0 + Na \operatorname{th} \left(\frac{af}{kT} \right)$.
- 21) Pourquoi ne peut-on maximiser l'entropie pour déterminer L lorsque la chaîne est tendue ?
- 22) Pour des températures suffisamment élevées donner une expression simplifiée de L . Justifier que cette hypothèse avait déjà été utilisée.
- 23) Comparer la raideur obtenue avec ce modèle à celle établie à la question IV – 4. Que vaut A ? Comment expliquer que le modèle microscopique donne $B = 0$.
- 24) L'étude macroscopique du fil de caoutchouc donnait une entropie décroissante lors d'un allongement. Ce comportement est opposé à celui d'un gaz dont l'entropie croît lors d'une augmentation du volume. Comment le modèle statistique utilisé explique ce comportement ?

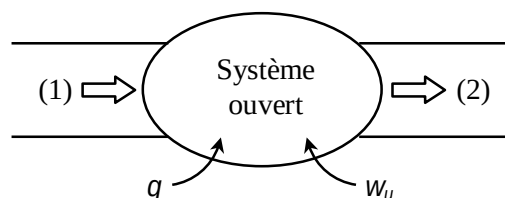
V - Les moteurs thermiques

- 1) Démontrer l'impossibilité d'un moteur cyclique monotherme.
- 2) Justifier le sens dans lequel est décrit le cycle d'un moteur dans les diagrammes (P, V) et (T, S) .
- 3) Soit un moteur de voiture dans lequel la pression haute est de l'ordre de quelques dizaines de bars, et le volume des cylindres de l'ordre de 1 L. Évaluer la puissance du moteur en kW.
- 4) Qu'est ce qu'un moteur ditherme de Carnot ? Dessiner le cycle correspondant dans un diagramme (T, S) .
- 5) Établir l'expression du rendement d'un moteur réversible de Carnot en fonction des températures T_1 et T_2 ($T_1 > T_2$) en précisant les signes des différentes grandeurs introduites.
- 6) Justifier que le moteur de Carnot est celui qui présente le meilleur rendement possible. Pourquoi n'est-il pas utilisé en pratique ?
- 7) Dans une centrale nucléaire délivrant une puissance électrique $P = 1$ GW, la température du cœur est $T_{\text{cœur}} = 330^\circ\text{C}$. Quel rendement maximal peut-on envisager ? En pratique, il est de l'ordre de 33%. Calculer la puissance thermique perdue.
- 8) Dédurre de la question précédente l'intérêt de la cogénération.

VI - Bilan énergétique sur un système ouvert

Application du premier principe à un système ouvert

- 1) Soit un système ouvert Σ dans lequel un fluide circule en régime stationnaire. En amont, il est à la pression P_1 et la masse volumique ρ_1 ; ses énergies interne, cinétique et potentielle massiques sont notées : u_1 , e_{c1} et e_{p1} . En aval, ces mêmes grandeurs sont notées P_2 , ρ_2 , u_2 , e_{c2} et e_{p2} . Au sein du système, le fluide reçoit l'énergie thermique q et le travail utile w_u par unité de masse. Exprimer le travail des forces de pression exercé, par unité de masse, en entrée et en sortie sur le système.

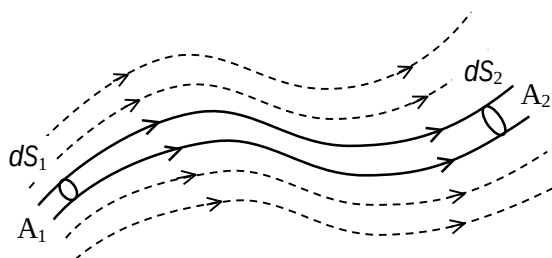


- 2) Appliquer le premier principe à un système que l'on définira soigneusement pour établir la relation exprimant la variation d'énergie massique du fluide entre l'entrée et la sortie.

Premier principe et théorème de Bernoulli

- 3) Soit un fluide parfait incompressible en écoulement stationnaire soumis à des forces dérivant d'une énergie potentielle massique e_p . Donner l'équation vérifiée par le champ des vitesses (équation d'Euler).
- 4) Démontrer le théorème de Bernoulli le long d'une ligne de courant pour un tel fluide.
- 5) Soit un tube de courant de section élémentaire, entre deux points A_1 et A_2 , dans un fluide parfait incompressible en écoulement stationnaire. Ce système peut être considéré comme un système ouvert. Que devient la relation établie au 2 ? Que dire de l'énergie interne massique ? Retrouve-t-on les conditions établies au III-5 ?

écoulement stationnaire
d'un fluide

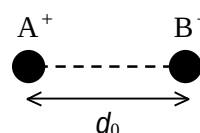


Propulsion chimique d'une fusée

On s'intéresse à présent à la propulsion d'une fusée. Dans la chambre de combustion, la combustion du propergol amène le gaz à haute température et pression. Il est ensuite détendu dans une tuyère afin d'assurer la propulsion.

- 6) Une liaison chimique entre deux atomes est modélisée par l'interaction de deux ions dont les charges sont élémentaires et opposées, distantes de d_0 . Déterminer un ordre de grandeur de l'énergie d'une liaison chimique en kilojoules par mole. Commenter la pertinence de ce modèle.

modèle d'une liaison chimique A-B



- 7) En admettant que la réaction chimique dégage une énergie $E \sim 100 \text{ kJ.mol}^{-1}$, évaluer l'ordre de grandeur de la température atteinte dans la chambre de combustion.
- 8) Évaluer la vitesse d'éjection des gaz v_{gaz} en sortie de la tuyère.
- 9) Les gaz sont éjectés de la fusée à la vitesse v_{gaz} par rapport à elle, avec un débit massique D_m . Effectuer soigneusement un bilan de quantité de mouvement à la fusée afin d'établir l'expression de la force propulsive F .
- 10) En déduire l'expression du débit massique minimal en fonction de la masse M initiale de la fusée.
- 11) On admet que les propergols constituent l'essentiel de la masse de la fusée. Montrer que le temps de poussée des propulseurs chimiques est toujours du même ordre. Donner son évaluation littérale et numérique. Ce résultat vous semble-t-il pertinent ?

VII - Obtention de basses températures par liquéfaction d'un gaz

- 1) Établir l'expression de l'efficacité maximale d'une machine frigorifique cyclique ditherme en fonction des températures T_1 et T_2 ($T_1 > T_2$). Qu'en déduit-on en ce qui concerne l'obtention de basses températures ?

Le gaz de Van der Waals

- 2) Soit un gaz réel obéissant à l'équation d'état de Van der Waals pour une mole dans le domaine de température considéré :

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT.$$

Interpréter les deux termes correctifs par rapport à l'équation d'état des gaz parfaits.

- 3) Évaluer numériquement b pour un gaz comme l'air.
- 4) Donner en la justifiant l'équation d'état pour n moles de gaz.
- 5) On établit à l'aide de ce modèle l'expression de l'énergie interne pour n moles :

$$U(T, V) = n c_v T - \frac{a n^2}{V}.$$

Cette énergie est-elle extensive ? Interpréter le signe du terme correctif par rapport au gaz parfait.

- 6) Exprimer l'enthalpie $H(T, P)$ en ne conservant que les termes correctifs a et b au premier ordre.

Refroidissement par détente de Joule-Thomson

- 7) Le refroidissement des gaz réels peut être obtenu par détente isenthalpique de Joule-Thomson. Décrire les conditions de cette détente et justifier qu'elle est isenthalpique.
- 8) Démontrer la relation suivante : $\left.\frac{\partial T}{\partial P}\right|_H = -\frac{1}{C_p} \left.\frac{\partial H}{\partial P}\right|_T$.
- 9) Que dire d'une telle détente appliquée à un gaz parfait ?
- 10) On utilise maintenant le modèle de gaz réel de Van der Waals. Montrer que le refroidissement par détente isenthalpique n'est possible qu'en dessous d'une certaine température T_i .
- 11) Pour le diazote, la température d'inversion est $T_i = 700$ K. Évaluer la chute de température pour une variation de pression d'une dizaine de bars avec $c_p = 29 \text{ J.K}^{-1}\text{mol}^{-1}$ et $b = 4.10^{-5} \text{ m}^3.\text{mol}^{-1}$. Commenter.
- 12) Une machine industrielle produit une masse $m = 20$ kg de diazote liquide par heure. Exprimer l'énergie à prélever à l'azote pour liquéfier cette masse m à pression atmosphérique, à partir de la

température ambiante. Effectuer l'application numérique avec la masse molaire $M = 28 \text{ g.mol}^{-1}$, la température de vaporisation à pression atmosphérique $T_{\text{vap}} = 77 \text{ K}$ et l'enthalpie de changement d'état $\Delta H_{\text{vap}} = 198 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

- 13) Le compresseur de la machine consomme une puissance moyenne de 37 kW. Comment faut-il comparer cette valeur à la précédente ?
- 14) Une fois le gaz liquéfié, il est possible de descendre à des températures plus basses à l'aide d'une pompe évacuant la vapeur du gaz. Expliquer.

VIII – Thermodynamique des milieux magnétiques

Cette partie s'intéresse à la thermodynamique des milieux magnétiques. Les variables naturelles utilisées seront : la température T , l'aimantation M et l'excitation magnétique H . Les grandeurs vectorielles auront toutes la même direction Oz, c'est pourquoi nous n'utiliserons que des grandeurs scalaires, composantes de ces vecteurs selon Oz.

- 1) Pourquoi utilise-t-on préférentiellement la variable H plutôt que le champ magnétique B ?

Moment magnétique et moment cinétique atomique

- 2) Soit un modèle classique d'atome à un électron en mouvement orbital circulaire autour du noyau. Montrer que le moment magnétique μ_B (magnéton de Bohr) associé à ce mouvement est proportionnel au moment cinétique L de l'électron.
- 3) Évaluer littéralement le moment magnétique μ_B en fonction de h , de la masse de l'électron m_e et de la charge élémentaire e . Effectuer l'évaluation numérique.
- 4) Que peut-on dire du moment cinétique orbital d'un atome alcalin (première colonne de la classification périodique) ? Du moment cinétique de spin et du moment magnétique du même atome ? Examiner le cas d'un atome alcalino-terreux (deuxième colonne de la classification périodique).

Paramagnétisme à deux niveaux

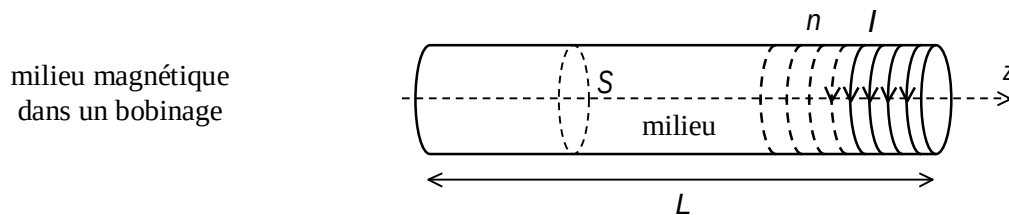
- 5) Qu'est-ce qu'un milieu paramagnétique au niveau microscopique ? Qu'est ce qui le distingue d'un ferromagnétique ?
- 6) Soit une assemblée de moments magnétiques indépendants ne pouvant prendre que deux états de projection selon l'axe Oz : $\pm \mu_B$. La température T est maintenue constante. Un champ extérieur H est imposé. Quelle est l'énergie d'un dipôle magnétique dans ce champ ?
- 7) Exprimer les probabilités normalisées pour un dipôle d'être dans l'état $+\mu_B$ et $-\mu_B$.

- 8) En déduire l'expression de l'aimantation $M(T, H)$ s'il y a n dipôles par unité de volume, ainsi que celle de la susceptibilité magnétique $\chi_m = M / H$ du milieu.
- 9) Tracer $M = f(H)$. Interpréter les comportements limites de la susceptibilité à haute et basse température.
- 10) À quelle condition le milieu a-t-il un comportement linéaire ? Simplifier $M(T, H)$.
- 11) Évaluer la susceptibilité magnétique χ_m d'un paramagnétique solide à 300 K.

Thermodynamique d'un milieu paramagnétique

Dans cette partie, l'équation d'état du milieu magnétique supposé linéaire est : $M = \frac{C}{T} H$ (loi de Curie) où C est la constante de Curie.

- 12) Le milieu magnétique cylindrique, de section S et de longueur L , est entouré d'un bobinage jointif comportant n spires par mètre, réparties uniformément, parcourues par un courant d'intensité I . Calculer le champ H dans le milieu en fonction de I , en admettant la nullité de H à l'infini et en négligeant les effets de bord.



- 13) On impose une variation élémentaire d'intensité dI . Montrer que le travail élémentaire fourni par le générateur au système est : $\delta W_{op} = I d\Phi$ où Φ est le flux de B à travers le bobinage.
- 14) En déduire une expression du travail élémentaire apporté au système par unité de volume en fonction de H et dB .
- 15) Distinguer dans ce travail élémentaire la part d'énergie apportée à la variation du champ dans le vide (qui serait également apportée en l'absence de milieu) de celle effectivement fournie au milieu. Montrer ainsi que le travail élémentaire volumique reçu par le milieu magnétique est :

$$\delta W_m = \mu_0 H dM .$$

- 16) On note s l'entropie par unité de volume. Donner les différentielles de l'énergie interne volumique $u(s, M)$ et de l'enthalpie libre généralisée volumique $g(T, H)$ du milieu. En déduire la relation :

$$\left. \frac{\partial s}{\partial H} \right|_T = \mu_0 \left. \frac{\partial M}{\partial T} \right|_H .$$

- 17) Exprimer la différentielle de $s(T, H)$ pour le milieu considéré en fonction de T et de H . On notera c_H la capacité thermique du milieu à champ H constant.

Refroidissement par désaimantation adiabatique

Une substance paramagnétique à la température T_1 et vérifiant la loi de Curie est soumise à un champ H_1 : on dit qu'elle est aimantée. Si ensuite le milieu est calorifugé, une désaimantation par diminution du champ à la valeur $H_2 < H_1$ conduit à un refroidissement à $T_2 < T_1$. Cette désaimantation, effectuée lentement, peut être considérée réversible. Elle permet l'obtention de très basses températures de l'ordre de quelques mK.

- 18) Établir la relation entre dT et dH lors d'une telle désaimantation.
- 19) Montrer que la stabilité thermique du milieu à H constant impose $c_H > 0$. En déduire que la désaimantation s'accompagne d'un refroidissement du milieu.
- 20) Aux très basses températures c'est la contribution magnétique qui domine dans l'expression de la capacité thermique, ce qui nous amène à fixer : $c_H(T, H=0) = 0$. Établir l'expression de $c_H(T, H)$.
- 21) La désaimantation est effectuée en diminuant le champ d'un facteur 10 : $H_2 = H_1 / 10$. Quelle est la température finale T_2 si $T_1 = 1$ K ?
- 22) Quelle est la variation d'aimantation M ? Que penser de la terminologie « désaimantation adiabatique » ?

Transition de phase ferromagnétique-paramagnétique – Modèle de Landau

- 23) Qu'est-ce qu'une transition de phase du premier ordre ? Donner un exemple.
- 24) Pourquoi la transition liquide-vapeur au point critique est-elle du second ordre ? Que dire de la compressibilité isotherme χ_T en ce point ? Par quel phénomène ceci se traduit-il ?
- 25) L'énergie libre volumique du milieu magnétique dans un modèle de Landau s'écrit :

$$f(T, M) = f_0(T) + a(T - T_c) \frac{M^2}{2} + b \frac{M^4}{4} \quad (a \text{ et } b \text{ constantes positives})$$

où T_c est la température critique de Curie. En déduire l'équation d'état du milieu : $H(T, M)$ en s'aidant des résultats obtenus à la question 16.

- 26) Montrer que f est un potentiel thermodynamique pour un système magnétique isotherme sans champ extérieur imposé. Tracer l'allure de $f(M)$ pour $T > T_c$ et $T < T_c$.
- 27) En déduire l'aimantation à l'équilibre sans champ imposé pour $T > T_c$ et $T < T_c$. Commenter.
- 28) Justifier que la transition ferromagnétique-paramagnétique n'est pas du premier ordre.
- 29) Déterminer l'expression de $s(T, M)$ par dérivation de f .
- 30) On étudie la transition en champ extérieur nul : $H = 0$. Donner $s(T)$ pour $T > T_c$ et $T < T_c$. En déduire les valeurs de c_H pour $T > T_c$ et $T < T_c$. La transition est-elle du second ordre ?

31) Calculer la susceptibilité magnétique $\chi = \frac{\partial M}{\partial H} \Big|_T$ pour $T > T_c$ et $T < T_c$.

32) Au voisinage de la transition à T_c , les grandeurs physiques présentent un comportement critique en puissance de $|T - T_c|$:

$$c_H \propto |T - T_c|^{-\alpha} ; \quad M \propto |T - T_c|^{\beta} ; \quad \chi \propto |T - T_c|^{-\gamma} .$$

Justifier que $\alpha = 0$ convient. Donner les exposants critiques β et γ . Montrer qu'ils vérifient l'égalité de Rushbrooke :

$$\alpha + 2\beta + \gamma = 2 .$$

33) Pour Fe_3O_4 la mesure des exposants critiques donne : $\alpha = -0,16$; $\beta = 0,405$ et $\gamma = 1,35$. L'écart de ces valeurs expérimentales à celles données par le modèle de Landau s'explique par le rôle essentiel des fluctuations, négligées dans l'approche classique précédente, au voisinage de T_c . Justifier l'importance des fluctuations d'aimantation au voisinage de la température critique.

FIN

6. Rapport relatif à la composition de physique

❖ Généralités et commentaires portant sur l'ensemble du sujet

Cette épreuve avait pour sujet la thermodynamique à l'équilibre, des fondements à l'étude de plusieurs applications : mécanique des fluides, élasticité et propriétés magnétiques de certains milieux. Toutes les parties abordent les phénomènes étudiés aussi bien d'un point de vue macroscopique que microscopique.

En physique, la thermodynamique n'est assurément pas un domaine indépendant des autres. Elle traite des échanges d'énergie en prenant en compte l'énergie des degrés de liberté microscopiques. Relève donc de la thermodynamique toute étude physique qui prend en compte la température. Celle-ci en est pratiquement la signature.

Par ailleurs, le sujet comporte plusieurs questions de mécanique. Il s'agit d'une des parties les plus importantes de la physique. Elle est abordée très tôt par les élèves dans leur scolarité et elle est très présente par ses manifestations souvent spectaculaires dans la vie quotidienne. Pourtant, elle est mal maîtrisée par une grande proportion des candidats. De telles lacunes ne sont pas recevables de la part de futurs enseignants de sciences physiques. Nous invitons donc les futurs candidats à redoubler d'efforts dans ce domaine.

Plus généralement, le sujet proposé évalue les connaissances des candidats et non leur aptitude à mener des calculs souvent fastidieux.

Le jury est surpris de constater de fréquents recours à des formalismes lourds de physique statistique, d'autant plus que les candidats peinent ensuite à les simplifier pour obtenir la limite haute température, qui est le résultat demandé.

En réalité, la grande majorité des questions posées peut être traitée de façon concise. Mais cela nécessite une connaissance précise et rigoureuse des définitions, des principes ou théorèmes avec les hypothèses nécessaires. Les correcteurs rappellent également qu'un résultat affirmé sans preuve n'a aucune valeur, la physique ne se résumant pas à un formulaire. Par exemple, la relation de Mayer $C_p - C_v = R$ est souvent affirmée sans justification ; lorsqu'elle l'est, c'est souvent de manière peu rigoureuse, sans expliciter en quoi l'hypothèse du caractère parfait du gaz est nécessaire.

Un point positif est à signaler : de nombreux candidats traitent les évaluations numériques demandées et savent estimer des ordres de grandeur, littéraux comme numériques. Une telle attitude doit être maintenue : avec peu de technicité, il est alors possible d'aborder rapidement et simplement des applications de la physique et de tester tel ou tel modèle.

Le traitement théorique propre à la thermodynamique classique macroscopique est souvent incorrect. Des raisonnements faisant appel à la « chaleur » dans telles ou telles conditions sont encore courants. Une construction moderne s'appuyant sur les fonctions d'état et leurs différentielles est indispensable. Les coefficients calorimétriques et les capacités thermiques en particulier doivent être définis à partir de dérivées partielles de l'énergie interne ou de l'entropie, et non pas comme des chaleurs échangées. Ceci n'interdit nullement d'interpréter un phénomène ou le résultat d'un calcul à l'aide de raisonnements qualitatifs sur les énergies échangées, ce que les candidats savent souvent faire, ce qui montre qu'ils ont compris l'essentiel.

La mise en équation des principes et théorèmes nécessite l'utilisation d'un certain formalisme. D'une certaine façon, ce n'est pas le plus difficile et il y a une bonne part d'arbitraire dans le choix des notations. Mais le but poursuivi doit être de se faire bien comprendre par le lecteur.

Ce souci doit être présent à l'esprit du futur enseignant et l'utilisation d'un formalisme choisi avec soin est une aide à la compréhension.

En particulier, le symbole d est employé pour représenter la différentielle d'une fonction et Δ pour sa variation dans une transformation non élémentaire. L'utilisation de ces symboles pour le travail et l'énergie thermique échangée n'est pas acceptable et doit être considéré comme une erreur grave. Confondre un raisonnement intégral avec un raisonnement élémentaire ne l'est pas moins (en particulier pour traiter un comportement cyclique). Ce manque de soin dans le choix et l'utilisation du formalisme est constaté dans de trop nombreuses copies. Il traduit souvent une compréhension trop superficielle du sujet et un manque de rigueur.

❖ Commentaires spécifiques à certaines questions

I – Agitation thermique des gaz

- 2) Le point fixe de l'eau en question est le point triple à 273,16 K.
- 3) v^* a la dimension d'une vitesse et non d'une vitesse au carré.
- 4) Le mouvement brownien est souvent confondu avec l'agitation thermique.
- 8) Les électrons sont des fermions et se comportent comme tels. Cela semble peu connu.

II – Énergie interne et capacités thermiques

- 2) 3) 4) La relation $Q = C \Delta T$ est présente dans de trop nombreuses copies sans qu'aucune hypothèse ne soit précisée !
- 3) Le thermostat, système ayant des propriétés bien particulières, est souvent confondu avec l'appareil de régulation de température.
- 5) La confusion est souvent faite entre sommation sur l'ensemble des états et sommation sur les énergies.
- 6) L'indépendance des particules, hypothèse nécessaire pour appliquer la statistique de Boltzmann à chacune d'elle (factorisation de la fonction de partition) n'est que très rarement mentionnée.
- 13) La question est très mal traitée, même pour les seules contributions de translation et de rotation.
- 14) Le développement de Taylor de l'énergie potentielle autour de l'équilibre stable est trop rarement correctement écrit.
- 15) Trop peu de candidats pensent à la masse réduite

III – Les principes de la thermodynamique

- 2) L'énoncé du premier principe doit prendre en compte une énergie mécanique macroscopique et non seulement une énergie interne.

- 3) 4) L'énoncé du premier principe ne prend en compte que le travail des forces extérieures, alors que celui de l'énergie cinétique prend en compte également le travail des forces intérieures.
- 6) Les énoncés fondamentaux sont mal connus. Les bilans énergétiques sur ce système élémentaire sont donc rarement faits correctement. Ce système est un exemple où $Q_{12} \neq Q_{21}$.
- 9) L'expression $S(T, V)$ doit être homogène !
- 11) L'équiprobabilité des micro-états nécessite d'avoir affaire à un système isolé.
- 12) L'interprétation statistique du second principe se résume trop souvent à un accroissement du désordre, notion floue. A l'équilibre thermodynamique, le système se trouve dans l'état macroscopique le plus probable, celui correspondant au plus grand nombre de micro-états.
- 13) Il manque souvent une hypothèse : détente adiabatique ou dans le vide. Et la constance de la température doit être justifiée dans le cas du gaz parfait.

IV – Identité thermodynamique et détermination des fonctions d'état

- 2) 3) L'écriture des différentielles de U et S pose de gros problèmes aux candidats et il en est de même du signe du travail élémentaire. En conséquence, les relations de Clapeyron sont rarement démontrées.
- 18) Les hypothèses permettant l'utilisation de la formule de Stirling se réduisent souvent à $N \gg 1 \dots$

V – Les moteurs thermiques

- 2) Il y a trop de mauvaises réponses à cette question. Beaucoup de candidats se contentent de raisonner sur PdV ou TdS sans s'intéresser au cycle.
- 3) La confusion entre travail et puissance est courante.

VI – Bilan énergétique sur un système ouvert

Les quatre premières questions mettent en évidence des lacunes concernant le traitement d'un système ouvert et l'absence de connaissances solides en mécanique des fluides.

VII – Obtention de basses températures par liquéfaction d'un gaz

- 5) Une grandeur extensive est proportionnelle au nombre n de particules, tous les autres paramètres étant intensifs. Il ne suffit pas que la grandeur dépende de n . La notion d'extensivité est donc à revoir.
- 7) La détente de Joule-Thomson est peu et mal connue, quand elle l'est. Le traitement des systèmes ouverts n'étant pas maîtrisé, les bonnes réponses à cette question sont très peu nombreuses.

VIII – Thermodynamique des milieux magnétiques

- 6) 7) et 8) De nombreux candidats connaissent ce modèle, mais peu le traitent sans erreur. L'expression de l'énergie d'un dipôle dans un champ est souvent fautive, ainsi que les signes intervenant dans les facteurs de Boltzmann.
- 12) L'expression de H est très rarement correcte. Il s'agit pourtant d'un calcul élémentaire de magnétostatique.

SESSION DE 2006**concours externe
de recrutement de professeurs agrégés****section : sciences physiques****option : physique**

composition de chimie

Durée : 5 heures

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

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

Détection d'une erreur éventuelle par le candidat

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

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

Tournez la page S.V.P.

QUELQUES SYSTEMES OU PROCEDES METTANT EN JEU DIFFERENTS MODES DE CONVERSION DE L'ENERGIE CHIMIQUE

Lorsqu'une transformation chimique se produit, l'énergie du système chimique est modifiée et un échange d'énergie a lieu avec le milieu extérieur. L'énergie chimique relative à la transformation peut alors être convertie en énergie thermique, mécanique, électrique ou lumineuse. Ces conversions peuvent aussi avoir lieu en sens inverse si un apport d'énergie est nécessaire à l'évolution chimique du système. Ce sujet propose d'étudier quelques exemples de conversion de l'énergie chimique.

Données :

Activités des espèces :

- On suppose les activités a_i des espèces dissoutes égales au rapport de leur concentration à la concentration standard toutes deux étant exprimées en mol.L^{-1} .
- Tous les gaz sont supposés parfaits.

Quelques valeurs numériques utiles :

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

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

Constante de Faraday $F = 96500 \text{ C.mol}^{-1}$

$(RT / F) \cdot \ln 10 = 0,059 \text{ V à } 298\text{K}$

Numéros atomiques : $Z_{\text{H}} = 1$; $Z_{\text{C}} = 6$; $Z_{\text{N}} = 7$; $Z_{\text{O}} = 8$.

Masses molaires atomiques (g.mol^{-1}) : $M_{\text{H}} = 1$; $M_{\text{O}} = 16$; $M_{\text{Ni}} = 59$; $M_{\text{N}} = 14$; $M_{\text{Na}} = 23$.

Rayons ioniques : $R(\text{Ni}^{2+}) = 72,0 \text{ pm}$; $R(\text{O}^{2-}) = 140 \text{ pm}$

Données thermodynamiques :

- Enthalpies standard de formation à 298 K (supposées indépendantes de la température)

Espèce	$\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$	$\text{H}_2\text{O}(\text{l})$
$\Delta_f H^\circ (\text{kJ.mol}^{-1})$	-191,2	-285,8

- Entropies standard absolues à 1033 K

Espèce	$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	$\text{H}_2(\text{g})$	$\text{CO}_2(\text{g})$	$\text{CH}_4(\text{g})$
$S^\circ (\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1})$	226	165	269	215

- Entropie standard de la réaction de formation de l'eau liquide (supposée indépendante de la température) :



- Capacités thermiques molaires standard (supposées indépendantes de la température)

Espèce	$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	$\text{CO}_2(\text{g})$
$C_p^\circ (\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1})$	51	60

PREMIERE PARTIE : SYSTEME CHIMIQUE ET ECHANGES THERMIQUES

A. Généralités et définitions

On considère un système fermé dans lequel se produit une transformation chimique (R) modélisée par l'équation-bilan : $0 = \sum_i \nu_i A_i$ (le nombre stoechiométrique ν_i est positif pour les produits et négatif pour les réactifs).

On note $n_i(0)$ (respectivement $n_i(t)$) la quantité de matière de l'espèce A_i à l'instant initial (respectivement à l'instant t).

A.I. *Grandeur de réaction*

A.I.1. Définir l'avancement ξ de la réaction. Quelle est son unité ?

A.I.2. Soit Z une grandeur extensive relative au système.

A.I.2.1. Donner l'expression de la différentielle dZ de $Z(T, P, \xi)$.

A.I.2.2. Définir la grandeur de réaction $\Delta_r Z$.

A.I.3. Grandeur molaire partielle

A.I.3.1. Ecrire la différentielle dZ de $Z(T, P, n_1, \dots, n_i, \dots)$.

A.I.3.2. Définir la grandeur molaire partielle z_i pour le composé i .

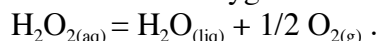
A.I.4. Montrer que $\Delta_r Z = \sum_i \nu_i z_i$. La grandeur de réaction $\Delta_r Z$ est-elle intensive ou extensive ?

A.II. *Transferts thermiques*

A.II.1. Montrer que lors d'une évolution élémentaire de la réaction (R), à température et pression constantes, le transfert thermique dû à la réaction chimique s'écrit : $\delta Q_p = \Delta_r H \cdot d\xi$.

A.II.2. Mesure expérimentale d'une enthalpie de réaction

L'expérience proposée permet de déterminer l'enthalpie standard de la réaction supposée totale de décomposition de l'eau oxygénée selon :



Cette réaction très lente est catalysée par les ions Fe(III) .

Dans un calorimètre de capacité thermique $c' = 5 \text{ J.K}^{-1}$, on place 50,0 mL d'une solution d'eau oxygénée à la concentration $c_0 = 0,921 \text{ mol.L}^{-1}$ et la température est relevée pendant 4 min sous agitation douce. A $t = 5 \text{ min}$, on verse 10,0 mL d'une solution de nitrate de fer (III) à $0,50 \text{ mol.L}^{-1}$. La température est à nouveau relevée régulièrement pendant 15 min. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant :

t (min)	0	1	2	3	4	6	7	8	9
T(°C)	22,20	22,14	22,08	22,02	21,96	29,00	35,75	36,87	37,10

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
36,65	36,20	35,75	35,30	34,85	34,40	34,00	33,50	33,05	32,55	32,15

A.II.2.1. Proposer une méthode de détermination de la capacité thermique du calorimètre.

A.II.2.2. Tracer le graphe $T = f(t)$ sur une feuille de papier millimétré, **à rendre avec la copie**. Echelle : 0,5 cm $\leftrightarrow$ 1 min
1 cm $\leftrightarrow$ 1°C

A.II.2.3. L'enthalpie de réaction est déterminée en prenant pour température initiale $T_1 = 21,9^\circ\text{C}$ et pour température finale $T_2 = 38,9^\circ\text{C}$. Justifier ces valeurs.

A.II.2.4. En considérant que le mélange réactionnel présente une masse volumique $\mu = 1 \text{ g.cm}^{-3}$ et une capacité thermique massique $C = 4,18 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$, calculer la valeur (supposée indépendante de la température) de l'enthalpie standard de décomposition de l'eau oxygénée. Correspond-elle à la valeur attendue ?

B. Application à la chimie du méthane

B.I. *Combustion du méthane*

B.I.1. Ecrire le bilan de la réaction de combustion du méthane avec un nombre stœchiométrique de 1 pour CH_4 . Dans quel système d'usage courant cette réaction se produit-elle ?

B.I.2. L'enthalpie standard (supposée indépendante de la température) de cette réaction est de -662 kJ.mol^{-1} . En supposant une combustion complète et adiabatique par une quantité stœchiométrique de dioxygène pur, évaluer la température de flamme. Commenter.

B.I.3. En réalité, la combustion du méthane s'accompagne de réactions de dissociations thermiques des molécules mises en jeu, conduisant à la composition suivante des gaz à l'équilibre :

	H_2O	CO	CO_2	H_2	O_2	OH	H	O
%	37,2	15,1	11,7	6,9	6,9	14,4	4,6	3,3

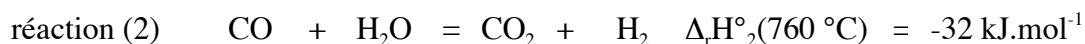
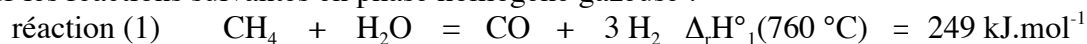
La température atteinte après combustion est en fait de 2750°C . Les réactions de décomposition ayant lieu sont-elles plutôt exo ou endothermiques ?

B.II. Reformage du méthane

La production industrielle de dihydrogène se fait notamment par reformage catalytique du méthane.

B.II.1. Citer une utilisation industrielle du dihydrogène.

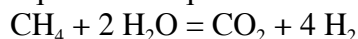
B.II.2. Pour définir les conditions de fonctionnement d'un four de reformage, on s'appuie sur les réactions suivantes en phase homogène gazeuse :



B.II.2.1. Quelle est qualitativement l'influence d'une augmentation de température à pression constante et en système fermé pour l'équilibre (1) seul ? pour l'équilibre (2) seul ?

B.II.2.2. Quelle est qualitativement l'influence d'une augmentation de pression à température constante et en système fermé pour l'équilibre (1) seul ? pour l'équilibre (2) seul ?

B.II.2.3. Des conditions de fonctionnement d'un four de reformage sont les suivantes : la réaction se déroule à 760°C , sous une pression de 33 bars, avec une charge initiale de gaz naturel dans un rapport molaire $\text{H}_2\text{O} / \text{CH}_4$ égal à 3. On considèrera dans cette question l'équilibre homogène (3) :



a. Calculer l'enthalpie libre standard de réaction $\Delta_r G^\circ_3$ à 760°C puis la constante de l'équilibre K°_3 à cette température.

b. Justifier l'intérêt de travailler en excès de vapeur d'eau.

c. A l'équilibre, le pourcentage molaire de méthane dans le mélange gazeux sortant du four est d'environ 8 %. En déduire la valeur du taux de dissociation α du méthane dans ces conditions.

B.II.2.4. Pour abaisser le taux résiduel de méthane, on effectue un reformage secondaire dans un réacteur dit autothermique. Sachant qu'on y introduit le mélange gazeux provenant du reformeur principal et de l'air, justifier qu'un apport extérieur d'énergie thermique ne soit pas nécessaire pour entretenir la réaction (3).

B.II.3. Ces réactions sont toujours conduites en présence d'un catalyseur solide, à base notamment d'oxyde de nickel NiO.

B.II.3.1. De quel type de catalyse s'agit-il ? Sous quelle forme le catalyseur doit-il être introduit pour une efficacité maximale ?

B.II.3.2. Le rendement thermodynamique du reformage est-il modifié par la présence du catalyseur ?

B.II.3.3. L'oxyde de nickel cristallise dans une structure de type NaCl.

- Dessiner la maille conventionnelle correspondante et calculer sa population (nombre de motifs).
- Quelle est la coordinence des ions dans cette structure ?
- Dans le cadre du modèle des sphères dures, quelles conditions doit vérifier le rapport des rayons ioniques du cation et de l'anion pour qu'une telle structure puisse exister ? Quelles sont les limites d'un tel modèle ?
- Calculer le paramètre de maille a et la masse volumique de l'oxyde de nickel.

DEUXIEME PARTIE : SYSTEME CHIMIQUE ET ENERGIE ELECTRIQUE

Les échanges électroniques entre espèces chimiques peuvent être exploités pour transformer l'énergie chimique d'un système rédox en énergie électrique. L'étude proposée ci-dessous développe un exemple d'application analytique du transfert d'électrons puis aborde quelques aspects du fonctionnement et de l'élaboration d'une pile à combustible.

A. Caractérisation expérimentale d'un complexe

On se propose de déterminer la stœchiométrie et la constante globale de formation β_n du complexe $\text{Ag}(\text{NH}_3)_n^+$ en solution aqueuse.

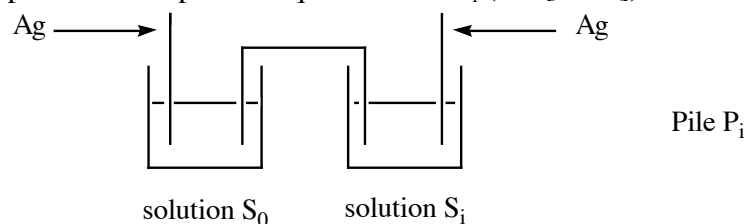
A.I. On considère les solutions S_i ($i = 0, 1, 2$ et 3), préparées de la manière suivante : dans une fiole jaugée de 100 mL, on place un volume $v_0 = 20$ mL d'une solution de nitrate d'argent à $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$ et un volume v_i (mL) d'une solution d'ammoniac à 1 mol.L^{-1} puis on complète au trait de jauge avec de l'eau distillée.

solution	S_0	S_1	S_2	S_3
v_0 (mL)	20	20	20	20
v_i (mL)	0	20	40	60

A.I.1. Ecrire l'équation bilan de la réaction globale de formation du complexe $\text{Ag}(\text{NH}_3)_n^+$ dans la solution S_i ($\forall i \in [1, 2, 3]$).

A.I.2. Donner en fonction de v_i et n l'expression des concentrations à l'équilibre $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_n^+]_i$ et $[\text{NH}_3]_i$. Quel est l'intérêt d'utiliser une solution d'ammoniac concentrée ?

A.II. On réalise la pile suivante pour chaque solution S_i ($i \in [1,2,3]$) :



A.II.1. Comment nomme-t-on une telle pile ?

A.II.2. Rappeler l'expression de la formule de Nernst pour le couple Ag^+/Ag .

A.II.3. Montrer que la mesure des ddp $\Delta E_i = E_i - E_0$ entre les électrodes d'argent permet de déterminer les valeurs de n et β_n .
Justifier le signe négatif de ΔE_i .

A.II.4. Exploiter les mesures du tableau ci-dessous :

Pile	P_1	P_2	P_3
ΔE_i (mV)	-342	-374	-392

A.II.5. La constante de formation du complexe ammine argent (I) a pour valeur $10^{3.4}$.
Vérifier que dans les conditions de l'expérience on peut négliger la formation de ce complexe.

B. Conversion d'énergie chimique en énergie électrique : la pile à combustible à membrane échangeuse d'ions

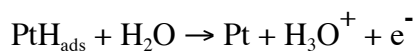
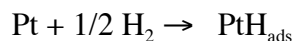
La pile à combustible est un système électrochimique permettant de convertir en énergie électrique l'énergie chimique d'un combustible gazeux (ici H_2) en l'oxydant par le dioxygène pur ou par le dioxygène de l'air.

Une cellule de pile se compose de deux électrodes entre lesquelles est disposée une membrane électrolyte polymère. La température de fonctionnement est comprise entre 60 et 90°C, afin que la membrane conserve ses capacités de rétention d'eau.

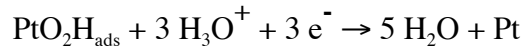
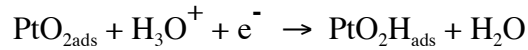
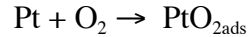
Les électrodes sont constituées de très petites particules de platine (2 à 3 nm) supportées par des poudres de carbone.

B.I. *Etude de la réaction dans une cellule*

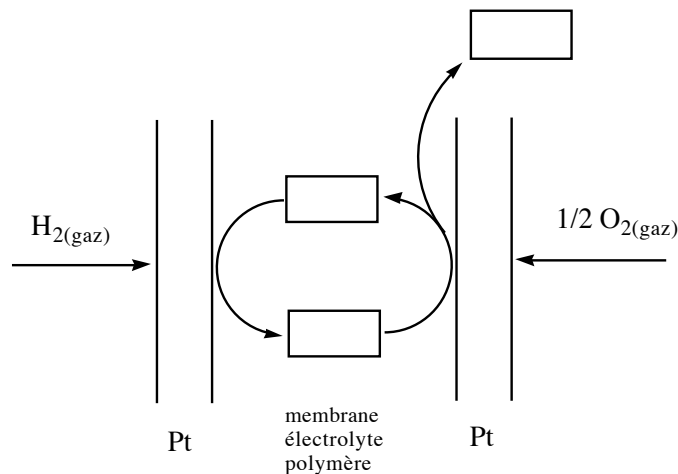
B.I.1. Au contact du platine, le dihydrogène subit une adsorption dissociative avant de réagir avec l'eau :



Le dioxygène, quant à lui, est adsorbé de manière non dissociative :



B.I.1.1. Reproduire et compléter le schéma suivant pour expliquer le fonctionnement de la pile, en indiquant notamment les espèces devant figurer dans les emplacements encadrés, le sens de circulation des électrons et la polarité de la cellule.



B.I.1.2. En déduire la réaction globale de fonctionnement de la pile (réaction 1).

B.I.2. On considère que la pile fonctionne à température constante $T = 353 \text{ K}$ et pression constante $P^\circ = 1 \text{ bar}$.

B.I.2.1. Le facteur de conversion de la pile se définit par le rapport $r = \Delta_r G_1 / \Delta_r H_1$. Montrer qu'en fonctionnement réversible ce rapport est égal au rendement thermodynamique de la cellule ρ défini comme le rapport de l'énergie électrique fournie par le système sur l'énergie totale libérée vers l'extérieur.

B.I.2.2. Calculer ce rendement dans les conditions standard à 353 K . Commenter.

B.II. Association des cellules en série

B.II.1. Dans les conditions de l'étude, calculer la force électromotrice standard de cette cellule.

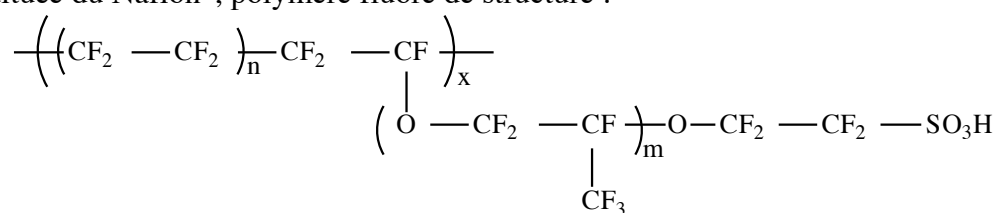
B.II.2. Lorsque la pile débite une densité de courant de $0,5 \text{ A/cm}^2$, la tension aux bornes d'une cellule est d'environ $0,7 \text{ V}$. Comment expliquer cet écart à la valeur calculée à la question précédente ? Peut-on le minimiser ?

B.II.3. Combien faut-il associer en série de cellules d'une surface efficace de 250 cm^2 pour obtenir une puissance de 75 kW nécessaire au fonctionnement d'un moteur électrique ?

B.II.4. Cette association fonctionne pendant 1 h . Quelle masse de dihydrogène a été consommée ?

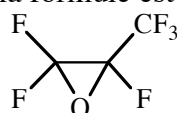
B.III. La membrane polymère

La première membrane efficace, mise au point par la firme Du Pont de Nemours, est constituée du Nafion[®], polymère fluoré de structure :



B.III.1. Pourquoi cette membrane doit-elle présenter des groupements acides ?

B.III.2. En omettant les extrémités acides $-\text{O}-\text{CF}_2-\text{CF}_2-\text{SO}_3\text{H}$, montrer que ce polymère peut être considéré comme le résultat de la copolymérisation par blocs du tétrafluoroéthylène et de l'hexafluoroépoxypropane, dérivé totalement fluoré de l'oxyde de propylène, et dont la formule est donnée ci-dessous :



B.III.3. La polymérisation du tétrafluoroéthylène se fait par voie radicalaire, en suspension dans l'eau et sous pression, en présence de peroxydes (ROOR). Par analogie avec la formation du polyéthylène, proposer un mécanisme pour cette polymérisation radicalaire.

B.III.4. La polymérisation de l'oxyde de propylène (ou époxyp propane) peut être réalisée par voie anionique.

B.III.4.1. La molécule d'oxyde de propylène est-elle chirale ?

B.III.4.2. Représenter en convention de Cram le stéréoisomère R de cette molécule.

B.III.4.3. Proposer un mécanisme réactionnel décrivant l'action sur l'oxyde de propylène d'un nucléophile Nu^- . Expliquer pourquoi une petite quantité d'hydroxyde de sodium dans l'oxyde de propylène peut provoquer sa polymérisation par voie anionique.

B.III.4.4. La polymérisation modifie-t-elle la configuration absolue du carbone asymétrique ?

B.IV. Le comburant O_2

B.IV.1. La molécule

B.IV.1.1. Rappeler la configuration électronique fondamentale de l'atome d'oxygène.

B.IV.1.2. Après avoir rappelé les règles d'élaboration des diagrammes d'orbitales moléculaires, construire le diagramme d'orbitales moléculaires de la molécule de dioxygène.

B.IV.1.3. Rappeler les règles à respecter pour placer les électrons dans un tel diagramme.

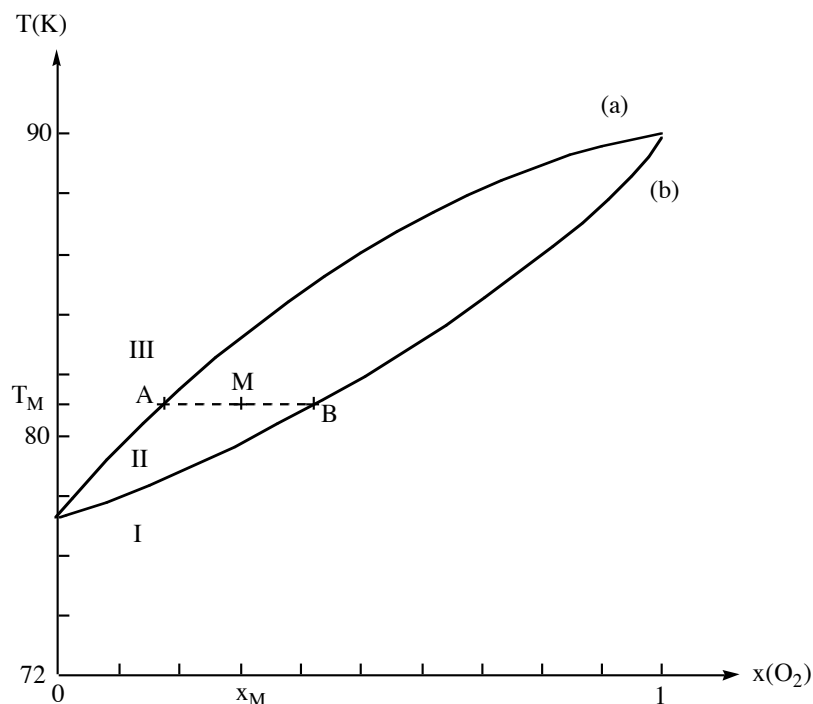
B.IV.1.4. Placer les électrons dans les orbitales moléculaires du diagramme de O_2 . Que peut-on en conclure quant aux propriétés magnétiques du dioxygène ?

B.IV.2. Production du dioxygène

Dans les piles à combustible, l'alimentation se fait directement par l'air, sauf pour des applications spécifiques qui nécessitent l'utilisation du dioxygène pur, obtenu par distillation fractionnée de l'air liquide.

B.IV.2.1. Les mélanges binaires O_2-N_2

Le changement d'état des mélanges binaires O_2-N_2 s'étudie grâce au diagramme isobare ($P = 1$ bar) d'équilibre liquide-vapeur suivant (température en fonction de la composition molaire en dioxygène) :



- Peut-on considérer les mélanges O_2-N_2 comme idéaux d'après ce diagramme ?
- Quelles sont les phases en présence dans les domaines I, II et III ?
- Que représente l'ensemble des points de la courbe (a) ?
- Quels noms donne-t-on aux courbes (a) et (b) ?
- On considère n moles d'un mélange de composition x_M , que l'on porte à la température T_M . Soit n^L le nombre de moles de mélange en phase liquide. Montrer que $n^L \cdot AB = n \cdot AM$

B.IV.2.2. Rectification de l'air liquide.

On considère sous une pression constante égale à 1 bar, une tonne d'un mélange liquide constitué à 40 % de diazote et à 60 % de dioxygène (air enrichi en dioxygène, pourcentage molaire).

- A quelle température commence l'ébullition d'un tel mélange ?
- A quelle température faut-il arrêter l'ébullition pour récupérer un liquide contenant 75 % de O_2 (pourcentage molaire) ?
- Quelle masse m^L de liquide récupère-t-on ?
- Après séchage, ce liquide est totalement vaporisé. Quelle température T_{vap} doit-on dépasser ?
- La vapeur ainsi obtenue est condensée. Quelle est la composition du liquide qui apparaît à T_{vap} ?

TROISIEME PARTIE : CONVERSION D'ENERGIE CHIMIQUE EN ENERGIE MECANIQUE

Une substance explosive se décompose en un temps très court en libérant un volume important de gaz ou de fumées, dégageant ainsi une grande quantité d'énergie thermique et surtout mécanique. Les applications de ce type de réaction peuvent être militaires, bien sûr, mais aussi civiles (feux d'artifice, exploitations géologiques et minières, démolition d'immeubles, travail des métaux, tir sportif, coussin gonflable de sécurité automobile...)

Cette partie illustre la synthèse d'un explosif et la chimie liée au fonctionnement du coussin gonflable de sécurité.

A. Synthèse d'un explosif : la pentrite

La pentrite, explosif utilisé par exemple dans les cordons détonants, les explosifs plastiques, est formée par action de l'acide nitrique sur le pentaérythrytol (noté P) de formule $C(CH_2OH)_4$.

A.I. Préparation du pentaérythrytol

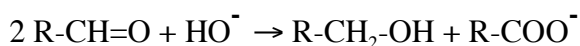
A.I.1. Condensation croisée du méthanal sur l'éthanal

A.I.1.1. Justifier l'acidité de l'hydrogène porté par le carbone en α de la liaison C=O de l'éthanal ($pK_a(\text{CH}_3\text{-CHO} / ^-\text{CH}_2\text{-CHO}) = 19$ et $pK_a(\text{CH}_3\text{-CH}_3 / ^-\text{CH}_2\text{-CH}_3) = 62$).

A.I.1.2. Proposer un mécanisme de formation du pentaérythrose $\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_3\text{CHO}$ par action du méthanal sur l'éthanal en présence d'une base B.

A.I.2. Réaction de Cannizzaro

A.I.2.1. On place un aldéhyde non énolisable de type R-CH=O , en présence d'ions hydroxyde. Il se produit une dismutation selon le bilan suivant :

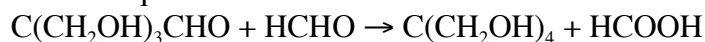


A.I.2.1.1. Justifier le terme «dismutation » attribué à cette transformation.

A.I.2.1.2. Qu'est-ce qu'un aldéhyde non énolisable ? En quoi peut donc consister l'action des ions hydroxyde sur cet aldéhyde ?

A.I.2.1.3. Proposer un mécanisme en trois étapes pour cette transformation, sachant qu'il se produit une migration d'ion hydrure H^- .

A.I.2.2. Le mélange de pentaérythrose $\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_3\text{CHO}$ et de méthanal en présence de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ conduit après hydrolyse à la formation du pentaérythrytol (P) et d'acide méthanoïque :



Expliquer l'analogie entre cette réaction et la précédente, en indiquant les rôles respectifs des deux réactifs.

A.II. *Obtention de la pentrite*

La pentrite a pour formule $\text{C}(\text{CH}_2\text{-O-NO}_2)_4$. On l'obtient par action de l'acide nitrique pur sur le pentaérythrytol (P).

A.II.1. L'acide nitrique

A.II.1.1. Proposer une structure de Lewis de la molécule d'acide nitrique HNO_3 .

A.II.1.2. Montrer que l'acide nitrique constitue un ampholyte acido-basique.

A.II.1.3. Par analogie avec l'eau, écrire le bilan de l'autoprotolyse de l'acide nitrique.

A.II.1.4. Proposer une structure de Lewis pour l'ion nitronium NO_2^+ et un mécanisme pour sa formation dans l'acide nitrique pur.

A.II.2. Formation de la pentrite

A.II.2.1. Donner l'équation bilan de la réaction de formation de la pentrite à partir d'acide nitrique et du composé P.

A.II.2.2. Proposer un mécanisme en deux étapes pour la nitration de P.

B. Le coussin gonflable de sécurité

Lors d'un impact justifiant le déclenchement du système de sécurité, des capteurs détectent la décélération du véhicule ; un signal électrique est envoyé à un détonateur, dans le générateur de gaz de l'airbag. Une réaction très rapide de décomposition de l'azoture de sodium solide provoque alors la libération en quelques millisecondes d'une quantité de gaz suffisante pour déployer le sac en polyamide du coussin gonflable.

B.I. *L'azoture de sodium NaN_3*

B.I.1. Structure de l'ion azoture

B.I.1.1. Proposer une structure de Lewis de l'ion azoture N_3^- .

B.I.1.2. Proposer deux entités (une molécule et un ion) isoélectroniques de N_3^- .

B.I.2. Ionicité des azotures

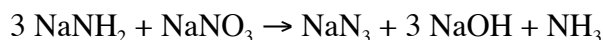
On considère l'azoture d'hydrogène HN_3 , l'azoture de méthyle CH_3N_3 et l'azoture de sodium NaN_3 . Le tableau suivant réunit les longueurs de liaisons N-N (en pm) pour les 3 espèces étudiées.

XN_3	$l_1 (\text{XN}-\text{NN})$	$l_2 (\text{XNN}-\text{N})$
HN_3	124	113
CH_3N_3	124	110
NaN_3	115	115

Proposer pour chaque espèce une structure de Lewis en accord avec ces longueurs de liaison. Discuter du caractère ionique de la liaison X-N.

B.I.3. Préparation

Une voie de synthèse de l'azoture de sodium consiste à mélanger du nitrate de sodium et de l'amidure de sodium à 175°C. Le bilan est le suivant :



B.I.3.1. Calculer le nombre d'oxydation moyen de l'élément azote dans chaque espèce azotée intervenant dans cette réaction.

B.I.3.2. Comment peut-on qualifier cette transformation ? Préciser le(s) rôle(s) de l'amidure de sodium.

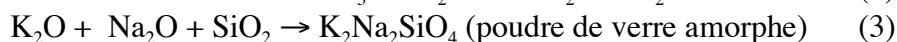
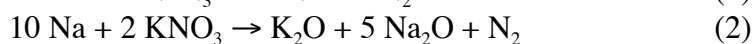
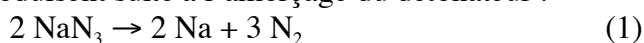
B.I.3.3. On donne les solubilités dans l'eau (en mol.L⁻¹) à différentes températures :

	T = 293 K	T = 373 K
NaNO ₃	5,5	7,0
NaN ₃	4,3	5,5
NaOH	27,2	78,2

Proposer des conditions de synthèse (en terme de proportions de réactifs) permettant une purification de l'azoture de sodium solide formé. Quel nom porte une telle méthode de purification ?

B.II. La chimie dans l'airbag

Trois réactions se produisent suite à l'amorçage du détonateur :



Toutes les espèces sont des solides, sauf le diazote.

B.II.1. Production de gaz

Un coussin gonflable a un volume de 35 à 70 L pour le côté conducteur, et de 60 à 160 L pour le côté passager.

B.II.1.1. Quelle quantité minimale d'azoture de sodium est nécessaire au gonflement d'un sac de 70 L à 300 K et sous un bar ?

B.II.1.2. Le dispositif chimique actuellement utilisé peut être comparé à un dispositif de simple libération du gaz qui serait sous pression dans un réservoir. Evaluer l'ordre de grandeur de la pression à laquelle il faudrait comprimer, dans un réservoir de 500 cm³ à 300 K, la quantité de diazote nécessaire au gonflement du sac de 70 L, sous un bar et à 300 K.

On donne pour l'azoture de sodium la valeur de la masse volumique $\mu' = 185 \text{ g.cm}^{-3}$. Conclure quant à l'intérêt d'utiliser un dispositif chimique plutôt qu'un dispositif de libération d'un gaz sous pression.

B.II.2. Les réactions de sécurité

L'azoture de sodium est mélangé à deux autres solides : le nitrate de potassium et la silice SiO₂.

B.II.2.1. Justifier la nécessité de provoquer les réactions (2) et (3) après explosion de l'azoture.

B.II.2.2. La réaction (2) présente un autre intérêt : lequel ?

QUATRIEME PARTIE : CONVERSION DE L'ENERGIE CHIMIQUE EN ENERGIE LUMINEUSE

Si l'on connaît depuis longtemps dans le règne animal des êtres vivants (lucioles, vers luisants, poissons des grandes profondeurs marines) capables d'émettre de la lumière par un phénomène de bioluminescence, ce n'est que depuis la deuxième moitié du vingtième siècle que la mise au point de systèmes chimiluminescents stimule véritablement l'intérêt des chercheurs. On se propose dans cette partie de décrire deux systèmes chimiluminescents.

Aucune connaissance particulière sur les transitions électroniques et les processus décrits n'est nécessaire pour résoudre cette partie ; une lecture attentive des indications fournies permet de répondre aux questions posées.

A. Etats électroniques des molécules organiques

A.I. *Etat fondamental – états excités*

Soit une molécule M, dont le diagramme d'orbitales moléculaires (OM) présente le remplissage suivant à l'état fondamental (état singulet S_0) :

_____ BV (plus basse OM vacante)

$\begin{array}{|c|} \hline \uparrow \downarrow \\ \hline \end{array}$ HO (plus haute OM occupée)

Schématiser le remplissage de ces OM dans les deux états excités accessibles à ces électrons (on notera S_1 l'état singulet (spin total nul) et T_1 l'état triplet (spin égal à 1)). Quel est d'après vous l'état excité de plus basse énergie ?

A.II. *Diagramme de Jablonski – droite de Stern-Volmer*

On considère l'irradiation d'une solution de composé M. Après absorption d'un photon, la molécule M passe de l'état singulet fondamental S_0 à l'état singulet excité S_1 .

A partir de S_1 , on distingue différents processus :

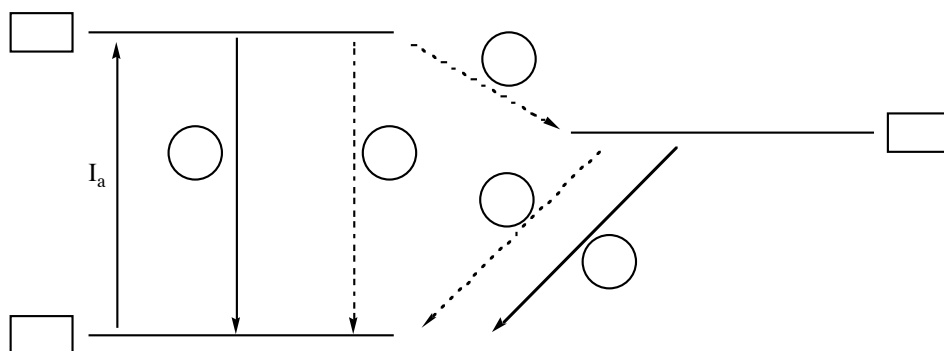
- une fluorescence (k_F)
- un processus non radiatif $S_1 \rightarrow S_0$ (k_S)
- une conversion inter système (transition non radiative) $S_1 \rightarrow T_1$ (k_{ST})

A partir de T_1 , on distingue de même :

- une phosphorescence (k_P)
- un processus non radiatif $T_1 \rightarrow S_0$ (k_T)

Tous ces processus obéissent à une cinétique du premier ordre, dont la constante correspondante apparaît entre parenthèses.

A.II.1. Reproduire et compléter à l'aide des informations ci-dessus le schéma suivant (états S_0 , S_1 , T_1 et constantes k_i), appelé diagramme de Jablonski. Les flèches en trait plein correspondent aux processus radiatifs (c'est à dire avec émission de rayonnement).



I_a est l'intensité lumineuse absorbée par l'échantillon

Cette absorption se fait à la vitesse v_a .

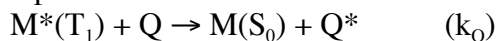
A.II.2. On définit le rendement quantique Φ d'un processus de désexcitation comme le rapport v/v_a du nombre de molécules désexcitées par ce processus (par unité de temps et de volume) sur le nombre de molécules excitées initialement (par unité de temps et de volume), v étant la vitesse de ce processus.

On note $[S_1]$ et $[T_1]$ les concentrations moléculaires de l'espèce M respectivement dans l'état singulet S_1 et l'état triplet T_1 . Donner les rendements quantiques de fluorescence Φ_F , de phosphorescence Φ_P et de conversion inter système Φ_{ST} .

A.II.3. Les états excités S_1 et T_1 peuvent être considérés comme des intermédiaires à très courte durée de vie. En déduire que la concentration de M est sans influence sur les rendements quantiques Φ_F , Φ_P et Φ_{ST} , dont on donnera les expressions en fonction des constantes de vitesse des différents processus.

A.II.4. Désactivation par quenching

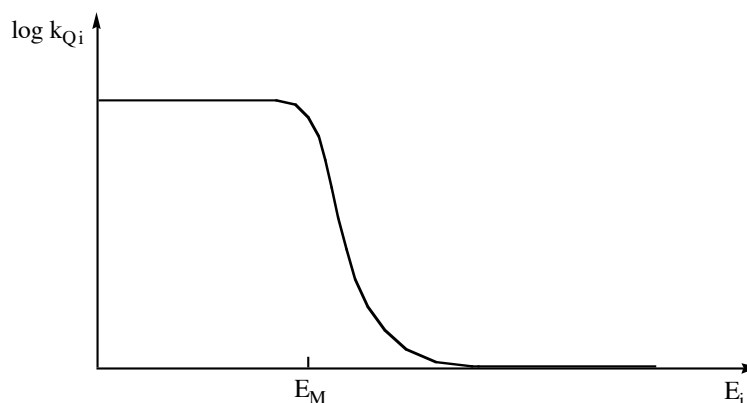
A.II.4.1. Aux processus décrits ci-dessus, s'ajoute un processus élémentaire bimoléculaire mettant en jeu une molécule Q (« quencher ») qui, par collision avec M à l'état triplet la désactive selon :



On note $\Phi_p^{(Q)}$ le rendement quantique de phosphorescence en présence de Q.

Déterminer l'équation de la courbe $\Phi_p/\Phi_p^{(Q)} = f([Q])$.

A.II.4.2. La détermination de k_Q par le tracé de cette droite de Stern-Volmer a été faite pour différents composés jouant le rôle de quencher. On trace ensuite la courbe $\log k_{Qi} = g(E_i)$ pour chaque quencher Q_i , E_i étant l'énergie de son état excité. On obtient l'allure suivante :



En raisonnant sur le transfert d'énergie entre M et Q, commenter cette courbe et donner une signification à la valeur seuil E_M .

B. Application à la chimiluminescence

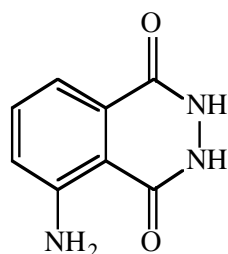
Un processus est dit chimiluminescent lorsqu'il conduit à l'apparition d'une espèce dans un état électronique excité et que le retour de cette espèce à l'état fondamental s'accompagne de l'émission d'un photon.

B.I. Oxydation chimiluminescente du luminol

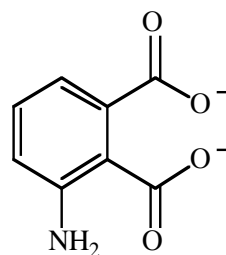
L'expérience est la suivante : il s'agit de mélanger deux solutions aqueuses, l'une d'eau oxygénée et l'autre, tamponnée à $\text{pH} = 9$, contenant du luminol (L), des ions cuivre(II) et de l'ammoniac. On observe en agitant l'émission d'une lumière bleue.

Sont consignées ci-dessous quelques observations expérimentales :

- en milieu aprotique, il suffit d'une base forte et d'oxygène moléculaire pour provoquer la réaction chimiluminescente, avec un maximum d'absorption à 485 nm.
- en solvant protique, la réaction nécessite une base, de l'oxygène moléculaire ou un peroxyde et un oxydant auxiliaire comme les ions hypochlorite (ClO^-), hexacyanoferrate (III) ($\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$), tétrammine cuivre (II) ($\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$) ou de l'oxyhémoglobine (protéine du sang contenant des ions fer (III)).
- on a montré que c'est le radical anion superoxyde $\text{O}_2^{\bullet -}$ qui permet la réaction.
- La longueur d'onde de l'émission observée dans l'expérience décrite se situe vers 430 nm.
- Le spectre de fluorescence de l'ion aminophtalate présente un maximum vers 430 nm.
- Formules des espèces impliquées :



luminol L

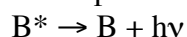
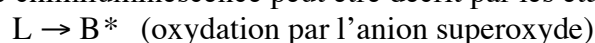


ion aminophthalate

B.I.1. Ecrire la demi-équation électronique de formation du radical anion superoxyde $\text{O}_2^{\bullet -}$ à partir de l'eau oxygénée.

B.I.2. En déduire le rôle des ions cuivre (II) et de l'ammoniac dans l'expérience décrite.

B.I.3. Ce processus de chimiluminescence peut être décrit par les étapes suivantes :



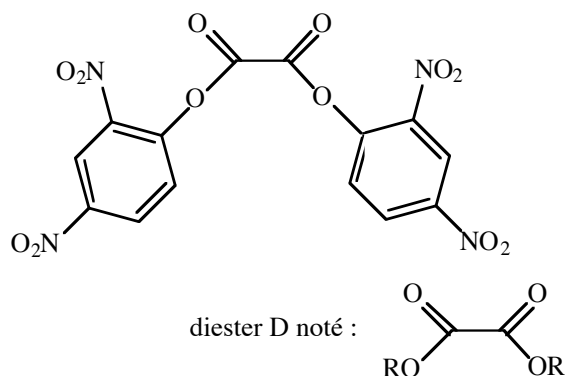
Identifier l'espèce B. Dans quel état excité (B^*) est-elle formée ?

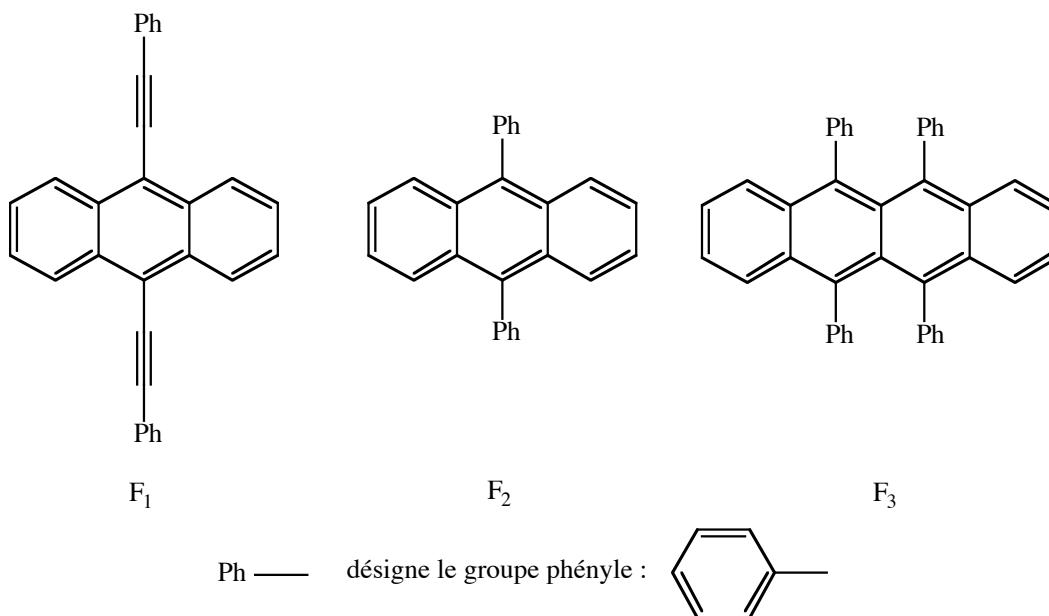
B.I.4. Montrer que le passage de L à B, avec dégagement de diazote, est bien une oxydation.

B.II. Une application commerciale

Les bâtonnets lumineux que l'on distribue parfois lors de fêtes de plein air nocturnes sont constitués d'un tube flexible en matière plastique, renfermant un diester D de l'acide oxalique, un composé F_i ($i = 1, 2$ ou 3) et une ampoule en verre contenant de l'eau oxygénée. En pliant l'ampoule, on déclenche un processus chimiluminescent.

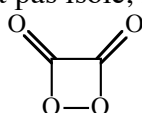
Figurent ci-dessous les formules semi-développées des espèces impliquées dans ce dispositif.





B.II.1. Le résidu R du diester utilisé doit être choisi de telle sorte que RO^- soit un bon nucléofuge. Est-ce le cas ici ? Pourquoi ?

B.II.2. En présence d'eau oxygénée, les diesters de l'acide oxalique conduisent à la formation d'un composé qui n'est pas isolé, la dioxétanedione E de formule :



Ecrire l'équation-bilan de cette transformation.

B.II.3. L'espèce E est formée dans un état excité, mais la couleur émise dépend de l'espèce F_i : F_1 donne une lumière verte, F_2 une lumière bleue et F_3 une lumière jaune.

B.II.3.1. Quel est le rôle de F_i ?

B.II.3.2. Plus la conjugaison dans une molécule organique est étendue, plus l'écart d'énergie entre les niveaux des orbitales HO et BV est faible.

Peut-on relier cette propriété aux couleurs émises en présence des différents F_i ?

FIN DE L'EPREUVE

8. Rapport relatif à la composition de chimie

Le sujet de la composition de chimie traitait de différents modes de conversion de l'énergie chimique. Après quelques questions portant sur des généralités et des définitions de thermochimie, la première partie propose deux applications, l'une analytique et l'autre application industrielle des transferts thermiques au sein d'un système chimique.

La deuxième partie porte sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. Elle propose l'étude à des fins analytiques d'une première pile électrochimique puis la description d'une pile à hydrogène.

La troisième partie envisage la conversion en énergie mécanique. Elle propose la synthèse d'un explosif et la description du coussin gonflable de sécurité automobile.

Enfin, la quatrième partie aborde le phénomène de chimiluminescence.

Ce sujet, mêlant chimie organique et chimie générale, aborde des domaines divers au travers de questions de difficulté variable qui ont toutes reçu au moins une bonne réponse sur l'ensemble des copies.

❖ Remarques générales

Comme les années précédentes, le jury note que beaucoup de candidats abordent presque exclusivement les questions les plus faciles, celles qui ne nécessitent pas une réflexion approfondie de leur part. Ils traitent ainsi le sujet de manière superficielle et cette stratégie de « pêche aux points », peu rentable, témoigne d'une connaissance et d'une compréhension insuffisantes de la chimie. Ce n'est pas ce qu'on attend de candidats à un concours de recrutement d'enseignants.

Des progrès restent à faire dans la rédaction des réponses. Certains candidats délaient leur rédaction et rendent des copies comportant un trop grand nombre de pages pour le contenu qui y figure. Dans les questions où il est demandé d'être descriptif, il est judicieux de réfléchir aux points essentiels avant de les formaliser par écrit.

Les questions de chimie organique sont traitées de manière satisfaisante. Si l'on rencontre encore beaucoup de flèches de déplacement d'électrons partant des charges au lieu des doublets, les mécanismes proposés sont en règle générale logiques et cohérents.

En revanche, le traitement des questions de thermodynamique est assez médiocre : pour beaucoup de candidats, thermodynamique et thermochimie sont deux domaines indépendants.

Enfin, pour les questions sur les solutions aqueuses, il est recommandé de réfléchir aux ordres de grandeur des différentes concentrations, ainsi qu'à la logique de la réaction prépondérante et de la conservation de matière. Il faut éviter de se lancer dans l'écriture de formules interminables et des calculs qui n'aboutissent pas, alors que les solutions ne prennent que quelques lignes.

Les meilleures copies révèlent de solides connaissances en chimie et une bonne capacité d'analyse des phénomènes étudiés. Mais le jury regrette globalement un manque de rigueur, tant dans la présentation et l'orthographe que dans le raisonnement ou la lecture de l'énoncé et une approche trop superficielle dans le traitement de nombreuses questions. La chimie ne se résume pas à un catalogue de connaissances : les lois physiques fondamentales régissent les phénomènes chimiques et permettent de décrire les interactions entre entités (des particules élémentaires aux entités moléculaires).

❖ Remarques concernant la première partie du sujet

Il est vrai que la thermodynamique exige de la rigueur, tant dans les notations que dans l'établissement de bilans d'échanges énergétiques. Ces derniers nécessitent le respect de conventions algébriques alors que trop souvent les problèmes de signes sont traités avec la plus grande désinvolture (A.II.2. et B.I.2.).

La présentation d'une méthode de détermination de la capacité thermique du calorimètre est rarement complète et rigoureuse.

La justification des valeurs des températures T_1 et T_2 pour la détermination de l'enthalpie de la réaction de décomposition de l'eau oxygénée est très rarement donnée. Il n'est pas suffisant d'affirmer qu'il s'agit de valeurs extrapolées. Cela traduit un manque de réflexion sur la question. Dans un tel cas, il est évidemment nécessaire de mentionner non seulement le caractère instantané de la réaction mais aussi les pertes thermiques inévitables du dispositif calorimétrique.

Les lois de déplacement d'équilibre sont connues et bien appliquées (B.II.2.). Mais l'établissement et l'exploitation d'un simple bilan de matière faisant apparaître le taux de dissociation semblent dérouter les candidats.

La majorité des candidats n'a pas établi de lien entre le caractère exothermique de la combustion du méthane et l'utilisation de cette réaction dans le réacteur autothermique qui fonctionne donc sans apport d'énergie supplémentaire pour le reformage secondaire. Ceci montre que trop peu de candidats utilisent le fil directeur d'un sujet et réfléchissent aux liens qui existent entre les différentes questions.

Les connaissances des structures cristallographiques sont bonnes mais le modèle des sphères dures et ses limites ne sont pas maîtrisés. Rappelons qu'un modèle n'est valable que si l'on en maîtrise à la fois les concepts, les limites et les champs d'application.

❖ Remarques concernant la deuxième partie du sujet

Très rares sont les candidats qui donnent l'expression des concentrations demandées en complexe et en ligand, alors qu'il suffit d'établir avec soin un tableau d'avancement. En conséquence, l'exploitation des mesures de forces électromotrices des piles de concentration (terme souvent inconnu) n'est quasiment jamais menée, les candidats se limitant à une comparaison des constantes de formation des complexes au lieu d'une comparaison rigoureuse des concentrations en ces deux complexes (A.II.5.).

La schématisation du fonctionnement de la pile à combustible est presque toujours fautive : des électrons ainsi que des sites d'adsorption semblent circuler dans l'électrolyte. Il est pourtant primordial, pour un futur professeur, de savoir donner à ses élèves une représentation schématique d'un dispositif, ce qui va de pair avec une réflexion approfondie.

Seuls quelques candidats ont su démontrer l'égalité entre le facteur de conversion de la pile et le rendement thermodynamique. Une telle absence de lien généralement constatée entre la thermodynamique de la réaction de fonctionnement de la pile et les échanges énergétiques qu'elle engendre semble traduire un cloisonnement intellectuel des connaissances.

Il convient de rappeler aux candidats qu'une lecture attentive du texte du sujet est nécessaire. Par exemple, il est facile d'obtenir la valeur de $\Delta_r G^\circ_1(353\text{ K})$ de la réaction $\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2 = \text{H}_2\text{O}$ et d'en déduire la valeur de la fem à la température $T = 353\text{ K}$. Nombreux sont les candidats qui, faisant appel à leurs souvenirs, donnent simplement la valeur standard à 298 K soit 1,23 V.

L'étude de la membrane polymère amène à considérer une polymérisation radicalaire, qui se déroule en trois phases : amorçage, propagation et terminaison. Ces différentes étapes sont rarement

mentionnées toutes les trois. L'étude de la polymérisation anionique est proposée sur l'époxypropane, et non sur son équivalent fluoré dont la réactivité est différente. Là encore, de nombreux candidats se sont limités à une lecture trop superficielle ou trop rapide de l'énoncé.

Construction et remplissage des diagrammes d'orbitales moléculaires obéissent à des règles générales simples qui sont souvent mal énoncées ou ne le sont pas du tout.

Le diagramme binaire isotherme d'un mélange idéal est un fuseau délimité par une courbe d'ébullition linéaire. Le diagramme isobare pour ce même mélange présente lui un fuseau très fin. L'absence d'azéotrope ne saurait justifier le caractère quasi idéal du mélange. Quelques candidats manquent de rigueur dans l'application du théorème des moments inverses (masses et non pas nombres de moles) et beaucoup n'ont pas reconnu ce théorème dans l'expression à démontrer au B.IV.2.1.e. La lecture du diagramme est, quant à elle, globalement bien maîtrisée.

❖ Remarques concernant la troisième partie du sujet

Dans l'ensemble, la chimie organique est correctement traitée si l'on excepte le mécanisme de nitration d'un alcool. Seuls quelques rares candidats savent en effet analyser la réactivité électrophile de l'ion nitronium et la nucléophilie de l'alcool pour travailler par analogie avec la nitration des aromatiques.

La dismutation est une notion mal définie et mal comprise (en A comme en B).

Le formalisme de Lewis pour l'écriture des structures n'est pas maîtrisé. En particulier, les formes cycliques proposées pour l'ion azoture demanderaient énormément de torsion. Elles ne sont donc pas correctes.

La discussion demandée sur l'ionicité des azotures n'est que très rarement menée. Les modélisations des différents types de liaisons chimiques sont mal connues.

L'élucidation correcte et complète des rôles des entités intervenant dans la réaction de formation de l'azoture de sodium n'est quasiment jamais menée. Il s'agit pourtant d'une démarche de réflexion et d'analyse qu'un futur enseignant devrait savoir conduire.

❖ Remarques concernant la quatrième partie du sujet

Comme indiqué en préambule, cette partie ne nécessite aucune connaissance sur la photochimie organique. Il s'agit là d'amener les candidats, futurs enseignants, à une analyse des informations expérimentales fournies. Ceux qui ont sérieusement abordé cette partie l'ont souvent réussie. Une réflexion insuffisante a conduit les autres à commettre des erreurs de compréhension ou d'analyse : confusion émission/absorption, mauvaise analyse des rôles des espèces mises en jeu, ...

❖ Conclusion

Ce sujet a permis de bien classer les candidats. Le présent rapport souligne les faiblesses relevées lors de la correction. Le jury tient néanmoins à féliciter les nombreux candidats dont les notes honorables récompensent un travail sérieux et approfondi en chimie.

SESSION DE 2006**concours externe
de recrutement de professeurs agrégés****section : sciences physiques****option : physique**

problème de physique

Durée : 6 heures

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

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

Détection d'une erreur éventuelle par le candidat

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

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

Tournez la page S.V.P.

Condensation de Bose-Einstein dans un piège harmonique

Ce problème porte sur la condensation de Bose-Einstein de gaz atomiques. Dans l'énoncé, l'abréviation C.B.E. sera utilisée pour évoquer cette condensation. Les premiers résultats théoriques concernant la C.B.E. ont été obtenus par Einstein au début du vingtième siècle sur un gaz parfait d'atomes dans une boîte. La C.B.E. en milieu dilué a été observée expérimentalement par une équipe américaine en 1995 dans un gaz d'atomes de rubidium piégés. Cette équipe a reçu le prix Nobel de Physique en 2001 pour ces résultats expérimentaux spectaculaires.

Ce problème comporte deux parties très largement indépendantes.

La première partie traite du refroidissement d'atomes neutres par laser et de leur piégeage dans un champ magnétique inhomogène. Les résultats sont obtenus à l'aide d'un formalisme classique, sans faire appel à la mécanique quantique. A la fin de cette partie, le piégeage des atomes par un champ magnétique peut être traité de manière indépendante du reste du problème.

Dans la seconde partie, les aspects thermodynamiques de la C.B.E. sont abordés pour un gaz d'atomes piégés dans un piège magnétique harmonique isotrope. Quelques propriétés des condensats de Bose sont étudiées à la fin de cette partie.

Un feuillet séparé de l'énoncé, à rendre avec les copies, est destiné au graphe demandé à la question 2.1.7 de la seconde partie du problème.

Valeurs numériques de constantes fondamentales :

- Permittivité diélectrique du vide $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
- Vitesse de la lumière dans le vide $c = 2,99 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- Constante de Planck $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
- Constante de Boltzmann $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
- Valeur absolue du magnéton de Bohr $\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ J.T}^{-1}$
- Masse de l'électron $m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- Charge de l'électron $q = -1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Valeurs numériques associées au rubidium : dans ce problème, sauf indication contraire, les applications numériques seront effectuées en utilisant les valeurs suivantes, associées aux atomes de rubidium :

- Masse d'un atome de rubidium $M = 1,42 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$
- Longueur d'onde des lasers utilisés pour refroidir les atomes $\lambda = 780 \text{ nm}$
- Largeur radiative $\Gamma/2\pi \simeq 6 \text{ MHz}$
- Intensité de saturation pour la transition utilisée $I_{\text{sat}} = 1,6 \text{ mW.cm}^{-2}$

Formulaire :

Opérateurs :

- En coordonnées cylindriques (ρ, ϕ, z) :

$$\operatorname{div}(\mathbf{A}) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho A_\rho)}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{A} = \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho A_z)}{\partial \phi} - \frac{\partial A_\phi}{\partial z} \right) \mathbf{e}_\rho + \left(\frac{\partial A_\rho}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \right) \mathbf{e}_\phi + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\rho \partial A_\phi}{\partial \rho} - \frac{\partial A_\rho}{\partial \phi} \right) \mathbf{e}_z.$$

- En coordonnées sphériques (r, θ, ϕ) :

$$\operatorname{grad} A = \frac{\partial A}{\partial r} \mathbf{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial \theta} \mathbf{e}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial A}{\partial \phi} \mathbf{e}_\phi$$

$$\operatorname{div}(\mathbf{A}) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 A_r)}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial(A_\theta \sin \theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial A_\phi}{\partial \phi}$$

- $\operatorname{div}(a \mathbf{V}) = a \operatorname{div}(\mathbf{V}) + \mathbf{V} \cdot \operatorname{grad}(a)$
- $\operatorname{rot}(a \mathbf{V}) = \operatorname{grad}(a) \wedge \mathbf{V} + a \operatorname{rot}(\mathbf{V})$

Fonctions de Bose

- Les fonctions de Bose sont notées $g_\alpha(z)$ ($\alpha > 1$). Elles sont définies sur l'intervalle $[0, 1]$, sur lequel elles sont *croissantes*, par :

$$g_\alpha(z) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{z^k}{k^\alpha}.$$

Elles ont les propriétés suivantes :

- $g_\alpha(z) \sim z$ pour $z \ll 1$
- $z \frac{d(g_\alpha(z))}{dz} = g_{\alpha-1}(z)$; ($\alpha > 1$)
- $g_2(1) = 1,64$, $g_3(1) = 1,20$, $g_4(1) = 1,08$

Intégrales utiles :

$$\int_0^\infty u e^{-u} du = 1, \quad \int_0^\infty u^2 e^{-u} du = 2$$

$$\int_{-\infty}^\infty u^2 \exp(-au^2) du = -\frac{d}{da} \left(\int_{-\infty}^\infty \exp(-au^2) du \right) = -\frac{d}{da} \left(\sqrt{\frac{\pi}{a}} \right)$$

Développements en séries entières :

$$\frac{1}{1-x} = \sum_{k=0}^{\infty} x^k, \quad \ln(1-x) = -\sum_{k=1}^{\infty} \frac{x^k}{k}$$

Une relation utile :

$$\sum_{k=1}^n k = \frac{n(n+1)}{2}$$

Première partie

Ralentissement, refroidissement et piégeage d'atomes neutres

1 Forces radiatives

On considère un atome de masse M , immobile en $\mathbf{R} = \mathbf{0}$, origine d'un repère $Oxyz$ matérialisant un référentiel supposé galiléen. Cet atome interagit avec un champ laser associé à un champ électrique $\mathbf{E}$, de pulsation ω et polarisé rectilignement suivant le vecteur $\mathbf{e}_x$:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = E(\mathbf{r}, t) \mathbf{e}_x.$$

L'atome est supposé équivalent à un dipôle électrique induit, oscillant à la pulsation ω du champ, et de moment dipolaire :

$$\mathbf{p} = q \mathbf{r},$$

parallèle à $\mathbf{e}_x$, la charge q en $\mathbf{r}$ oscillant autour de la charge $-q$ placée en $\mathbf{R}$. Dans toute la suite, on supposera que $\|\mathbf{r}\| \ll \lambda = 2\pi c/\omega$, et on notera :

$$\mathbf{p}(\mathbf{r}, t) = p(\mathbf{r}, t) \mathbf{e}_x.$$

La moyenne temporelle d'une grandeur périodique A de période T est définie par :

$$\langle A(\mathbf{r}) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T A(\mathbf{r}, t) dt.$$

1.1 Expression de la force moyenne s'appliquant sur l'atome

1. Force électrique :

- (a) Donner l'expression des forces électriques $\mathbf{F}_q$ et $\mathbf{F}_{-q}$ exercées par $\mathbf{E}$ sur les charges q et $-q$ en fonction de q , $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ et $\mathbf{E}(\mathbf{0}, t)$.
- (b) En effectuant un développement limité au voisinage de $\mathbf{R} = \mathbf{0}$, montrer que la force électrique qui s'applique sur l'atome est donnée par :

$$\mathbf{F}_{\text{el}}(\mathbf{R}, t) = (\mathbf{p} \cdot \text{grad})_{\mathbf{r}=\mathbf{R}} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t).$$

2. Force magnétique :

- (a) Montrer qu'à l'ordre le plus bas en $\|\mathbf{r}\|/\lambda$, la force magnétique qui s'exerce sur l'atome s'écrit :

$$\mathbf{F}_{\text{m}}(\mathbf{R}, t) = \frac{d\mathbf{p}}{dt} \wedge \mathbf{B}(\mathbf{R}, t).$$

- (b) En déduire l'expression suivante :

$$\mathbf{F}_{\text{m}}(\mathbf{R}, t) = \frac{d}{dt} (\mathbf{p} \wedge \mathbf{B}(\mathbf{R}, t)) + (\mathbf{p} \wedge \text{rot} \mathbf{E})_{\mathbf{r}=\mathbf{R}},$$

et montrer que la force magnétique peut également s'écrire, en remarquant que le champ $\mathbf{E}$ est porté par $\mathbf{e}_x$:

$$\mathbf{F}_{\text{m}}(\mathbf{R}, t) = \frac{d}{dt} (\mathbf{p} \wedge \mathbf{B}(\mathbf{R}, t)) - (\mathbf{p} \cdot \text{grad})_{\mathbf{r}=\mathbf{R}} \mathbf{E} + (p \text{ grad} E)_{\mathbf{r}=\mathbf{R}}.$$

3. En déduire l'expression de la force totale moyenne $\mathcal{F} = \langle \mathbf{F}_{\text{el}} + \mathbf{F}_{\text{m}} \rangle$ qui s'exerce sur l'atome :

$$\mathcal{F} = \mathcal{F}(\mathbf{R}) = \langle (p \text{ grad} E)_{\mathbf{r}=\mathbf{R}} \rangle.$$

1.2 Force dipolaire, force de pression de radiation

On suppose le champ électrique $\mathbf{E}$ en $\mathbf{r}$ de la forme :

$$\mathbf{E} = E_0(\mathbf{r}) \mathbf{e}_x \cos[\omega t + \Phi(\mathbf{r})].$$

Il est associé au champ complexe $\mathcal{E}$ (c'est-à-dire que $\mathbf{E} = \mathcal{R}e(\mathcal{E})$) :

$$\mathcal{E} = E_0(\mathbf{r}) \mathbf{e}_x e^{i[\omega t + \Phi(\mathbf{r})]}.$$

De la même façon, on associe au dipôle $\mathbf{p}$ un dipôle complexe $\mathcal{P}$ (c'est-à-dire que $\mathbf{p} = \mathcal{R}e(\mathcal{P})$). On définit la polarisabilité complexe de l'atome $\alpha = \alpha' - i\alpha''$ par la relation :

$$\mathcal{P} = \epsilon_0 \alpha \mathcal{E}.$$

1. *Décomposition de la force moyenne* : montrer que la force moyenne $\mathcal{F}$ qui s'exerce sur l'atome se décompose en deux forces :

$$\mathcal{F} = \mathcal{F}_1 + \mathcal{F}_2, \quad \text{avec} \quad \mathcal{F}_1 = -\frac{\epsilon_0 \alpha''}{2} E_0^2 \mathbf{grad} \Phi \quad \text{et} \quad \mathcal{F}_2 = \frac{\epsilon_0 \alpha'}{2} E_0 \mathbf{grad} E_0.$$

2. *Expression de la polarisabilité* : le modèle de l'électron élastiquement lié permet d'estimer la polarisabilité α et donc de donner une expression complète des forces radiatives. Dans ce modèle, l'électron est lié à l'atome par une force de rappel de constante de raideur $k = m\omega_0^2$, où m est la masse de l'électron. Il subit une force de frottement de type fluide :

$$-m\Gamma \frac{d\mathbf{r}}{dt}, \quad (0 < \Gamma \ll \omega_0).$$

Le coefficient, Γ , appelé largeur radiative, est homogène à une fréquence. L'électron est de plus soumis au champ électrique $\mathbf{E}$ associé au champ laser, et on appelle désaccord δ la différence entre la pulsation du laser et la pulsation propre de l'oscillateur :

$$\delta = \omega - \omega_0.$$

Dans toute la suite, on se place au voisinage de la résonance, c'est-à-dire dans une situation pour laquelle $|\delta| \ll \omega_0$.

- (a) Donner l'équation différentielle du second ordre vérifiée par le dipôle atomique $\mathcal{P}$ soumis au champ $\mathcal{E}$.
- (b) En déduire que, dans ce modèle et sous l'hypothèse $|\delta| \ll \omega_0$, la polarisabilité est donnée par :

$$\alpha = -\frac{\alpha_0}{2} \frac{\omega_0 \delta}{\delta^2 + \Gamma^2/4} - i \frac{\alpha_0}{2} \frac{\omega_0 \Gamma/2}{\delta^2 + \Gamma^2/4} = \alpha' - i\alpha'' \quad \text{avec} \quad \alpha_0 = \frac{q^2}{m\epsilon_0\omega_0^2}.$$

- (c) Donner la valeur numérique, la dimension et une interprétation physique de α_0 . On donne $\lambda_0 = 780 \text{ nm}$ pour la transition concernée, les valeurs numériques des constantes fondamentales sont données en préambule à l'énoncé.
 - (d) Pourquoi ce modèle est-il adapté à l'étude des atomes alcalins (sodium, potassium, rubidium, césium,...) qui sont souvent utilisés dans les expériences de refroidissement laser ? Par ailleurs, pourquoi ces atomes ont-ils été choisis pour mener ces expériences ?
3. *Atome immobile dans une onde plane* : on suppose que l'atome est plongé dans une onde électromagnétique plane de vecteur d'onde $\mathbf{k}$, c'est-à-dire que le champ $\mathbf{E}$ est donné par $\mathbf{E} = E_0 \mathbf{e}_x \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$.

- (a) Montrer que la force $\mathcal{F}$ se résume à la force $\mathcal{F}_1$, et donner son expression en fonction de α'' , ϵ_0 , $\mathbf{k}$ et E_0 .
- (b) *Interprétation corpusculaire de la force :*
- i. Etablir les expressions suivantes pour la puissance moyenne P reçue par le dipôle à l'ordre le plus bas en $||\mathbf{r}||/\lambda$:

$$P = \left\langle \frac{d\mathbf{p}}{dt} \cdot \mathbf{E}(\mathbf{R}, t) \right\rangle = \alpha'' \frac{\epsilon_0 \omega E_0^2}{2}.$$

- ii. En supposant que cette puissance moyenne correspond à un nombre N_p de photons laser absorbés par unité de temps, donner l'expression de N_p .
 - iii. En déduire l'expression de $\mathcal{F}$ en fonction de N_p et $\hbar\mathbf{k}$.
 - iv. Pour interpréter l'expression précédente, on considère que chaque photon du champ laser absorbé par l'atome est ré-émis de manière spontanée. Cette émission spontanée est équiprobable dans deux directions opposées. A partir de ces indications et à l'aide d'un bilan de quantité de mouvement entre atome et photons, montrer que l'on retrouve l'expression précédente de $\mathcal{F}$ pour la force exercée par une onde plane sur l'atome.
- (c) *Expression de la force en fonction des données expérimentales :*
- i. Donner l'expression de l'intensité I du laser modélisé par une onde plane en fonction de E_0 , ϵ_0 et c , célérité de la lumière dans le vide.
 - ii. Montrer que la force $\mathcal{F}$ qui s'exerce sur un atome s'écrit :

$$\mathcal{F} = \hbar\mathbf{k} \frac{\Gamma}{2} \frac{I}{I_{\text{sat}}} \frac{\Gamma^2/4}{\delta^2 + \Gamma^2/4} \quad \text{avec} \quad I_{\text{sat}} = \frac{\Gamma^2 \hbar c}{2\alpha_0 \omega_0}. \quad (1)$$

La grandeur I_{sat} , homogène à une intensité, est appelée intensité à saturation de la transition atomique considérée.

- iii. Donner une interprétation physique au temps τ défini par :

$$\frac{||\mathcal{F}||}{\hbar k} = \frac{1}{\tau}.$$

- iv. Proposer une interprétation physique au coefficient Γ , en se plaçant par exemple à résonance ($\delta = 0$) et à $I = I_{\text{sat}}$ (transition atomique saturée). On pourra considérer que l'atome, lorsqu'il absorbe un photon, passe d'un état interne fondamental f à un état excité e , et relier Γ à une caractéristique physique de l'état e .
 - v. Comparer $||\mathcal{F}||$ à l'action de la pesanteur sur un atome de rubidium, en se plaçant à nouveau à résonance ($\delta = 0$) et à $I = I_{\text{sat}}$. On donne pour le rubidium $M = 1,42 \cdot 10^{-25}$ kg, $\Gamma/2\pi = 6$ MHz, $\lambda = 780$ nm.
- (d) Pourquoi nomme-t-on cette force "pression de radiation" ? Connaissez-vous un phénomène naturel où les effets de cette force sont visibles ?

2 Ralentissement et refroidissement d'atomes par laser

2.1 Ralentissement des atomes

Dans cette partie, on souhaite agir sur un jet d'atomes de rubidium en utilisant un faisceau laser opposé au jet. On supposera que les atomes sont soumis au champ électrique $\mathbf{E} = E_0 \mathbf{e}_x \cos(\omega t + kz)$ associé au champ laser.

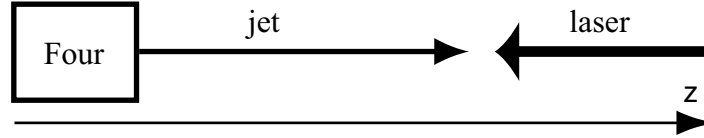


FIG. 1 – Jet atomique ralenti par laser

1. Donner l'ordre de grandeur de la vitesse v_T des atomes de rubidium sortant du four, si la température à l'intérieur est de l'ordre de 100°C . On rappelle la valeur de la masse d'un atome de rubidium $M = 1,42 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$.
2. Ces atomes se déplaçant, la pulsation ω du laser leur apparaît décalée.
 - (a) Comment nomme-t-on l'effet associé à ce décalage ? Citer quelques exemples simples où ce phénomène est perceptible.
 - (b) Si la vitesse des atomes dans le référentiel du laboratoire est $\mathbf{v} = v\mathbf{e}_z$, quelle doit être la pulsation ω du laser dans ce référentiel pour que les atomes, de pulsation propre ω_0 , soient à résonance avec le laser ?
 - (c) En déduire le signe du désaccord δ pour rester à résonance. Comparer $|\delta|$ et ω_0 pour le rubidium. Conclusion ?
3. Exprimer la force $\mathcal{F}$ s'exerçant sur un atome en mouvement à vitesse v à partir de l'équation (1) en tenant compte de l'effet précédent.
4. Représenter sommairement la norme de $\mathcal{F}$ en fonction de la vitesse atomique v pour une interaction résonnante avec des atomes de vitesse u . Quelle est la largeur caractéristique de cette courbe pour les atomes de rubidium étudiés ? Evaluer cette largeur pour la longueur d'onde $\lambda = 780 \text{ nm}$.
5. Si le laser est accordé pour des atomes sortant du four avec la vitesse u , que va-t-il se passer ?
6. Pour remédier à ce problème, on peut utiliser l'effet Zeeman. Proposer une configuration utilisant par exemple un solénoïde placé à la sortie du four pour ralentir les atomes en gardant la fréquence du laser fixe.
7. Déterminer la distance minimale nécessaire à stopper un jet atomique en supposant que le maintien à résonance est ainsi assuré est que l'intensité du laser est $I = I_{\text{sat}} = 1,6 \text{ mW.cm}^{-2}$. La décélération maximale à résonance sera notée γ_{max} , on rappelle que $\Gamma/2\pi = 6 \text{ MHz}$ et que $\lambda = 780 \text{ nm}$.

2.2 Refroidissement des atomes

Nous venons de voir qu'il est possible de ralentir un jet d'atomes grâce à un faisceau laser, c'est-à-dire de diminuer la vitesse moyenne des atomes du jet. En revanche, pour refroidir une assemblée d'atomes, il faut diminuer la largeur de la fonction de répartition statistique des vitesses autour de cette valeur moyenne.

1. Superposer sur un même graphe la statistique de distribution de la composante suivant Oz de la vitesse, d'une part à la sortie du four, d'autre part après la combinaison des processus de ralentissement et de refroidissement.
2. Refroidissement unidimensionnel : on éclaire les atomes avec deux faisceaux lasers de même intensité I et de même pulsation ω , accordés en-dessous de la pulsation atomique ($\delta < 0$). Ils se propagent en sens opposés, suivant l'axe Oz , et leur vecteur d'onde dans le référentiel du laboratoire sont respectivement $\mathbf{k}_1 = k_1\mathbf{e}_z$ et $\mathbf{k}_2$, avec $\mathbf{k}_2 = -\mathbf{k}_1$ (figure (2)). Dans cette partie, on ne tient pas compte des effets d'interférence entre les deux

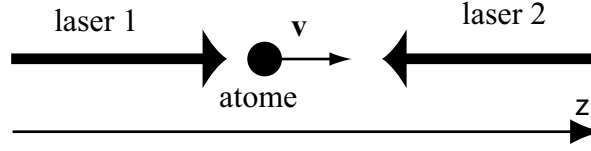


FIG. 2 – Refroidissement unidimensionnel

ondes. On admet que les effets des deux ondes planes sur un atome *en mouvement* se superposent, et donc que les pressions de radiation associées aux deux ondes s'ajoutent. Cette assertion se justifie par un calcul que nous n'effectuerons pas.

- En supposant que $|\delta| \ll \omega$, donner les expressions des forces $\mathcal{F}_1$ et $\mathcal{F}_2$ associées à l'action des lasers (1) et (2) sur un atome de vitesse $\mathbf{v} = v\mathbf{e}_z$.
- En supposant que la force $\mathcal{F}$ qui s'exerce sur l'atome est la somme des forces précédentes, tracer la composante $\mathcal{F}_z$ de $\mathcal{F}$ suivant $\mathbf{e}_z$ en fonction de la vitesse atomique v .
- Quelle est la largeur Δv_{cap} de la plage dite “de capture” de vitesse ? Expliquer cette dénomination.
- Décrire qualitativement l'évolution de la vitesse d'un atome ayant une vitesse initiale v dans la plage de capture.
- A partir d'un développement limité de la force $\mathcal{F}$ au voisinage de $v = 0$, montrer que l'on peut écrire :

$$\frac{dv}{dt} = -\xi v \quad \text{avec} \quad \xi = -4\delta \frac{\hbar k^2}{M} \frac{\Gamma}{2 I_{\text{sat}}} \frac{\Gamma^2/4}{(\delta^2 + \Gamma^2/4)^2}.$$

- Quelle est, en fonction de δ , la plus grande constante d'amortissement des vitesses, notée ξ_{max} , obtenue avec un laser fonctionnant à intensité $I = I_{\text{sat}}$? On prendra $M = 1,42 \cdot 10^{-25}$ kg et $\lambda = 780$ nm.
 - Quelle est l'influence d'un changement de signe du désaccord δ ?
3. **Température minimale :** on souhaite trouver la température minimale d'équilibre d'un gaz d'atomes soumis à ce processus de refroidissement. On admet que cette température T_{equ} est définie à partir de la quantité de mouvement quadratique moyenne à l'équilibre :

$$\frac{\langle p^2 \rangle_{\text{equ}}}{2M} = \frac{k_B T_{\text{equ}}}{2},$$

où k_B est la constante de Boltzmann. L'équilibre résulte ici de la compétition entre le refroidissement étudié à la question précédente et la diffusion de la quantité de mouvement due, entre autres, à l'émission spontanée.

(a) *Refroidissement :*

- A partir des résultats précédents, montrer que :

$$\left(\frac{dp^2}{dt} \right)_{\text{refr}} = -2\xi p^2.$$

- Quelle serait la température obtenue si seul ce processus entraînait en compte ?

- Diffusion due à l'émission spontanée :* à chaque cycle d'absorption et d'émission spontanée de photons, la quantité de mouvement $\mathbf{p}$ de l'atome varie de manière aléatoire, conduisant à une “marche au hasard” dans l'espace des impulsions.

- i. Quelle est l'influence de la diffusion de la quantité de mouvement sur la répartition des vitesses ?
- ii. Quel est le pas Δp de la marche au hasard associée à l'émission spontanée dans l'espace des impulsions ?
- iii. Quelle est l'expression de la durée τ d'un pas (on prendra garde au fait que l'atome est éclairé par deux lasers d'intensité I) ? On pourra faire référence à la question 3(c)iii de la section 1.2.
- iv. On admet que sous l'effet de cette diffusion, à laquelle s'ajoute une diffusion liée aux fluctuations du nombre de photons dans les champs laser, la distribution statistique de p tend, à la limite d'un grand nombre d'événements, vers une distribution gaussienne :

$$\mathcal{P}(p, t > 0) = \mathcal{A} \exp \left(-\frac{p^2 \tau}{4\hbar^2 k^2 t} \right),$$

où $\mathcal{A}$ est une constante de normalisation. Montrer que :

$$\left(\frac{d \langle p^2 \rangle}{dt} \right)_{\text{diff}} = \frac{2\hbar^2 k^2}{\tau}.$$

- (c) En se plaçant à $I = I_{\text{sat}}$ pour les deux lasers, déduire des résultats précédents que la quantité de mouvement quadratique moyenne à l'équilibre est donnée par :

$$\langle p^2 \rangle_{\text{equ}} = -M \hbar \frac{\delta^2 + \Gamma^2/4}{2\delta}.$$

- (d) En déduire la température T_{equ} pour un gaz d'atomes à l'équilibre.
- (e) Pour quel désaccord δ_{min} cette température est-elle minimale ? Calculer numériquement cette température T_{min} pour le rubidium.
- (f) Quelle serait la température minimale atteinte pour un refroidissement tridimensionnel, obtenu grâce à trois paires de lasers disposées suivant les trois axes Ox , Oy et Oz ?
- (g) Les expériences réalisées sur le rubidium ont montré que la température minimale atteinte est de l'ordre de $2 \mu\text{K}$. Conclusion ?
- (h) Au terme de cette étude sur le ralentissement et le refroidissement des atomes, les grands principes de la Physique concernant l'énergie, la quantité de mouvement et l'entropie sont-ils satisfaits ?

3 Piégeage d'atomes neutres

3.1 Piégeage magnétique :

Le processus de piégeage est de nature magnétique sur un atome paramagnétique doté d'un moment dipolaire magnétique $\boldsymbol{\mu}$ interagissant avec un champ magnétostatique inhomogène.

1. Pourquoi les atomes alcalins sont-ils paramagnétiques ?
2. Quelle est l'énergie d'interaction W entre un atome porteur d'un moment dipolaire magnétique $\boldsymbol{\mu}$ et un champ magnétique $\mathbf{B}$?
3. Dans la situation expérimentale envisagée, l'atome se déplace suffisamment lentement pour que la vitesse de rotation du champ $\mathbf{B}$ dans son référentiel propre soit très inférieure à la fréquence de précession de Larmor autour du champ. Dans cette situation, le moment magnétique $\boldsymbol{\mu}$ reste constamment aligné avec $\mathbf{B}$ au cours de son mouvement.

- En considérant un moment magnétique respectivement parallèle puis antiparallèle au champ magnétique, établir les deux expressions possibles pour l'énergie potentielle d'interaction, notées respectivement W_- et W_+ en fonction de $\mu_B = \|\boldsymbol{\mu}\|$ et $B = \|\mathbf{B}\|$.
- Préciser la stabilité de ces deux configurations et indiquer quelle solution il serait préférable de choisir pour réaliser un piège à atomes. Dans quelle zone de l'espace aurait alors lieu le piégeage ?
- La théorème de Wing interdit l'existence d'un maximum local de la norme B d'un champ magnétostatique. Conclusion ?
- Si l'on souhaite piéger les atomes dans un champ magnétique inhomogène, quelle doit être la configuration relative du champ et du moment magnétique des atomes ? Quels problèmes cela peut-il poser ? Pourquoi le champ $\mathbf{B}$ ne doit-il pas s'annuler dans le piège ?

3.2 Piège de Ioffé-Pritchard.

Cette partie peut être traitée de manière indépendante

Le piège de Ioffé-Pritchard se compose de quatre fils verticaux, passant par les quatre sommets d'un carré dans le plan (xOy) et parcourus par des courants valant soit I soit $-I$ (figure (3)). Ces fils créent un champ magnétique noté $\mathbf{B}_f$. A ces fils, on ajoute deux bobines circulaires identiques parcourues par le même courant I' , centrées sur l'axe Oz , axe de symétrie des quatre fils. Ces deux bobines sont situées de part et d'autre du plan (xOy) , à la même distance de ce plan. Ces bobines créent un champ magnétique noté $\mathbf{B}_b$. Le centre du piège magnétique résultant de l'addition de $\mathbf{B}_f$ et $\mathbf{B}_b$ se situe au centre du repère $Oxyz$.

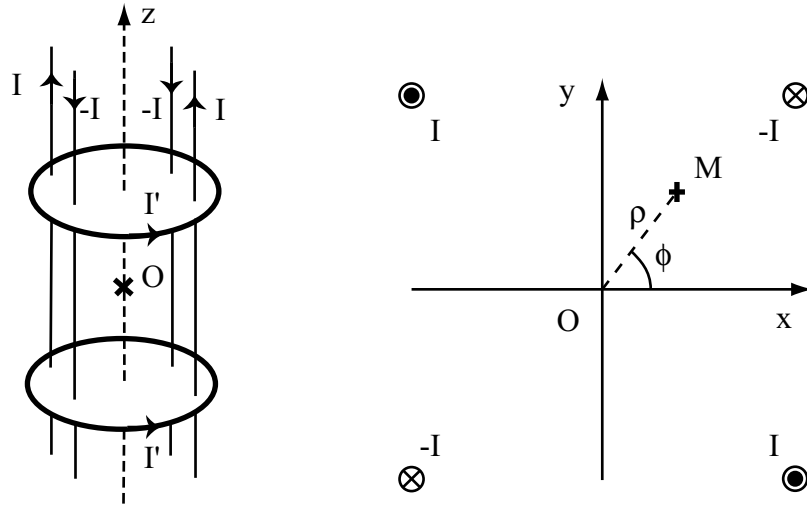


FIG. 3 – Piège de Ioffé-Pritchard

- Comment faut-il positionner les bobines par rapport à la configuration de Helmholtz pour obtenir un extremum local de B permettant de piéger les atomes en O ?
- Au voisinage de l'axe, les composantes du champ créé par les fils s'écrivent, en coordonnées cylindriques :

$$B_{f,\rho} = C_2 \rho \cos(2\phi), \quad B_{f,\phi} = -C_2 \rho \sin(2\phi), \quad B_{f,z} = 0.$$

Les composantes cylindriques du champ des bobines valent, quant à elles, au voisinage du centre :

$$B_{b,\rho} = -C_3 z \rho, \quad B_{b,\phi} = 0, \quad B_{b,z} = C_1 + C_3 \left(z^2 - \frac{\rho^2}{2} \right).$$

- (a) Vérifier que le champ magnétique total obéit aux équations de Maxwell.
- (b) Calculer $\mathbf{B}^2$ à l'ordre 2 en z et ρ .
- (c) Quel est le signe de C_1 si $I' > 0$?
- (d) De quel signe doit être C_3 pour assurer un confinement axial ?
- (e) Montrer que le confinement radial impose $C_2 > \sqrt{C_1 C_3}$.
- (f) Montrer que l'énergie magnétique W s'écrit, pour un atome piégé :

$$W = \mu_B \left[C_3 z^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{C_2^2}{C_1} - C_3 \right) \rho^2 \right]. \quad (2)$$

- (g) En déduire les expressions des pulsations ω_ρ et ω_z associées à ce potentiel harmonique en fonction des paramètres du problème pour des atomes de masse M .
- (h) Application numérique. On donne les valeurs suivantes pour les constantes du problème : $C_1 = 10^{-3}$ T, $C_2 = 4,9$ T.m⁻¹ et $C_3 = 121$ T.m⁻², et on rappelle que $M = 1,42 \cdot 10^{-25}$ kg pour le rubidium. En déduire les valeurs des fréquences $\omega_\rho/2\pi$ et $\omega_z/2\pi$.

Deuxième partie

Condensation de Bose-Einstein dans un piège harmonique

1 Condensation dans un potentiel tridimensionnel isotrope

Dans cette partie, la C.B.E. est abordée d'un point de vue thermodynamique en supposant que le nuage d'atomes constitue un gaz parfait. On néglige donc, dans cette partie, toute interaction entre les atomes. Les atomes considérés sont des *bosons* et on suppose qu'ils sont tous dans le même état quantique interne. Ils sont piégés dans un potentiel *harmonique tridimensionnel isotrope*, c'est-à-dire que la constante de raideur du potentiel est la même dans les trois directions de l'espace. Cette raideur est associée à une pulsation notée ω . Aux températures atteintes après une étape supplémentaire de refroidissement, appelée refroidissement évaporatif, les effets quantiques sont importants. Néanmoins, et c'est une hypothèse essentielle dans la suite du problème, la température T du gaz d'atomes vérifie en permanence :

$$k_B T \gg \hbar \omega,$$

où k_B est la constante de Boltzmann.

L'étude suivante est menée avec un nombre total d'atomes N fixe et la C.B.E. est atteinte en diminuant la température du gaz d'atomes. Bien que le gaz ne soit pas en contact avec un réservoir de particules, les calculs sont effectués dans le formalisme de l'ensemble grand canonique. Les résultats obtenus sont corrects à condition que le nombre d'atomes soit grand, ce qui sera supposé dans toute la suite du problème. Dans l'ensemble grand canonique, les bosons obéissent à la statistique de Bose-Einstein :

$$f(E) = \frac{1}{\exp[\beta(E - \mu)] - 1}, \quad (3)$$

où μ désigne le potentiel chimique et $\beta = 1/(k_B T)$. On introduit la fugacité Λ , définie par $\Lambda = \exp(\beta\mu)$. On recommande d'utiliser Λ plutôt que le potentiel μ chaque fois que cela est possible, en particulier lors du calcul de l'énergie interne.

1.1 Populations de l'état fondamental et des états excités

La résolution de l'équation de Schrödinger pour un potentiel harmonique isotrope caractérisé par une pulsation ω fournit les niveaux d'énergie suivants :

$$E(n_x, n_y, n_z) = (n_x + n_y + n_z)\hbar\omega,$$

où n_x , n_y et n_z sont des entiers naturels. Dans cette expression l'énergie du niveau fondamental a été choisie comme origine des énergies. On peut réécrire cette expression sous la forme :

$$E(n) = n\hbar\omega,$$

où n est un entier naturel, à condition de tenir compte de la dégénérescence $g(n)$ du n^{ieme} niveau.

1. Le niveau fondamental est-il dégénéré? Calculer sa population N_0 en fonction de Λ .

2. En déduire que le potentiel chimique μ est toujours négatif.
3. Montrer que la dégénérescence $g(n)$ du n^{ieme} niveau est donnée par :

$$g(n) = \frac{(n+1)(n+2)}{2}.$$

4. En déduire que la densité d'états ρ dans le piège harmonique tridimensionnel peut s'écrire sous la forme d'une fonction continue de l'énergie :

$$\rho(E) = \rho_1(E) + \rho_2(E) + \rho_3(E) \quad \text{avec} \quad \rho_1(E) = \frac{1}{\hbar\omega}, \quad \rho_2(E) = \frac{3}{2} \frac{E}{(\hbar\omega)^2} \quad \text{et} \quad \rho_3(E) = \frac{1}{2} \frac{E^2}{(\hbar\omega)^3}.$$

5. **Calcul de la population des états excités** : on admet que la population totale N_e des états excités est donnée par :

$$N_e = N_{1e} + N_{2e} + N_{3e} = \int_{\hbar\omega/2}^{\infty} \rho_1(E) f(E) dE + \int_0^{\infty} \rho_2(E) f(E) dE + \int_0^{\infty} \rho_3(E) f(E) dE,$$

la borne de la première intégrale devant être choisie égale à $\hbar\omega/2$ pour obtenir le nombre correct de niveaux. Dans les deux questions suivantes, on pourra utiliser les développements en séries entières rappelés dans le préambule de l'énoncé.

- (a) Montrer que la première intégrale conduit à :

$$N_{1e} = -\frac{k_B T}{\hbar\omega} \ln \left[1 - \Lambda \exp \left(-\frac{\hbar\omega}{2k_B T} \right) \right].$$

- (b) Calculer N_{2e} et N_{3e} , et en déduire l'expression de N_e .
- (c) On suppose dans la suite du problème que, quelque soit la température T , l'hypothèse fondamentale $k_B T \gg \hbar\omega$ est vérifiée. En déduire que la population totale des états excités peut s'écrire avec une bonne approximation sous la forme :

$$N_e = \left(\frac{k_B T}{\hbar\omega} \right)^3 g_3(\Lambda),$$

où g_3 est la fonction de Bose définie en préambule de l'énoncé.

1.2 Condensation.

A partir des calculs précédents, on écrit le nombre total d'atomes N sous la forme :

$$N = \frac{\Lambda}{1 - \Lambda} + \left(\frac{k_B T}{\hbar\omega} \right)^3 g_3(\Lambda). \quad (4)$$

Au-dessus de la température de condensation, la population N_e des états excités est très supérieure à celle de l'état fondamental, donnée par le premier terme de (4). On diminue alors progressivement la température T de l'assemblée d'atomes, et on convient que la C.B.E. se manifeste par un peuplement macroscopique de l'état fondamental en dessous d'une température critique notée T_c .

1. Montrer que, pour une température donnée T , le second terme de l'équation (4) est majoré, et donner l'expression du majorant de ce terme.
2. En déduire que lorsque la température tend vers T_c par valeur supérieure, la fugacité Λ tend vers 1. On rappelle que le nombre d'atomes N est fixe dans cette analyse.

3. En déduire que la température critique T_c vérifie l'équation suivante :

$$N = \left(\frac{k_B T_c}{\hbar \omega} \right)^3 g_3(1).$$

Cette relation définit le seuil de condensation.

4. Montrer que si l'on continue à abaisser la température, la population de l'état fondamental N_0 devient macroscopique.
5. Pour $T < T_c$, exprimer puis représenter N_0/N en fonction de T/T_c .
6. Applications numériques. En prenant $N = 10^6$ atomes et $\omega = 10^3 \text{ rad.s}^{-1}$:
 - (a) Calculer T_c .
 - (b) Evaluer le rapport $k_B T_c / \hbar \omega$ et conclure sur l'hypothèse fondamentale de ce modèle.
 - (c) Estimer le rapport N_1/N_0 lorsque $N_0 = N/2$, N_1 désignant la population totale du premier état excité. Quelle valeur aurait ce rapport si la distribution des populations sur les états d'énergie obéissait à la statistique de Boltzmann ? Conclure.
7. La limite thermodynamique consiste à passer d'un système de taille finie microscopique à un système macroscopique en conservant la densité de particules constante. Ici, on admettra que le passage à la limite thermodynamique consiste à faire tendre N vers l'infini et ω vers 0 en maintenant le produit $N\omega^3$ constant. La température critique T_c est-elle modifiée lorsque l'on passe à la limite thermodynamique ?

1.3 Energie interne totale :

Pour des bosons, on admet que la fonction de partition Z_G est donnée par :

$$Z_G = \prod_p \frac{1}{1 - \Lambda \exp(-\beta E_p)},$$

le produit portant sur l'ensemble des états microscopiques d'énergie E_p .

1. Montrer, en utilisant un développement en série, que :

$$\ln(Z_G) = -\ln(1 - \Lambda) + \left(\frac{k_B T}{\hbar \omega} \right)^3 g_4(\Lambda).$$

On pourra transformer la somme en intégrale, en prenant soin de séparer la contribution de l'état fondamental de celle des états excités. Dans l'expression de la densité d'états $\rho(E)$, on ne conservera que le terme dominant $\rho_3(E)$.

2. A condition de choisir comme variables thermodynamiques indépendantes Λ , β et N , l'énergie interne U est donnée par la relation :

$$U = - \left[\frac{\partial}{\partial \beta} (\ln(Z_G)) \right]_{N, \Lambda}.$$

Montrer que U vérifie :

$$U(T \leq T_c) = 3k_B T N \left(\frac{T}{T_c} \right)^3 \frac{g_4(1)}{g_3(1)} \quad \text{et} \quad U(T \geq T_c) = 3k_B T N \frac{g_4(\Lambda)}{g_3(\Lambda)}.$$

3. Déterminer U lorsque $T \gg T_c$. Interpréter le résultat à partir du théorème d'équipartition.

4. **Capacité thermique** : on définit la capacité thermique C du système par :

$$C = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_N.$$

Notez que la fugacité Λ n'est pas fixée dans cette expression et qu'elle dépend donc de la température T .

- (a) Calculer C pour $T > T_c$ et pour $T < T_c$.
- (b) Montrer que C subit une discontinuité à $T = T_c$ égale à $9Nk_B g_3(1)/g_2(1)$.
- (c) Quel est l'ordre de la transition d'état associée à la C.B.E. ?

2 Description et excitations du condensat

La C.B.E. s'accompagnant d'un confinement spatial des atomes, les interactions entre les N particules ne sont plus négligeables. Dans cette partie, ces interactions sont prises en compte par un modèle de champ moyen, et l'équation de Schrödinger appliquée au condensat conduit à l'équation de Gross-Pitaevskii. Sauf notification de l'énoncé, les atomes sont confinés dans un piège harmonique tridimensionnel isotrope caractérisé par une pulsation ω . On note $\phi(\mathbf{r}, t)$ la fonction d'onde du condensat et on adopte la condition de normalisation :

$$\int_{\text{condensat}} |\phi(\mathbf{r}, t)|^2 d\mathbf{r} = N.$$

Dans le cadre de cette normalisation, $|\phi(\mathbf{r}, t)|^2$ est la densité d'atomes $n(\mathbf{r}, t)$ dans le condensat.

2.1 Equation de Gross-Pitaevskii stationnaire, limite de Thomas-Fermi

Dans le cas d'un problème indépendant du temps, on admet que la fonction d'onde $\phi(\mathbf{r}, t)$ obéit à l'équation de Gross-Pitaevskii stationnaire :

$$-\frac{\hbar^2}{2M} \Delta \phi(\mathbf{r}) + V_{\text{ext}} \phi(\mathbf{r}) + G |\phi(\mathbf{r})|^2 \phi(\mathbf{r}) = \mu \phi(\mathbf{r}). \quad (5)$$

Le potentiel V_{ext} est le potentiel de piégeage, M la masse d'un atome, G une constante de couplage positive, et μ désigne le potentiel chimique. On se place à la limite de Thomas-Fermi, qui consiste à négliger le terme d'énergie cinétique devant celui modélisant les interactions dans l'équation (5).

1. Expliciter le potentiel V_{ext} en fonction de M et ω .
2. Dans l'approximation de Thomas-Fermi, calculer $\phi(\mathbf{r})$.
3. Calculer et représenter la densité $n(\mathbf{r})$ dans la condensat. Définir le rayon r_0 du condensat.
4. Calculer le potentiel chimique μ du condensat à partir de la condition de normalisation (μ est positif dans cette partie).
5. En déduire l'expression de l'énergie E du condensat.
6. La figure 4 représente la densité atomique mesurée dans un condensat en fonction de l'altitude z . Dans cette expérience, la pulsation suivant z était $\omega/2\pi = 20$ Hz, et le condensat contenait environ $N = 80\,000$ atomes.
 - (a) On a également porté sur ce graphe un ajustement des points expérimentaux par une parabole inversée. Le résultat vous semble-t-il conforme à celui attendu ? En traits pointillés, on a porté le profil de densité de l'état fondamental d'un condensat dans un piège harmonique *en négligeant les interactions*. Commentaire ?

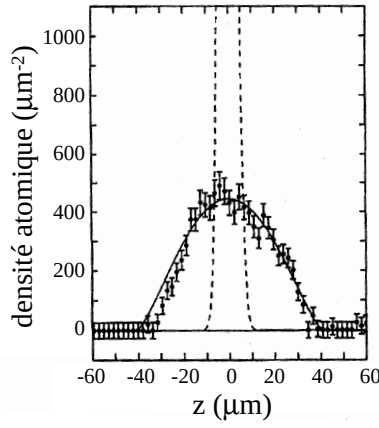


FIG. 4 – Densité atomique dans un condensat contenant 80 000 atomes de sodium en fonction de l'altitude z (points noirs avec barres d'erreur). En trait plein, ajustement par une parabole inversée. En traits pointillés, profil de densité de l'état fondamental d'un condensat dans un piège harmonique sans interactions.

- (b) Déduire du graphe le rayon r_0 du condensat.
 - (c) En déduire la valeur du potentiel chimique μ du condensat. Les atomes étaient des atomes de sodium, dont la masse est $M = 3,91 \cdot 10^{-26}$ kg.
 - (d) Déterminer la valeur de l'énergie E du condensat.
7. A partir de graphes similaires obtenus pour des condensats contenant un nombre croissant d'atomes, les résultats suivants ont été obtenus pour l'énergie par atome E/N :

$N/10^6$	0,08	0,1	0,3	1,1	1,3	1,6	2,3	3,2	4,1
$E/(N k_B)(nK)$	26	30	52	85	92	100	118	130	140

Vérifier à partir de ces données la dépendance de l'énergie E/N vis-à-vis du nombre d'atomes N dans le condensat. On pourra par exemple construire un graphe sur le feuillet annexe de l'énoncé, à rendre avec la copie.

2.2 Equation de Gross-Pitaevskii dépendant du temps

On étend l'équation (5) aux problèmes dépendant du temps grâce à l'équation suivante, appelée équation de Gross-Pitaevskii dépendant du temps :

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \phi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2M} \Delta \phi(\mathbf{r}, t) + V_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t) \phi(\mathbf{r}, t) + G |\phi(\mathbf{r}, t)|^2 \phi(\mathbf{r}, t). \quad (6)$$

On suppose que $V_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t)$ peut se décomposer en deux termes, l'un statique et l'autre dynamique apparaissant comme une perturbation du potentiel statique :

$$V_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t) = V_0(\mathbf{r}) + \delta V(\mathbf{r}, t).$$

1. On désigne par $\phi_0(\mathbf{r})$ la solution de l'équation (6) dont le terme d'énergie potentielle extérieure se limite à $V_0(\mathbf{r})$. On cherche une solution de l'équation (6) sous forme d'un produit d'une fonction des variables d'espace et d'une fonction du temps. Montrer qu'alors :

$$\phi(\mathbf{r}, t) = \phi_0(\mathbf{r}) \exp \left(-i \frac{\mu t}{\hbar} \right).$$

2. **linéarisation** : si la perturbation $|\delta V|$ vérifie $|\delta V(\mathbf{r}, t)| \ll |V_0(\mathbf{r})|$, on suppose que la solution du problème “perturbé” s’écrit :

$$\phi(\mathbf{r}, t) = \tilde{\phi}(\mathbf{r}, t) \exp\left(-i\frac{\mu t}{\hbar}\right) \quad \text{avec} \quad \tilde{\phi}(\mathbf{r}, t) = \phi_0(\mathbf{r}) + \delta\phi(\mathbf{r}, t).$$

Montrer que le vecteur $(\delta\phi, \delta\phi^*)$ vérifie l’équation linéaire suivante :

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \delta\phi \\ \delta\phi^* \end{pmatrix} = \mathcal{L} \begin{pmatrix} \delta\phi \\ \delta\phi^* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} S \\ -S^* \end{pmatrix}.$$

L’étoile désigne dans les équations précédentes le complexe conjugué, $\mathcal{L}$ est une matrice (2×2) indépendante du temps :

$$\mathcal{L} = \begin{pmatrix} H_0 - \mu + 2G|\phi_0(\mathbf{r})|^2 & G\phi_0^2(\mathbf{r}) \\ -G\phi_0^{*2}(\mathbf{r}) & -(H_0 - \mu + 2G|\phi_0(\mathbf{r})|^2) \end{pmatrix}, \quad H_0 = -\frac{\hbar^2}{2M}\Delta(\cdot) + V_0(\mathbf{r})$$

et $S = \delta V(\mathbf{r}, t)\phi_0(\mathbf{r})$ un terme source.

3. **Excitations élémentaires** : le potentiel perturbateur δV est appliqué pendant une phase d’excitation de durée finie, puis on le coupe brutalement et on laisse le condensat évoluer. Pour simplifier le problème, et dans cette question seulement, on suppose le condensat homogène (de densité n_0 constante) dans une boîte cubique de côté L . La fonction d’onde décrivant le condensat est alors $\phi_0(\mathbf{r}) = \sqrt{N/L^3}$ et le potentiel chimique est donné par : $\mu = n_0 G$. On cherche une solution du système obtenu dans la question précédente de la forme :

$$\delta\phi = u \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)],$$

u étant un nombre complexe.

- (a) Montrer que l’on obtient la relation de dispersion suivante pour les excitations élémentaires :

$$\omega(k) = \frac{1}{\hbar} \sqrt{\frac{\hbar^2 k^2}{2M} \left(\frac{\hbar^2 k^2}{2M} + 2n_0 G \right)}.$$

- (b) Représenter $\omega(k)$ et discuter le résultat précédent en envisageant notamment deux limites. Préciser, en justifiant, la notion de “limite acoustique” attribuée à l’une d’elles, et en déduire la célérité c du son dans le condensat.

2.3 Analogies hydrodynamiques.

Dans cette partie, le condensat est à nouveau placé dans un piège harmonique isotrope, et on écrit la fonction d’onde du condensat sous la forme :

$$\phi(\mathbf{r}, t) = \sqrt{n(\mathbf{r}, t)} \exp(iS(\mathbf{r}, t)). \quad (7)$$

1. A partir de l’équation (6), montrer que :

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} n = -\frac{\hbar^2}{2M} [\phi^* \Delta \phi - \phi \Delta \phi^*].$$

2. En déduire l’équation suivante sur la densité n :

$$\frac{\partial}{\partial t} n + \operatorname{div} \left[n \left(\frac{\hbar}{M} \mathbf{grad} S \right) \right] = 0. \quad (8)$$

Par analogie avec une équation de conservation, proposer une expression pour le champ des vitesses $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ dans le condensat.

3. Etablir les équations suivantes :

$$2in \frac{\partial S}{\partial t} = \left(\phi^* \frac{\partial \phi}{\partial t} - \phi \frac{\partial \phi^*}{\partial t} \right) \quad \text{et} \quad \hbar \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\hbar^2}{2M} \frac{1}{\sqrt{n}} \Delta(\sqrt{n}) - \frac{\hbar^2}{2M} (\mathbf{grad}(S))^2 - V_{\text{ext}} - Gn.$$

En déduire que :

$$M \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \mathbf{grad} \left(-\frac{\hbar^2}{2M} \frac{1}{\sqrt{n}} \Delta(\sqrt{n}) - \frac{1}{2} M \mathbf{v}^2 - V_{\text{ext}} - Gn \right). \quad (9)$$

Quelle est l'analogie de l'équation (9) en hydrodynamique classique, si l'on oublie le terme dit de "pression quantique" $-\frac{\hbar^2}{2M} \frac{1}{\sqrt{n}} \Delta(\sqrt{n})$?

4. Dans le cas des faibles excitations, et en supposant que la densité n est peu modifiée, on propose de linéariser les équations (8) et (9) en supposant le terme de pression quantique négligeable. On introduit pour cela les corrections δn et $\delta \mathbf{v}$ aux valeurs d'équilibre n et $\mathbf{v}_0 = \mathbf{0}$.
 - (a) Simplifier le système d'équations couplées (8) et (9), et donner l'équation aux dérivées partielles vérifiées par δn .
 - (b) Dans le cas d'un condensat homogène ($n_0(\mathbf{r}) = n_0$ dans un condensat sphérique de rayon r_0), montrer que cette équation se ramène à une équation de d'Alembert, dans laquelle apparaît la célérité c .
 - (c) Comparer ce résultat à celui obtenu pour la célérité dans la partie précédente.
 - (d) Calculer numériquement la constante de couplage G pour une célérité acoustique $c = 3,2 \text{ mm.s}^{-1}$. Le rayon du condensat r_0 est égal à $10 \mu\text{m}$ et il contient 10^6 atomes.

10. Rapport relatif au problème de physique

Le problème porte sur la condensation de Bose-Einstein (C.B.E.) d'un gaz atomique.

Les premiers résultats théoriques concernant ce sujet ont été obtenus par Einstein au début du vingtième siècle sur un gaz parfait d'atomes libres. La C.B.E. en milieu dilué a été observée expérimentalement pour la première fois en 1995 dans un gaz d'atomes de rubidium piégés. Cette découverte spectaculaire a été récompensée par le prix Nobel de Physique 2001.

Le problème comporte deux parties très largement indépendantes.

La première traite du ralentissement et du refroidissement d'atomes neutres, puis de leur piégeage dans un champ magnétique inhomogène. Les résultats, souvent fournis par l'énoncé, peuvent être obtenus à l'aide d'un formalisme classique.

La seconde partie fait appel à la physique quantique. Les aspects thermodynamiques de la C.B.E. sont d'abord envisagés en considérant un gaz d'atomes piégés dans un piège magnétique harmonique anisotrope. La fin du problème est consacrée à l'étude des propriétés des condensats de Bose à l'aide notamment de l'équation de Gross-Pitaevskii. L'utilisation de celle-ci, analogue à l'équation de Schrödinger, permet de prendre en compte les interactions entre atomes tout en conservant une description du condensat en termes de fonction d'onde.

Le lecteur intéressé par le sujet pourra étudier les cours dispensés au Collège de France entre 1982 et 2002 par le professeur C. Cohen-Tannoudji (<http://www.phys.ens.fr/cours/college-de-france/>)

1. Remarques générales :

Peu de candidats sont parvenus à une compréhension globale du problème. Le jury note avec plaisir la présence d'excellentes copies mais espérait de meilleurs résultats. En particulier, il attendait mieux de la première partie du problème car elle reprend des résultats qui devraient être bien connus.

Il faut attirer l'attention des candidats sur le soin qu'ils doivent apporter à la rédaction de leurs copies. Bien entendu, le fond est essentiel ; pour autant, la forme ne doit pas être négligée, surtout par de futurs enseignants. Le jury déplore s'être trouvé en présence de copies dans lesquelles l'écriture est presque illisible, l'orthographe incertaine, les questions traitées dans un ordre aléatoire et certains résultats perdus au milieu de calculs mal menés. Toutes ces insuffisances sont autant de handicaps incontestables. Il faut donc inciter les candidats à traiter le problème dans l'ordre et à éviter de « picorer » sans chercher à saisir la logique d'ensemble. Enfin, les questions doivent être clairement séparées, les résultats importants entourés, l'orthographe et la grammaire soignées.

On attend d'un professeur agrégé qu'il maîtrise les bases de la physique. Ce n'a pas été le cas dans toutes les copies. En particulier, la détermination de la dimension d'une grandeur est souvent incorrecte (à noter que la confusion entre « dimension » et « unité » est assez fréquente). Il faut également être capable de donner un résultat numérique ou un ordre de grandeur avec un nombre approprié de chiffres significatifs et éviter de donner sans commentaire critique des résultats d'applications numériques qui sont manifestement faux de plusieurs dizaines d'ordres de grandeur. Des erreurs dans l'écriture des équations de Maxwell, dans la description de l'effet Doppler, dans l'expression de l'énergie d'un photon, faisant intervenir une masse, une expression non homogène de l'énergie magnétique, ... sont autant d'indices d'une formation insuffisante en physique ou d'un manque de concentration lors de l'épreuve.

Les outils mathématiques de base sont très souvent malmenés. Les mêmes incorrections reviennent fréquemment, ce qui amène le jury à faire les remarques qui suivent :

- Un vecteur ne peut pas être égal au gradient d'un vecteur.
- L'algèbre des nombres complexes est souvent insuffisamment maîtrisée. $\text{Re}(\underline{a})$ désignant la partie réelle du nombre complexe $\underline{a}$, il n'est pas vrai que $\text{Re}(\underline{a}\underline{b}) = \text{Re}(\underline{a})\text{Re}(\underline{b})$.
- Une erreur fréquemment rencontrée dans la première partie du problème concerne le calcul de la polarisabilité α : de nombreux candidats écrivent que la valeur moyenne sur une période temporelle de $\exp(2i\omega t)$ est égale à $1/2$. C'est évidemment faux. Il est délicat d'utiliser la notation complexe dans des expressions qui ne sont pas linéaires par rapport aux grandeurs oscillantes. Mais ce résultat semble permettre de "retrouver" facilement l'expression donnée par l'énoncé (à un signe près, bien vite escamoté). Cela confirme le fait que l'utilisation de la représentation complexe est soumise à des règles strictes qui ne sont pas maîtrisées.
- Il est maintenant admis que dans les textes imprimés, pour des raisons de facilité typographique, les vecteurs soient notés en caractère gras plutôt que surmontés d'une flèche. Cela permet de les distinguer des scalaires. Or, dans les copies manuscrites, souvent, rien ne distingue les nombres des vecteurs. Pour ces derniers, il faut donc utiliser la flèche traditionnelle.

Rappelons aux futurs candidats que les correcteurs se montrent très sévères face à la "malhonnêteté intellectuelle". Il est illusoire de croire qu'une suite d'incohérences ou qu'un changement de signe ou de facteur numérique frauduleux permettant d'arriver au "bon" résultat puissent échapper à la vigilance du correcteur. Une copie dans laquelle figurent de telles mystifications est évidemment sanctionnée.

2. Remarques sur la première partie du problème.

Forces radiatives.

Cette partie se propose de retrouver l'expression de la force qui s'exerce sur un atome plongé dans un champ laser.

Trop de candidats ont été maladroits dans le calcul et l'utilisation des développements limités et dès la question 1.1.1.b, les erreurs mathématiques sont nombreuses .

Dans la question 1.2.1, la plupart des candidats ont tenté de calculer les forces $\mathbf{F}_1$ et $\mathbf{F}_2$ en conservant les notations complexes pour le moment dipolaire et le champ sans prendre de précaution particulière dans le produit de ces deux grandeurs (voir plus haut).

Dans cette partie, il s'avère que les candidats sont souvent désarçonnés par des calculs élémentaires. La dernière question demande aux candidats de mentionner un phénomène naturel où les effets de la pression de radiation se manifestent. Les réponses ont été souvent étonnantes : "aurores boréales", "tremblements de terre", "forme des gouttes d'eau" ...

Ralentissement et refroidissement d'atomes par laser.

Le ralentissement d'un jet atomique et la température d'un gaz d'atomes refroidis estimée à partir du modèle du "refroidissement Doppler" sont successivement abordés.

Cette partie a été plutôt bien traitée. Pourtant, très peu de candidats saisissent le véritable impact de l'effet Doppler sur l'allure de la force de ralentissement (force ayant une valeur notable uniquement au voisinage de $v = -\delta/k$). La température obtenue à partir de ce modèle est très au-dessus de la température observée expérimentalement, ce qui n'a pas troublé bon nombre de candidats. Bien peu ont mis en doute le modèle, et ont proposé de le raffiner.

Le jury a bien conscience qu'il est difficile de demander au candidat plongé dans la résolution du problème d'avoir une attitude critique vis-à-vis du contenu scientifique du sujet proposé. Pourtant, le texte est assez explicite. La remise en cause de la validité d'un modèle lorsque les résultats obtenus par le calcul et ceux obtenus expérimentalement sont en désaccord doit être naturelle chez le physicien. En outre, la situation étudiée est assez étonnante car il n'est pas fréquent que les résultats de l'expérience soient meilleurs que ceux prédits par la théorie.

Piégeage d'atomes neutres.

Seul le piégeage magnétique est abordé dans cette partie. Les calculs demandés sont souvent élémentaires. Encore faut-il connaître l'expression de l'énergie magnétique et savoir effectuer un développement limité à l'ordre 2.

A la fin du paragraphe, les pulsations associées au potentiel harmonique (donné par l'énoncé) sont demandées. Les réponses correctes à cette question pourtant simple ont été rares.

3. Remarques sur la seconde partie du problème.

Condensation dans un potentiel 3D isotrope.

Il s'agit de retrouver le phénomène de condensation et d'estimer la température de condensation pour des atomes piégés, et non plus libres comme dans le calcul "classique" du cours de physique statistique de maîtrise.

La principale difficulté réside dans la compréhension fine de l'expression du nombre N d'atomes, somme de la population de l'état fondamental et de celle des états excités. La comparaison de ces deux populations suivant la valeur de la fugacité Λ permet de retrouver température critique et accumulation dans l'état fondamental. Les calculs de la partie "énergie interne totale" sont plus techniques, et exigent, pour être menés à bien, une réelle habileté.

Description et excitations du condensat.

L'équation de Gross-Pitaevskii permet de prendre en compte les interactions entre atomes condensés tout en conservant une description du condensat par une fonction d'onde. Peu de candidats sont parvenus à cette dernière partie du problème. Les conclusions des calculs, comparées aux résultats expérimentaux, illustrent l'importance des interactions au sein du condensat.

Une analogie hydrodynamique qui termine le problème montre que la mesure de la vitesse du son dans un condensat permet d'estimer la constante de couplage G qui caractérise ces interactions. Cette dernière partie, assez technique, n'a été abordée qu'exceptionnellement.

4. Conclusions.

Le problème, inspiré par de très récents travaux, comporte sans doute des parties assez délicates.

En 2006, un futur professeur de physique ne peut ignorer la mécanique quantique. Le sujet du problème y fait appel.

Pourtant, les auteurs voulaient éviter que le problème repose uniquement sur les physiques statistique et quantique. La première partie a donc été voulue "classique", ce qui devait permettre une approche progressive en terme de difficulté. Le jury espérait ainsi mettre en confiance les candidats encore trop souvent effrayés par la physique quantique avant d'aborder des notions conceptuellement plus délicates, associées à des calculs plus complexes. Malheureusement, il arrive trop fréquemment que

la physique de niveau licence mise en œuvre dans cette première partie ne soit pas suffisamment maîtrisée.

Mais surtout, trop souvent, la progressivité et l'unité du problème n'ont pas été perçues. Or, il est indispensable que les candidats prennent un peu de recul pendant l'épreuve, qu'ils réfléchissent à la signification des résultats qu'ils viennent d'obtenir et qu'ils en fassent une analyse et un commentaire critique. Ce dernier, en particulier, fait souvent défaut alors qu'il est parfois suggéré par l'énoncé, au point qu'il fait presque partie des réponses attendues aux questions posées. Enfin, un minimum de réflexion critique permet de corriger des erreurs manifestes.

Une telle attitude n'est pas possible si le candidat essaie seulement de grappiller des points de ci de là. Plus que le manque de connaissances, c'est ce que regrette souvent le jury.

L'épreuve a permis de bien classer les candidats. Certaines copies sont insuffisantes mais d'autres sont réellement excellentes. Le jury a eu le plaisir de constater que certains candidats ont une connaissance profonde de la physique contemporaine et une dextérité impressionnante dans le maniement des calculs.

11 DÉROULEMENT DES ÉPREUVES ORALES

SESSION 2006

Conditions matérielles et généralités

Les épreuves définitives (pratiques et orales) se sont déroulées au Lycée Marcelin Berthelot de Saint Maur du 22 juin au 19 juillet 2006

Le jury a délibéré immédiatement après la fin des épreuves. Les résultats ont été proclamés le 20 juillet, et le jury a reçu aussitôt les candidats qui le désiraient, afin de commenter leurs épreuves.

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

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

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

Ces enveloppes sont ouvertes par le candidat au début de chacune des épreuves qui commencent dès le lendemain du tirage au sort. A la session 2006, les horaires ont été les suivants :

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

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

Une épreuve se déroule de la façon suivante :

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

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

Les épreuves sont publiques.

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

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

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

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

Les équipes techniques

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

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

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

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

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

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

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

➤ **Les professeurs préparateurs** ont pour mission de coordonner les travaux de l'équipe technique dans la préparation de chacune des trois épreuves. Leur rôle est également de veiller au bon fonctionnement des appareils durant la préparation. Ils peuvent proposer du matériel spécifique et, plus généralement, des solutions aux problèmes que les candidats peuvent rencontrer.

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

LEÇONS DE PHYSIQUE 2006

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 aux niveaux des deux premières années de licence (niveaux L_1 et L_2).

1. Contact entre deux solides. Frottement de glissement. Applications au glissement et au roulement.
2. Caractère non galiléen du référentiel terrestre. Conséquences.
3. Mouvement d'un solide autour d'un axe fixe. Equilibrage statique et dynamique. Exemples.
4. Approximation gyroscopique. Effets dans les domaines macroscopique et microscopique.
5. Utilisation des lois de conservation dans le problème à deux corps. Applications.
6. Principes de la cinématique relativiste. Durée propre. Longueur propre.
7. Collisions en relativité restreinte : application à l'étude des particules élémentaires.
8. Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique indépendant du temps. Applications.
9. Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide ; validité. Relation de Bernoulli ; limites et applications.
10. Notion de viscosité d'un fluide. Ecoulements visqueux, nombre de Reynolds. Exemples simples.
11. Equations de bilan en mécanique des fluides : exemples et applications.
12. Modèle du gaz parfait.
13. Etat d'équilibre thermodynamique. Fonctions d'état. Identité thermodynamique. 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. Facteur de Boltzmann. Applications.
20. Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir. Applications.
21. Etude d'un phénomène de transport : conduction thermique ou diffusion de particules. Applications.
22. Conversion de puissance électromécanique. Exemples et applications.
23. Induction électromagnétique. Aspects énergétiques. Applications.
24. Systèmes bouclés. Applications.
25. Traitement d'un signal électrique : filtrage linéaire. Etude spectrale. Exemples et applications.
26. Utilisation des propriétés de symétrie dans l'étude des champs électromagnétiques. Exemples.

27. Exemples de phénomènes de propagation unidimensionnels. Ondes progressives, ondes stationnaires. Aspects énergétiques.
28. Ondes sonores dans les fluides.
29. Propagation dans un milieu dispersif : vitesse de phase, vitesse de groupe ; paquets d'ondes planes et évolution. Exemples.
30. Dispersion et absorption d'une onde électromagnétique plane dans un milieu diélectrique. Modélisations microscopiques.
31. Réflexion et réfraction d'une onde électromagnétique monochromatique plane à la surface de séparation entre deux milieux diélectriques linéaires homogènes isotropes.
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 (lunette astronomique, télescope, appareil photographique, microscope...).
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 spectraux.
40. Le photon : la particule et ses interactions avec la matière.
41. Absorption, émission spontanée ou induite du rayonnement : coefficients d'Einstein. Applications.
42. Dualité onde-corpuscule : Relation de Louis de Broglie ; inégalités d'Heisenberg. Applications.
43. Puits de potentiel : exemples et applications en physique quantique.
44. Confinement de l'électron et quantification de l'énergie dans les atomes.
45. Effet tunnel. Applications.
46. Le noyau : stabilité, énergie.
47. Comportement dynamique des systèmes couplés : oscillateurs à deux degrés de liberté en mécanique classique, systèmes à deux niveaux d'énergie en physique quantique. Analogies et différences.
48. Cohésion de la molécule et des solides ; aspects énergétiques.
49. Chaîne linéaire infinie d'oscillateurs harmoniques. Modes propres. 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.

LEÇONS DE CHIMIE 2006

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

25. Structure électronique et géométrie des molécules ; illustrations expérimentales des relations structure - propriétés. (MPSI-PTSI)
26. Cristaux métalliques. (MPSI-PTSI)
27. Enthalpie de réaction : mesure et applications. (MPSI-PTSI)
28. Illustrations expérimentales et applications des réactions de complexation. (MPSI-PTSI)
29. Principe et illustrations des dosages par précipitation. (MPSI-PTSI)
30. Principe et illustrations des dosages redox par potentiométrie. (MPSI-PTSI)
31. Cinétique homogène : étude expérimentale et mécanismes réactionnels. (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)

MONTAGES 2006

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

13. Rapport relatif à la leçon de physique

❖ Déroulement de l'épreuve

La leçon de physique consiste à exposer en 50 minutes et devant un jury un thème tiré au sort dans une liste de titres figurant dans le présent rapport.

Le candidat dispose de quatre heures pour préparer sa leçon, c'est-à-dire mettre en forme ses connaissances sur le sujet. Pour cela, il a accès à une bibliothèque où sont regroupés des ouvrages scientifiques allant des manuels scolaires aux ouvrages les plus spécialisés. A cet égard, il est invité à ne pas se perdre dans une multitude de documents : mieux vaut faire une synthèse à partir de quelques ouvrages connus et bien choisis.

Des membres du personnel technique sont présents pour mettre à disposition du candidat le matériel nécessaire qui lui permettra de réaliser éventuellement une ou plusieurs démonstrations expérimentales destinées à étayer sa présentation orale. Le technicien est absent lors de l'exposé et les expériences sont présentées sous la seule responsabilité du candidat.

Le jury rappelle l'intérêt que présente les outils modernes de laboratoire et de communication que sont les ordinateurs interfacés, les webcams, les vidéoprojecteurs, Ceux-ci sont maintenant régulièrement utilisés. Ils pourraient l'être encore davantage. Car il est vrai qu'utilisés à bon escient, ils facilitent la tâche des candidats. La présentation d'expériences démonstratives parce que bien visibles, l'enregistrement des résultats de mesures répétitives, le traitement des données, ... ne posent plus guère de problèmes.

Les candidats ont tous ces outils à disposition et peuvent également utiliser un rétroprojecteur.

L'exposé est suivi d'une interrogation de 25 minutes environ par les membres du jury. Les questions posées lors de cette séance visent à faire préciser un ou plusieurs points qui n'étaient pas clairs lors de l'exposé et à évaluer la solidité des connaissances du candidat sur les points qu'il a abordés.

❖ Remarques générales concernant l'épreuve de leçon

Une leçon doit être présentée avec dynamisme, assurance et conviction et délivrer un message clairement perceptible. Ce n'est ni une conférence ni un catalogue d'anecdotes. La leçon prend une forme voisine de celle d'un cours et bien qu'elle s'adresse au jury, elle doit rester compréhensible par le public d'étudiants qu'elle vise potentiellement.

Les thèmes abordés doivent toujours être traités en profondeur et illustrés par des exemples concrets et des applications, même si cela n'est pas explicitement indiqué dans le titre de la leçon.

Rigueur, clarté dans la présentation, recherche des mots justes, absence de désinvolture font partie des qualités attendues par le jury.

Le candidat doit faire un effort de correction syntaxique. Il lui faut éviter l'usage excessif du « on » et du « mon » qui diminuent grandement la clarté du propos et rendent le discours peu intelligible.

Le candidat peut évidemment consulter brièvement ses notes afin de vérifier un détail ou des données mais il n'est pas admissible qu'il lise systématiquement ou qu'il recopie au tableau ce qu'il a écrit pendant les 4 heures de préparation. De même, il est interdit de lire des livres devant le jury ou de les recopier au tableau.

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

D'une façon générale, il faut que le candidat évite de se lancer au tableau dans de longs calculs fastidieux. La présentation de ceux-ci sur transparents est dangereuse car le candidat doit montrer qu'il les maîtrise, même si toutes les étapes ne sont pas détaillées. Toutes les grandeurs mises en jeu doivent être clairement précisées. Il est d'ailleurs bon que le candidat vérifie l'adéquation des notations utilisées sur les documents qu'il présente avec celles qu'il a adoptées durant son exposé.

Le jury apprécie toujours que la leçon soit illustrée par des expériences. Il est évidemment préférable que celles-ci soient démonstratives. La réalisation de mesures soignées demande du temps. Or, celui-ci est limité, aussi bien pendant la préparation que devant le jury, si bien que la détermination d'ordres de grandeurs peut suffire. Quoi qu'il en soit, le candidat doit montrer qu'il maîtrise les manipulations qu'il présente.

Le jury termine ces considérations générales par deux remarques.

Tout d'abord, il arrive souvent que, la fatigue aidant, la dernière partie de la leçon soit la moins réussie. Il n'est donc pas conseillé d'aborder des points difficiles à la fin, surtout si ils ne sont pas maîtrisés.

Ensuite, le jury rappelle que la liste des leçons est constituée de sujets indépendants les uns des autres, même lorsqu'il s'agit de titres consécutifs. La numérotation ne fixe donc ni les pré-requis ni les notions pouvant être abordées.

❖ Remarques particulières à propos de quelques leçons

Les numéros indiqués sont ceux de la liste des leçons 2006 qui figure dans les rapports des sessions 2005 et 2006 du concours.

Leçon 1 : L'approche énergétique du contact doit être développée et une description microscopique peut être esquissée.

Leçon 2 : Comme dans toute leçon de mécanique, il est primordial de définir correctement les référentiels utilisés. Les notions de pesanteur et de verticale sont souvent confuses et les définitions peu claires. Les ordres de grandeur sont essentiels pour comparer les différents termes.

Leçon 3 : L'équilibrage d'un solide en rotation autour d'un axe fixe n'est plus au programme des classes préparatoires. Il n'en reste pas moins que, pour bien traiter le sujet et aussi pour répondre aux questions du jury, les candidats doivent connaître les notions de matrice d'inertie et d'axes propres d'inertie. Ils doivent toutefois prendre garde à ne pas se laisser entraîner dans des développements mathématiques ou théoriques excessifs alors que les applications sont innombrables et d'une grande importance pratique.

Leçon 4 : Une illustration expérimentale aide à la compréhension de cette leçon. Un temps suffisant doit être consacré au domaine microscopique. Les équations d'évolution du moment magnétique en présence d'un champ magnétique tournant doivent être clairement établies dans le repère tournant. Les conditions de résonance et les applications de la résonance magnétique doivent être discutées.

Le lien avec l'approche quantique peut être évoqué mais il faut éviter de « sombrer » dans le détail des calculs.

Leçon 5 : Le passage du système à deux corps à la particule fictive constitue le point clé de la leçon. La confrontation du modèle aux résultats expérimentaux est nécessaire (en astronomie ou en spectroscopie de l'atome d'hydrogène par exemple).

Il est à noter que les trajectoires fermées ne sont pas possibles pour tout type de potentiel central.

Leçon 6 : Les bases de la cinématique relativiste ne sont pas toujours bien comprises.

La notion de durée propre et les phénomènes de contraction-dilatation doivent être abordés avec un soin tout particulier. Il ne faut pas se contenter de présenter cette leçon de manière théorique et laisser une bonne place aux applications.

Leçon 7 : L'intérêt du référentiel barycentrique n'est pas souvent bien dégagé. Les candidats sont encouragés à diversifier les exemples traités (et ne pas hésiter à les choisir dans la physique des particules).

Leçon 8 : Les exemples de mouvement dans un champ inhomogène ne sont pas traités correctement. Les applications sont pourtant très nombreuses.

Leçon 9 : Il est difficile de bien dégager la physique du modèle de l'écoulement parfait et ses limites sans faire appel à la notion de viscosité. Les différences entre fluide parfait et écoulement parfait et entre fluide incompressible et écoulement incompressible sont parfois méconnues.

Leçon 10 : Les notions d'écoulement tourbillonnaire et d'écoulement turbulent sont souvent mal assimilées. Les conditions d'applications de l'équation de Navier-Stokes sont ignorées.

Leçon 13 : Le jury constate une confusion fréquente entre la notion de fonction d'état munie de ses variables naturelles (c'est l'objet de la leçon) et la notion de potentiel thermodynamique. On se concentre ici sur l'équilibre thermodynamique, et sur la manière d'obtenir toute l'information sur un système à l'équilibre thermodynamique.

Leçon 14 : Le jury invite les candidats à bien distinguer les paramètres extérieurs fixés qui déterminent le potentiel thermodynamique adapté à la recherche de l'équilibre et les variables internes libres de fluctuer pour permettre au système d'atteindre l'équilibre.

Leçon 16 : Les candidats ne doivent pas se limiter à l'étude du fonctionnement de machines « théoriques », mais doivent développer en détail 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.

Leçon 19 : Les conditions d'utilisation du facteur de Boltzmann doivent être précisées.

Leçon 21 : Un modèle microscopique doit être présenté.

Leçon 22 : Les principes élémentaires de l'induction ne sont pas correctement utilisés dans cette leçon qui nécessite un minimum de connaissance de la technologie des machines.

Leçon 23 : Cette leçon est consacrée à un phénomène particulièrement important, tant du point de vue de la physique fondamentale que de celui des applications technologiques. Le sujet ne doit donc pas être traité de manière trop formelle et un temps suffisant doit être consacré aux applications.

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

Leçon 25 : L'étude spectrale doit être soigneusement présentée. Une bonne place doit être consacrée aux applications.

Leçon 26 : Le jury attend une application au cas de champs dépendant du temps.

Leçon 27 : Pour éviter de répéter de lourds calculs, il est recommandé de développer les analogies entre les différents exemples. Il faut également consacrer du temps à des notions plus concrètes ainsi qu'à l'aspect énergétique, souvent sacrifié.

Leçon 30 : Il y a souvent confusion entre absorption et atténuation.

Leçon 33 : L'essentiel ne consiste pas à ici à calculer de façon détaillée les champs rayonnés.

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 40 : 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 (refroidissement laser, optique et information quantiques, ...).

Leçon 49 : Il est intéressant de montrer le lien entre les paramètres microscopiques du modèle et les grandeurs macroscopiques caractéristiques du milieu.

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 doivent être définies à partir des dérivées partielles de l'entropie ou de l'énergie interne.

Leçon 51 : Il s'agit ici de présenter une interprétation microscopique du paramagnétisme et du ferromagnétisme.

14. Rapport relatif à la leçon de chimie

La leçon de chimie de l'oral de l'agrégation de physique est divisée en deux parties, un exposé et une séance de questionnements.

Au cours de la première partie d'une durée de 50 min, le candidat expose devant le jury une leçon dont l'intitulé est extrait des programmes des classes de premières, de terminales scientifiques et de Sciences Médico-sociales ainsi que des programmes des classes préparatoires MPSI, PTSI, MP, PSI et PT. Au bout de 45 min le jury prévient le candidat qu'il lui reste 5 min.

Ensuite, les membres du jury posent au candidat des questions pendant une durée qui n'excède pas 25 min.

❖ **Déroulement de l'épreuve**

◆ **Préparation (4 h)**

Durant la période de préparation, les candidats ont accès à une bibliothèque dans laquelle ils peuvent trouver les programmes officiels, des ouvrages scolaires du secondaire et du supérieur ainsi que des documents vidéo-projetables (qui remplacent les transparents rétro-projetables).

Une équipe technique composée d'un professeur préparateur et de techniciens, peut assister le candidat dans la mise au point des expériences qui seront présentées au cours de la leçon et dans l'utilisation du matériel informatique.

Le candidat doit remplir une fiche sur laquelle il indique avec précision le matériel et les produits dont il souhaite disposer.

Chacune des salles de présentation est équipée d'un vidéo projecteur et d'un rétroprojecteur.

◆ **Présentation (50 min)**

L'intitulé définit le cadre et le niveau de la leçon.

Celle-ci doit être construite selon un plan rigoureux. Le candidat doit montrer une aisance dans la transmission orale de ses connaissances ainsi que dans l'écriture et le dessin des schémas. Le recours aux notes manuscrites est évidemment possible mais doit toutefois rester limité.

D'une façon générale, le jury apprécie à leur juste valeur les qualités que l'on est en droit d'attendre d'un futur professeur : clarté, concision, rigueur et enthousiasme.

Le jury n'intervient pas dans le déroulement de la leçon sauf dans des cas exceptionnels, par exemple pour arrêter une manipulation qui pourrait s'avérer dangereuse. En revanche il peut, à son initiative ou à la demande du candidat, se déplacer dans la salle afin d'observer le détail d'une expérience.

En revanche, le jury n'est pas habilité à aider le candidat dans ses manipulations ni à répondre aux questions posées par celui-ci. Les ouvrages utilisés pendant la préparation doivent être tenus à la disposition du jury afin que celui-ci puisse en prendre connaissance.

Une véritable attitude scientifique s'accompagne d'une certaine humilité devant les faits expérimentaux. En particulier, pour reprendre une expression souvent entendue, on ne peut pas dire qu'une expérience « ne marche pas ». Il est possible qu'elle ne donne pas les résultats attendus. Le fait est instructif. Il faut en prendre acte et surtout essayer d'analyser ce qui a pu se passer.

Enfin, certains candidats semblent oublier leurs connaissances de physique lorsqu'il s'agit d'appréhender des phénomènes chimiques.

◆ Questions

Au cours de cette dernière partie, les membres du jury posent tour à tour des questions. Celles-ci portent généralement sur la leçon elle-même, mais peuvent faire appel à des domaines variés. Le niveau auquel se place le jury ne se réfère plus ici à un programme particulier.

Cet échange est l'occasion pour le candidat de préciser certains points abordés pendant son exposé et que le cadre imposé par l'intitulé de la leçon ne lui aurait pas permis de développer. Il permet au jury d'apprécier l'étendue des connaissances du candidat et son aptitude à réagir face à une situation nouvelle.

❖ Conseils généraux

◆ Exposé

Une leçon bien construite possède une introduction, un développement et une conclusion. Le candidat a intérêt à bien choisir le rythme de présentation qui doit être suffisamment soutenu pour couvrir au maximum le champ du sujet dans le temps imparti.

Pendant la période de préparation, le candidat a intérêt à prendre le temps de bien lire l'intitulé de la leçon qui lui est proposée et d'en délimiter soigneusement les contours afin d'éviter de laisser dans l'ombre des parties importantes ou, au contraire, de se fourvoyer dans des développements hors sujet. En particulier, certaines leçons sont consacrées à des applications et excluent les développements théoriques fondamentaux.

L'introduction permet d'inscrire la leçon dans le cadre du programme, de préciser les pré-requis ainsi que les objectifs. Elle doit être brève afin de ne pas trop empiéter sur le développement.

Comme il a été rappelé plus haut, les intitulés des leçons sont extraits des programmes officiels. Cela ne doit pas conduire le candidat à se sentir prisonnier d'une progression particulière extraite de tel ou tel manuel. En particulier, il n'existe pas de plan type exigé ou même attendu pour une leçon donnée. Au contraire, avant de construire le plan de sa leçon, le candidat a intérêt à consulter plusieurs ouvrages afin de disposer des points de vue d'auteurs différents.

En ce qui concerne la forme, l'orthographe et l'expression orale doivent être irréprochables. Les documents projetés doivent être utilisés à bon escient.

Les présentations expérimentales font partie intégrante de la leçon et interviennent naturellement dans son évaluation. Rappelons ici quelques conseils déjà donnés dans les rapports précédents.

- Certaines manipulations, mises au point pendant la période de préparation, doivent être réalisées, pour partie ou en totalité, devant le jury. C'est à cette condition, en effet, que celui-ci peut évaluer les qualités d'expérimentateur du candidat. En revanche, les pesées ou les prises d'essai, qui peuvent être longues et ne présenter en soi qu'un intérêt limité, seront réalisées en préparation afin de gagner du temps.

- Parmi les nombreuses manipulations possibles illustrant le sujet proposé, celles qui ont un lien avec la vie réelle présentent des avantages didactiques incontestables. A titre d'exemple, le candidat

a intérêt à privilégier une manipulation illustrant un contrôle de qualité ou un procédé industriel par rapport à une expérience académique, c'est-à-dire parfois réalisée dans les établissements scolaires ou mentionnée dans les manuels mais ne présentant pas d'intérêt pratique particulier.

- Le jury attend du candidat qu'il précise avec soin le mode opératoire employé dans la manipulation et qu'il conserve un esprit critique vis-à-vis des modes opératoires proposés dans la littérature. Les résultats doivent être soigneusement interprétés. En particulier, la caractérisation des produits par une méthode physico-chimique est une étape essentielle dans une synthèse. Lorsqu'une manipulation conduit à des résultats quantitatifs, la précision des mesures effectuées doit être estimée.

- Le jury a constaté à plusieurs reprises une utilisation peu orthodoxe de certains éléments de verrerie : les éprouvettes à pied graduées sont destinées à mesurer des volumes et non à contenir un mélange réactionnel. Il existe pour cela des béchers de forme adaptée.

- L'usage des gants est impératif pour certaines manipulations de produits dangereux, mais il ne doit pas être abusif et conduire à des situations un peu ridicules.

Lors de la conclusion, il n'est pas opportun de reprendre un à un tous les thèmes qui viennent d'être abordés durant l'exposé. En revanche, il peut être intéressant d'indiquer en quoi la leçon s'inscrit dans un cadre plus général et de citer succinctement quelques points qui pourraient être développés ultérieurement.

▪ Questions

Les questions posées permettent au jury de se rendre compte si le candidat s'est bien approprié le sujet traité. Leur degré de difficulté peut être très variable. Le candidat doit être persuadé que le jury ne cherche pas à le déstabiliser. Bien au contraire, les questions posées permettent de valoriser les connaissances du candidat et peuvent dans certains cas, contribuer à le rattraper. Il n'est pas nécessaire de savoir répondre à toutes les questions posées pour avoir une bonne note.

▪ Conclusion

Une bonne prestation lors de cette épreuve nécessite de la part du candidat une analyse soigneuse de l'intitulé de la leçon qui lui est proposée. Les expériences, en nombre suffisant, judicieusement choisies et toujours interprétées doivent venir à l'appui d'une présentation claire et soignée.

❖ Remarques particulières sur quelques leçons

Leçon 1 : Elle souffre d'un manque de rigueur et de pédagogie. Les manipulations mettant en jeu des gaz sont mal maîtrisées.

Leçon 2 : Bien distinguer les étapes d'ionisation, solvatation et dispersion et ne pas oublier de faire le lien avec les grandeurs physiques associées est mal perçu.

Leçon 5 : La présentation des chaînes carbonées est superflue.

Leçon 6 : Il faut insister sur la différence entre les trois classes d'alcool et ne pas se limiter aux oxydations.

Leçon 9 : Connaissant les valeurs des concentrations des différentes espèces et l'expression de la constante d'acidité, il est toujours possible de calculer la valeur numérique de celle-ci. Mais il faut également montrer qu'elle garde la même valeur lorsque celles des concentrations changent. L'analyse de l'intitulé de la leçon invite clairement à montrer cela expérimentalement. Il s'agit même du cœur de la leçon.

Leçons 18, 19, 20 : Ces leçons doivent être l'occasion d'illustrer la variété des méthodes de dosage et les réactions de titrage.

Leçons 18 à 22 : Si le caractère expérimental de ces leçons est indéniable, il n'en reste pas moins que la présentation doit faire apparaître un fil conducteur et un exposé structuré.

Leçon 27 : Il est rappelé que les notations de thermodynamique et leur signification doivent être connues et utilisées avec rigueur.

Leçon 28 et 29 : Les candidats sont invités à mieux faire ressortir le lien entre les constantes thermodynamiques relatives aux espèces et les applications mettant en jeu ces dernières.

Leçon 31 : Il est souhaitable qu'une, au moins, des illustrations expérimentales soit en lien avec l'étude des mécanismes réactionnels.

Leçon 32 : La leçon porte sur les illustrations expérimentales et les applications et non sur les démonstrations des lois de déplacement des équilibres. Les illustrations peuvent être choisies dans le domaine des solutions aqueuses.

Leçon 35 : Cette leçon doit s'appuyer sur les diagrammes potentiel-pH et les courbes intensité-potentiel. Les espèces intervenant dans les différentes étapes doivent être caractérisées.

Leçons 39 et 40 : La chimie étant une science concrète, les candidats sont vivement encouragés à présenter des molécules réelles pour illustrer leurs propos.

Leçon 40 : Le cas du cyclohexane mérite quelques égards, notamment sur le plan de sa représentation.

15. Rapport relatif au montage de physique

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

Le candidat dispose de 40 minutes pour présenter des expériences préparées pendant 4h avec l'assistance de techniciens et de professeurs préparateurs. Suit une séance de questions au cours de laquelle le jury se fait préciser les choix expérimentaux, évalue la compréhension des phénomènes physiques illustrés et la pertinence des commentaires.

❖ Remarques générales sur le déroulement de l'épreuve

Après une courte introduction, le candidat doit montrer son habileté expérimentale en réalisant des expériences illustrant un sujet choisi parmi les deux proposés dans l'intitulé de l'épreuve.

Il ne s'agit donc pas d'un cours et les lois illustrées n'ont pas à être démontrées. Cependant le candidat doit être capable d'en donner l'origine et le domaine de validité. Une expérience décrite oralement ou au tableau sans manipulation est considérée comme sans valeur.

On ne saurait trop conseiller au candidat de faire des manipulations entièrement exploitées et adaptées à son niveau, dont il maîtrise les concepts physiques sous-jacents, plutôt que de tenter de réaliser des expériences mal dominées ou survolées après avoir rempli la paillasse de matériel. Le jury préfère l'attitude honnête, mais « battante », d'un candidat conscient de ses limites à celle d'un autre qui, cherchant à tout justifier, s'emmêle dans des explications confuses et argumente dans tous les sens. Certaines questions posées par le jury font appel au bon sens et un raisonnement simple mené à haute voix permet de conclure.

Quel que soit le sujet choisi, le candidat ne doit pas se limiter à des expériences qualitatives. Par contre, il n'a pas à reprendre toutes les mesures associées à une expérience : il peut en choisir une qui lui permet d'illustrer le protocole expérimental suivi et l'insérer ensuite parmi les résultats obtenus pendant la préparation.

Toutefois, en introduction, le candidat peut fort bien réaliser une expérience démonstrative et effectuer une mesure grossière ou approximative qui ne donne qu'un ordre de grandeur et pour laquelle il peut pratiquement se dispenser de l'évaluation de l'incertitude.

Mais il ne doit pas abuser de ce genre de manipulations car le jury exige des mesures soignées. Seules, celles-ci peuvent conduire à une exploitation critique des résultats permettant de valider un modèle ou de déterminer la valeur d'une grandeur physique qui pourra être comparée à celle trouvée dans un « handbook » par exemple. Pour ce faire, toute mesure doit donc être accompagnée d'une évaluation de l'incertitude sur le résultat obtenu et adaptée à la mesure effectuée.

Trop souvent, les seules incertitudes envisagées sont celles dues aux appareils de mesure utilisés. Or, la précision obtenue dépend en premier lieu du protocole expérimental mis en place et le candidat doit être en mesure de discuter de l'existence d'erreurs systématiques induites par ce protocole. Par ailleurs, les incertitudes dépendent évidemment du soin apporté par l'expérimentateur à sa mesure.

L'outil informatique est maintenant assez systématiquement utilisé. D'une façon générale, c'est une bonne chose car les possibilités offertes sont nombreuses. Toutefois, les candidats doivent être mis en garde contre toute utilisation irréfléchie.

En particulier, les ajustements automatiquement réalisés par les logiciels peuvent rendre difficile l'estimation de l'incertitude sur l'ajustement des paramètres. En tout état de cause, si le logiciel propose une incertitude sur un paramètre, le candidat doit s'assurer de sa cohérence avec la valeur de ce dernier. Le plus souvent possible, il aura d'ailleurs intérêt à revenir à des représentations linéaires qui permettent une discussion plus facile des incertitudes.

Par exemple, dans le cas de la variation de la résistance d'une thermistance en fonction de la température, il est préférable de tracer $\ln R$ en fonction de $1/T$ et d'ajuster à la main la pente en tenant compte des barres d'erreur si le logiciel ne le permet pas.

Enfin, le candidat doit savoir utiliser le logiciel qu'il choisit.

Il doit avoir également au moins une idée du principe physique de fonctionnement des appareils de mesure qu'il utilise, de leurs limites et de leur influence dans le montage et pouvoir être capable de justifier ses choix d'appareils. D'une manière générale, l'utilisation d'une « boîte noire » nécessite la connaissance du contenu de la boîte.

Par ailleurs, les candidats oublient trop souvent d'expliquer leur tableau de mesures et de légender leurs courbes.

Quelques points particuliers :

Optique - Le jury pense que les montages d'optique ne sont pas spécialement difficiles et qu'il est assez facile d'obtenir une bonne note. Il regrette qu'ils soient rarement choisis par les candidats. Les expériences traditionnelles réussies avec des résultats spectaculaires conservent tout leur intérêt. Les montages doivent évidemment être soignés et les figures obtenues visibles et exploitables. L'utilisation de capteurs CCD et de l'informatique ne permettent en aucun cas de rattraper un mauvais réglage.

Thermodynamique - Les états d'équilibre ou stationnaires ou permanents sont longs à atteindre. Une bonne gestion du temps et une bonne organisation sont importantes. C'est une difficulté à ne pas sous-estimer.

Le jury peut se déplacer pour vérifier un câblage, observer un phénomène peu visible mais il apprécie aussi l'utilisation, à bon escient, des moyens modernes de communication. C'est ainsi que la webcam et le vidéo-projecteur peuvent être particulièrement intéressants.

Le choix des ouvrages de références est important. Un simple manuel ne peut pas remplacer le Handbook lorsqu'il s'agit de donner une valeur tabulée.

Enfin, le jury regrette que certains titres semblent faire l'objet d'impasses systématiques. Les sujets traditionnels ou anciens ne conduisent pas forcément aux meilleures notes.

Remarques particulières sur certains montages

Les numéros des montages sont ceux de la liste 2006 (identique à la liste 2005)

1. Dynamique newtonienne. Les bilans de forces doivent être soignés.

La comparaison (sans précautions particulières) de la période d'oscillation d'un pendule pesant avec la période théorique du pendule simple n'a pas de sens.

2. Tension superficielle. Ce sujet, souvent choisi, cette année a été réussi de manière inégale. Il demande un soin expérimental tout particulier. Les mesures nécessitent de se placer en régime statique.

4. Thermométrie. Il est important de dominer les notions de bases de la thermométrie ainsi que le principe de fonctionnement des différents thermomètres utilisés.
6. Phénomènes de transport. Il faut savoir évaluer un temps caractéristique de diffusion.
10. Diffraction des ondes lumineuses. Le candidat ne doit pas se contenter d'expériences au niveau de la classe de seconde. Il peut utiliser d'autres sources lumineuses que les sources laser.
11. Spectrométrie optique. Il n'est pas suffisant de faire de simples mesures de longueurs d'onde. Il faut se poser la question de la résolution de l'appareil de mesure et des sources de limitation de cette résolution.
12. Milieux optiquement actifs : biréfringence et pouvoir rotatoire. Il faut avoir davantage que de vagues notions sur les milieux anisotropes.
13. Production et analyse d'une lumière polarisée. Il ne faut pas se limiter à la polarisation rectiligne.
17. Production et mesure de champs magnétiques. Cette étude ne doit pas se limiter aux champs de l'ordre du millitesla. Par ailleurs, les solénoïdes disponibles dans la collection ne sont pas de longueur infinie.
18. Milieux magnétiques. Dans la mesure de la hauteur d'ascension du FeCl_3 , l'évaluation du champ B doit être menée avec précision.
21. Condensateurs et effets capacitifs. Pour mesurer des capacités de petite valeur, on ne peut pas négliger la capacité d'entrée de l'oscilloscope ou celle des câbles. Ce montage ne peut pas se limiter à l'étude du circuit RC. Les candidats doivent avoir une idée du principe de fonctionnement d'un capacimètre.
22. Induction, auto-induction. Ces notions sont fondamentales. Le montage est pourtant souvent décevant.
23. Conversion de puissance électrique-électrique. Ce montage n'est pas souvent choisi. Pourtant les exemples simples ne manquent pas (il faut penser au transformateur, par exemple).
26. Mesures des tensions et des courants. Le jury attend du candidat qu'il connaisse et illustre le principe de la mesure et les caractéristiques des multimètres ou oscilloscopes utilisés (sensibilité, bande passante...). Le montage ne peut pas se résumer à une étude des mesures obtenues à l'aide de différents types de multimètres.
27. Amplification de signaux. Le montage à transistors est bienvenu. Les caractéristiques de l'amplificateur opérationnel parfait doivent être connues.
30. Mesure des fréquences temporelles (domaine de l'optique exclus). L'étude du principe de la mesure d'une fréquence est attendue. Une mesure de fréquence utilisant la fonction FFT du logiciel « Synchronie » sur un nombre entier mais faible de périodes est peu judicieux.
33. Instabilités et phénomènes non linéaires. De très nets progrès ont été constatés sur ce sujet.

34. Ondes et impédances. Les deux parties du titre ne sont pas indépendantes et il est souhaitable d'illustrer dans ce montage le rôle que joue l'adaptation d'impédance dans la propagation des ondes.

36. Résonance. L'étude du circuit RLC (de niveau terminale) n'est pas maîtrisée et est souvent traitée de manière superficielle par les candidats. La notion de facteur de qualité pour mesurer l'acuité de la résonance ne peut pas être passée sous silence. Il faut bien distinguer résonance et ondes stationnaires.

37. Oscillateurs. Ce montage est destiné à illustrer la propriété qu'ont certains systèmes à osciller spontanément. Dans ce sens-là, le circuit RLC excité par une impulsion et qui se met à osciller est dans le sujet alors que l'étude du régime forcé ne l'est pas.

38. Couplage des oscillateurs. Peu de candidats savent lier la période des battements aux pulsations propres.

39. Filtrage. Ce montage ne peut pas se limiter à une mauvaise étude d'un filtre passif RC ou RLC en électricité.

LEÇONS DE PHYSIQUE 2007

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

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

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

LEÇONS DE CHIMIE 2007

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

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

MONTAGES 2007 (liste identique à MONTAGES 2006)

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