



Secrétariat général

Direction générale  
des ressources humaines

Sous-direction du recrutement

MINISTÈRE  
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE

## **Concours du second degré – Rapport du Jury**

**Session 2013**

**AGRÉGATION  
PHYSIQUE-CHIMIE  
Concours interne**

**Rapport de jury présenté par Jean-Marc BERROIR  
Professeur des Universités**

Les rapports des jurys des concours sont établis sous la responsabilité des présidents de jury

# RAPPORT DU JURY DES CONCOURS D'AGREGATION INTERNE ET DU CAERPA DE SCIENCES PHYSIQUES OPTION PHYSIQUE ET CHIMIE

## SESSION 2013

- 0 - Sommaire
- 1 - Composition du jury 2013
- 2 - Avant-propos du président
- 3 - Épreuves et programmes 2013
- 4 - Déroulement des épreuves 2013
- 5 - Informations statistiques sur la session 2013
  - Épreuves écrites
  - Épreuves orales
  - Répartition des candidats par académie
  - Répartition des candidats par sexe
  - Répartition des candidats par âge
- 6 - Énoncé de la composition de physique 2013
- 7 - Solution de la composition de physique 2013
- 8 - Rapport relatif à la composition de physique 2013
- 9 - Énoncé de la composition de chimie 2013
- 10 - Solution de la composition de chimie 2013
- 11 - Rapport relatif à la composition de chimie 2013
- 12 - A propos des épreuves orales
- 13 - Rapport sur les épreuves orales de physique 2013
- 14 - Rapport sur les épreuves orales de chimie 2013
- 15 - Épreuves et programmes 2014

# 1. COMPOSITION DU JURY

BERROIR Jean-Marc	Professeur des universités, Paris, Président
DESBIOLLES Pierre	Inspecteur général de l'éducation nationale, Vice-président
MAUHOURAT Marie-Blanche	Inspectrice générale de l'éducation nationale, Vice-présidente
DE TOURRIS Rodolphe	Professeur agrégé, Paris, représentant de l'enseignement privé
AUZELY-LEXA Catherine	Professeure agrégée, Versailles
BAUDIN Jean-Bernard	Professeur des universités, Paris
BESSY Geneviève	Professeure de chaire supérieure, Bordeaux
BOISGARD Rodolphe	Maître de conférences, Bordeaux
BOYER David	IA-IPR, académie de Bordeaux
CAVELIER Marc	Professeur agrégé, Rennes
LENOBLE Florence	Professeure de chaire supérieure, Paris
LÉVÊQUE Thierry	IA-IPR, académie de Nancy-Metz
PONTUER Marine	Professeure agrégée, Paris
PRIEUR Jacques	IA-IPR, académie de Nantes
RÉMY Sophie	Professeure de chaire supérieure, Limoges
RIBIÈRE Philippe	Professeur agrégé, Chartres
ROBERT Vincent	Professeur des universités, Strasbourg
ROLLEY Étienne	Professeur des universités, Paris
SANZ Marie-Noëlle	Professeure de chaire supérieure, Paris
SIMON Christiane	IA-IPR, académie de Versailles

## 2. AVANT-PROPOS

*Le rapport du jury des concours de l'agrégation interne et du CAERPA de physique chimie de la session 2013 est mis en ligne sur le serveur du ministère de l'éducation nationale : <http://www.education.gouv.fr/siac/siac2> ainsi que sur le site <http://www.agregation-interne-physique-chimie.org>. Ce rapport est donc rapidement accessible à tous ceux, candidats et formateurs, concernés par ces concours de promotion interne.*

Les nombre de postes offerts en 2013 au concours public et au CAERPA sont en augmentation par rapport à l'année 2012. Pour le concours public, 40 postes ont été mis au concours contre 35 en 2012. Ce nombre de postes reste toutefois sensiblement plus faible que durant les années antérieures (45 postes offerts de 2006 à 2010). Pour le CAERPA, 11 postes ont été mis au concours en 2013, contre 9 en 2012. La sélectivité des deux concours est toujours très forte. Les ratios « nombre de candidats présents à au moins une épreuve » sur « nombre de postes » sont de 22,2 pour le concours public et de 16,4 pour le CAERPA (à comparer à 27,9 et 19,8 en 2012). Sur l'ensemble des deux concours, 1066 candidats ont composé à l'écrit. Ce chiffre confirme les observations faites durant les sessions antérieures, et montre à l'évidence le succès d'un concours conçu tant pour contribuer à la promotion interne des professeurs en exercice que pour participer à leur formation continue. A l'issue des épreuves écrites, 96 candidats ont été déclarés admissibles (83 pour le public et 13 pour le CAERPA). La barre d'admissibilité est cette année de 26/40 pour le concours public et de 25,5/40 pour le CAERPA. Comme les années précédentes, ces barres reflètent le bon niveau de l'ensemble des candidats admissibles. Ceci a été confirmé par les épreuves orales, à l'issue desquelles l'ensemble des postes offerts au concours public a été pourvu. Pour le CAERPA, seuls 9 postes sur les 11 offerts ont été pourvus. La barre d'admission est de 48,4/80 pour le concours public et de 47,1/80 pour le CAERPA.

L'âge moyen des candidats admis est cette année de 37,9 ans. Cette valeur confirme l'augmentation de l'âge moyen des admis observée en 2012 (37,6) par rapport aux années 2011, 2010 et 2009 (35,5, 36,1 et 35). Cette année, 33% des admis ont 40 ans ou plus. Comme les années précédentes, on observe que de nombreux candidats, qui ont fait le choix d'une l'immersion professionnelle immédiate après leur succès au CAPES, se présentent au concours interne dès qu'ils remplissent les conditions statutaires requises, en ayant pour nombre d'entre eux continué à préparer les concours externes de l'agrégation. Comme on l'avait déjà remarqué l'an passé, la légère augmentation de l'âge moyen des candidats admis résulte sans doute d'une meilleure prise en compte des compétences professionnelles acquises par les candidats au fil des années d'exercice de leur métier d'enseignant. On peut espérer que les réformes importantes apportées depuis cette année aux épreuves orales du concours qui visent à renforcer les rôles de promotion interne et de formation de l'agrégation interne ont contribué à cette augmentation et permettront d'aller plus loin dans cette direction.

Force est aussi de constater que le déséquilibre des genres parmi les admis est toujours présent, même s'il est cette année moins important qu'en 2012 (67% d'hommes et 33% de femmes sur l'ensemble des deux concours contre 79% et 21% en 2012). Une fois de plus, la répartition entre hommes et femmes au sein des admis reflète absolument pas les proportions constatées dans la profession (45% des certifiés de sciences physiques sont des certifiées). Contrairement à l'année dernière, la répartition hommes-femmes des candidats ayant composé aux épreuves écrites (64%

d'hommes et 36 % de femmes) est pratiquement identique à celle des admis. Les femmes ont donc aussi bien réussi le concours 2013 que les hommes. Là aussi, on peut espérer que les réformes conduisant à un concours davantage axé sur la prise en compte des compétences professionnelles et favorisant les candidats plus expérimentés ont permis d'améliorer la situation mais ceci reste bien sûr à confirmer.

Nous rappelons que le rapport du jury est un outil d'information, de travail et de conseil pour les futurs candidats ainsi que pour les centres de préparation. Le lecteur trouvera dans ce rapport un ensemble de commentaires et de conseils qu'il conviendra de lire avec attention. Les épreuves écrites font ainsi l'objet d'une correction détaillée, certaines questions faisant l'objet de recommandations ou de commentaires plus précis. Pour les épreuves orales, des considérations générales sur les nouvelles épreuves en vigueur depuis cette année (section 12) sont suivies d'un rapport circonstancié sur les épreuves de la session 2013.

On peut trouver le rapport du jury ainsi que ceux des années précédentes sur le site <http://www.agregation-interne-physique-chimie.org>. On y trouve également des informations pratiques très utiles pour la préparation des épreuves écrites et orales (annales et corrigés des épreuves écrites, programmes, ressources pédagogiques et informatiques disponibles pendant les épreuves orales...). Le jury incite les futurs candidats à consulter ce site.

Le jury rappelle que la réussite aux concours nécessite une préparation active, durant toute l'année scolaire. Il invite les candidats à mener de front la préparation aux épreuves écrites d'admissibilité et la préparation aux épreuves orales d'admission. Il est parfaitement illusoire de penser que l'on peut réussir à l'oral en ne s'y préparant que quelques jours avant les épreuves. Aussi est-il conseillé avec insistance aux candidats qui ne disposent pas dans leur établissement d'un environnement sur lequel ils peuvent s'appuyer pour conforter leur préparation, de suivre les formations académiques ou universitaires assurant cette préparation.

Comme les années précédentes, 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 autoévaluation 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. L'expérience montre en effet, d'une part que des candidats admissibles avec un écrit moyen sont reçus dans les tous premiers rangs à l'issue des épreuves orales (voir section 5), et d'autre part que ne pas briller à l'une des épreuves orales n'empêche pas d'être admis.

Le jury a corrigé d'excellentes copies et a assisté, lors des épreuves d'admission, aussi bien pour les exposés que pour les montages, à des prestations remarquables. Il reconnaît et apprécie à leur juste valeur les efforts consentis par l'ensemble des candidats et félicite tout particulièrement les professeurs quadragénaires qui, ayant relevé le défi, ont réussi le concours ; l'un des lauréats est âgé de 53 ans, ce qui montre bien que l'on peut réussir le concours, même lorsque la formation initiale est bien loin derrière soi. Le jury mesure les sacrifices que la préparation du concours représente et les difficultés rencontrées à mener de front l'exercice normal du métier et cette préparation. Il espère que les modifications apportées aux épreuves inciteront les professeurs très expérimentés à se présenter plus nombreux au concours en leur offrant de meilleures perspectives de réussite. Il encourage

également les candidats qui n'ont pas été récompensés lors de cette session à renouveler leurs efforts. Il va de soi qu'il ne faut pas se laisser décourager par une ou plusieurs tentatives infructueuses. L'expérience montre que la persévérance est la plupart du temps récompensée.

## Concours interne de l'agrégation du second degré

### Concours interne d'accès à l'échelle de rémunération des professeurs agrégés dans les établissements d'enseignement privés sous contrat du second degré (CAER)

#### Section physique - chimie

#### Programme de la session 2013

### I Épreuves écrites d'admissibilité

Ces épreuves sont envisagées au niveau le plus élevé et au sens le plus large du programme défini ci-dessous.

#### **1. Composition sur la physique et le traitement automatisé de l'information (5 heures)**

Elle porte sur les enseignements de physique des programmes de physique-chimie appliqués à la rentrée scolaire de l'année d'inscription au concours :

##### **1. des classes :**

- de collège ;
- de seconde générale et technologique ;
- de première S ;
- de terminale S, y compris l'enseignement de spécialité ;  
de première et de terminale Sciences et Technologies de l'Industrie et du Développement Durable (STI2D) ;
- de première et de terminale Sciences et Technologies de Laboratoire (STL), spécialité Sciences Physiques et Chimiques en Laboratoire (SPCL) ;
- de première et de terminale Sciences et Technologies de la Santé et du Social (ST2S).

**2. des classes préparatoires scientifiques aux grandes écoles :** PCSI, MPSI, MP, PC, PSI, BCPST 1ère et 2ème année.

#### **2. Composition sur la chimie et le traitement automatisé de l'information (5 heures)**

Elle porte sur les enseignements de chimie des programmes de physique-chimie appliqués à la rentrée scolaire de l'année d'inscription au concours :

##### **1. des classes :**

- de collège ;
- de seconde générale et technologique ;
- de première S ;
- de terminale S, y compris l'enseignement de spécialité ;  
de première et de terminale Sciences et Technologies de l'Industrie et du Développement Durable (STI2D) ;
- de première et de terminale Sciences et Technologies de Laboratoire (STL), spécialité Sciences Physiques et Chimiques en Laboratoire (SPCL) ;
- de première et de terminale Sciences et Technologies de la Santé et du Social (ST2S).

**2. des classes préparatoires scientifiques aux grandes écoles :** PCSI, MPSI, MP, PC, PSI, BCPST 1ère et 2ème année.

## II Épreuves orales d'admission

Chacune des deux épreuves orales d'admission, l'une d'exposé et l'autre de montage, a lieu après quatre heures de préparation surveillée.

Le tirage au sort conduit le candidat à traiter :

- soit un exposé de physique et un montage de chimie
- soit un exposé de chimie et un montage de physique.

### **1. Exposé consistant en une présentation d'un concept et son exploitation pédagogique (1h20)**

Dans le cas d'un exposé de physique, le programme est celui de la première épreuve écrite d'admissibilité (composition sur la physique et le traitement automatisé de l'information). Dans le cas d'un exposé de chimie, le programme est celui de la seconde épreuve écrite d'admissibilité (composition sur la chimie et le traitement automatisé de l'information).

**Structure de l'épreuve** : l'épreuve est constituée d'un exposé par le candidat, d'une durée maximum de 50 minutes, suivi d'un entretien avec le jury, d'une durée maximum de 30 minutes. L'exposé du candidat comporte deux parties successives, d'importance équivalente, qui lui permettent de mettre en valeur ses compétences professionnelles :

- une partie relative au concept scientifique, développée au moins en partie à un niveau post-baccalauréat ;
- une partie relative à un aspect pédagogique de l'enseignement, au collège ou au lycée, de notions relatives à ce concept.

#### **Partie relative au concept scientifique**

Dans cette partie, le candidat met en valeur ses compétences disciplinaires en présentant à la fois sa vision d'ensemble du sujet et en développant un point particulier, de son choix, à un niveau post-baccalauréat.

Cette présentation synthétique peut prendre la forme d'un plan séquencé, d'un schéma conceptuel, d'une carte mentale, etc. permettant de situer la thématique scientifique et d'en aborder divers aspects, du fondamental aux applications. Le candidat doit être en mesure d'apporter des éclaircissements sur l'ensemble des points abordés dans son exposé.

#### **Partie relative à un aspect pédagogique de l'enseignement du concept**

Dans cette partie, le candidat met en valeur ses compétences pédagogiques et didactiques. Il peut par exemple choisir :

- de proposer et d'analyser une séquence d'enseignement ;
- d'étudier l'évolution de la présentation du concept du collège au lycée ;
- d'aborder la problématique de l'évaluation ;
- etc.

L'ordre de présentation des ces deux parties est laissé au choix du candidat.

L'illustration expérimentale est naturellement possible dans chacune des parties.

**L'entretien** porte sur les deux parties ; il vise à la fois à compléter l'évaluation des qualités pédagogiques et didactiques, de la maîtrise des connaissances scientifiques et de la culture scientifique et technologique du candidat.

### **2. Montage et traitement automatisé de l'information (1h20)**

Le niveau est celui des classes post-baccalauréat des lycées. Deux sujets sont proposés au choix des candidats. Au cours de l'épreuve, les candidats présentent, réalisent et exploitent qualitativement et quantitativement quelques expériences qui illustrent le sujet retenu.

#### **Liste des sujets des exposés et des montages de physique et de chimie tirés au sort lors des épreuves orales**

##### **a) Physique**

Aux sujets communs aux épreuves d'exposé et de montage s'ajoutent des sujets spécifiques à chacune de ces épreuves.

##### Sujets communs aux épreuves d'exposé et de montage

1. Dynamique newtonienne
2. Ondes acoustiques
3. Spectrométrie optique, couleur
4. Vision et image



5. Propagation libre et guidée
6. Interférences
7. Diffraction
8. Oscillateurs
9. Champs magnétiques
10. Capteurs
11. Transferts thermiques
12. États de la matière
13. Grandeurs électriques
14. Fluides
15. Résonance
16. Polarisation de la lumière
17. Induction
18. Temps – fréquence
19. Transferts quantiques d'énergie
20. Frottements
21. Transmission de l'information
22. Ondes stationnaires

#### Sujets d'exposé spécifiques

- 23e. Gravitation
- 24e. Cohésion du noyau, stabilité, réactions nucléaires
- 25e. Mouvements képlériens
- 26e. Énergie interne
- 27e. Rayonnement d'équilibre et corps noir
- 28e. Dualité onde – corpuscule
- 29e. Référentiels géocentrique et terrestre

#### Sujets de montage spécifiques

- 23m. Filtrage et analyse spectrale
- 24m. Amplification
- 25m. Oscillations spontanées
- 26m. Couplages
- 27m. Régimes transitoires
- 28m. Conversion de puissance
- 29m. Signal analogique et signal numérique

#### **b) Chimie**

Les sujets sont communs aux épreuves d'exposé et de montage.

1. Séparation
2. Liaisons
3. Caractérisations
4. Stéréoisomérisation
5. Solvants
6. Solutions
7. Solubilité
8. Conductivité
9. Mélanges binaires
10. Proportions et stœchiométrie
11. Équilibre chimique
12. Évolution d'un système chimique
13. Conversion d'énergie lors des transformations chimiques
14. Oxydo-réduction
15. Dispositifs électrochimiques
16. Potentiels d'électrode
17. Périodicité des propriétés
18. Solides
19. Métaux
20. Acidité
21. Complexes
22. Polymères

23. Cinétique chimique
24. Catalyse
25. Mécanismes réactionnels
26. Electrophilie et nucléophilie
27. Couleur
28. Modification de groupes fonctionnels
29. Modification de chaîne carbonée

## 4. DÉROULEMENT DES ÉPREUVES

### SESSION 2013

#### EPREUVES ECRITES

Les épreuves écrites se sont déroulées les 24 et 25 janvier 2013.

#### EPREUVES ORALES

##### Conditions matérielles et généralités

Les épreuves d'admission se sont déroulées au Lycée Saint-Louis à Paris du 28 avril au 5 mai 2013. La délibération du jury et la proclamation des résultats ont eu lieu le 6 mai 2013.

Les candidats admissibles reçoivent une convocation pour une série d'oral, comportant deux épreuves.

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

- exposé de physique (coefficient 1) et montage de chimie (coefficient 1)

ou bien

- exposé de chimie (coefficient 1) et montage de physique (coefficient 1).

Ces enveloppes sont ouvertes par le candidat au début de chacune des épreuves, qui commencent dès le lendemain du tirage au sort. Lors de la session 2013, les horaires ont été les suivants :

Ouverture du sujet	6 h 00	7 h 20	8 h 40	11 h 30	12 h 50	14 h 10
Début de l'épreuve	10 h 00	11 h 20	12 h 40	15 h 30	16 h 50	18 h 10

Une épreuve se déroule de la façon suivante :

- ouverture du sujet tiré au sort : un sujet obligatoire pour les exposés, et un sujet à choisir parmi deux proposés pour le montage ;
- 4 h de préparation à l'épreuve ;
- 1 h 20 d'épreuve :
  - pour l'épreuve d'exposé : 50 min pour l'exposé du candidat, le reste du temps pouvant être utilisé par le jury pour les questions.
  - pour l'épreuve de montage : les questions du jury peuvent être posées tout au long de la présentation.

**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 leur convocation ainsi que d'une blouse pour les épreuves de chimie.

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

Le matériel ainsi que les livres et documents, vidéos, logiciels et animations numériques 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 complet de ce qui est apporté, ainsi qu'une notice de fonctionnement pour chaque appareil. L'ensemble doit être récupéré le jour de la proclamation des résultats.

## Les équipes techniques

Pour le tirage au sort et pour chacune des deux 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 la préparation de l'épreuve pour lui fournir les livres, les documents et les appareils dont il a besoin. Ils apportent les indications nécessaires au bon fonctionnement du matériel (sécurité notamment) et participent à la mise en œuvre de celui-ci en effectuant les branchements nécessaires.

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

Les techniciens assistent le candidat dans la prise en main du matériel, en particulier, dans celle des appareils dont la diffusion est récente (spectromètres dits « de poche » ou « USB », flexcam, webcam, tableau numérique, vidéoprojecteurs...) et dans celle des outils informatiques ou numériques. Cependant, une connaissance minimale de ces derniers est indispensable au candidat. Tous ces outils, qui sont une aide très appréciable pour les expériences, sont 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 **exposés de physique ou de chimie**, les techniciens fournissent au candidat **une aide** à 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'avantage 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 deux 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.

## 5. INFORMATIONS STATISTIQUES

40 places ont été mises au concours de l'agrégation interne, et 11 au CAERPA.

Les tableaux ci-dessous donnent les informations générales relatives aux candidats du concours 2013, et les comparent aux données correspondantes des dix dernières sessions.

### Agrégation interne

Année	Postes	Inscrits	Présents*	Taux de présence	Admissibles	Admis
2003	52	873	674	77,2%	101	52
2004	52	1044	833	80,6%	100	52
2005	54	1121	814	75%	106	52
2006	45	1373	957	69,7%	102	45
2007	45	1374	953	69,4%	101	45
2008	45	1353	962	71,1%	100	45
2009	45	1321	938	71,0%	94	45
2010	45	1484	964	65,0%	97	45
2011	35	1685	895	53,1%	71	35
2012	35	1546	975	63,1%	72	35
2013	40	1407	886	63,0%	83	40

### CAERPA

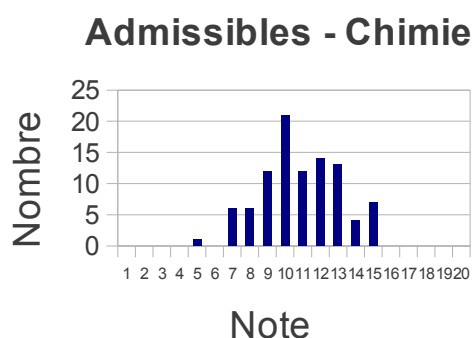
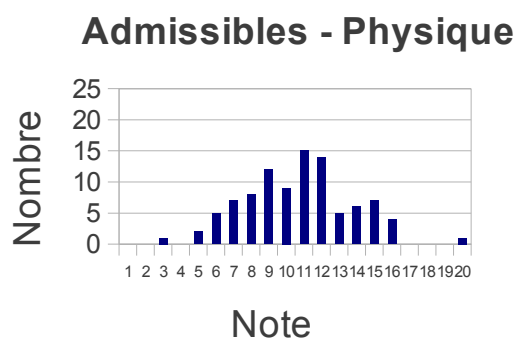
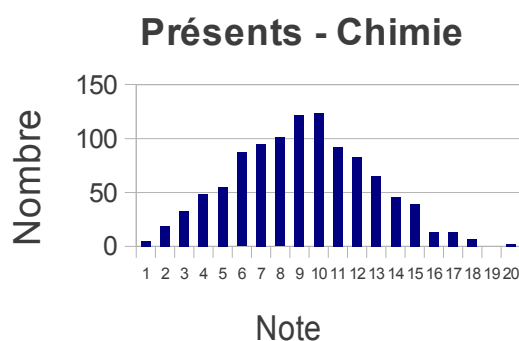
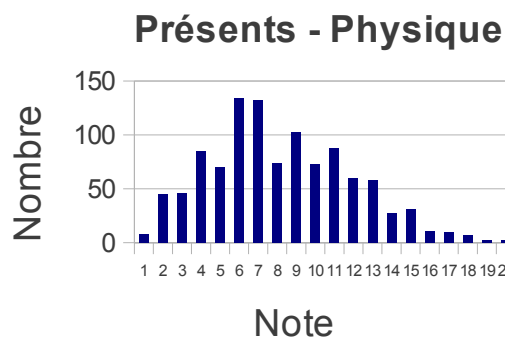
Année	Postes	Inscrits	Présents*	Taux de présence	Admissibles	Admis
2003	10	157	115	73,2%	12	4
2004	9	171	135	78,9%	14	7
2005	10	190	131	69%	10	4
2006	10	252	167	66,3%	6	2
2007	9	226	159	70,3%	7	4
2008	7	251	155	61,7%	8	4
2009	8	227	147	64,8%	14	8
2010	11	276	167	60,5%	9	4
2011	8	365	175	47,7%	13	8
2012	9	269	178	66,2%	12	7
2013	11	272	180	66,2%	13	9

\* Présents à au moins une épreuve

## ÉPREUVES ÉCRITES

	Agrégation interne	CAERPA
Composition sur la physique :		
Moyenne	7,76	7,64
Ecart-type	3,69	3,73
Note maximale	20,00	19,1
Moyenne des candidats admissibles	13,97	14,25
Ecart-type des admissibles	2,29	1,90
Composition sur la chimie :		
Moyenne	8,84	8,16
Ecart-type	3,54	3,26
Note maximale	20,00	14,90
Moyenne des candidats admissibles	14,27	13,12
Ecart-type des admissibles	2,22	1,38
Barre d'admissibilité	26,0	25,5
Nombre d'admissibles	83	13

Les figures ci-dessous présentent les distributions des notes obtenues à chacune des épreuves écrites par l'ensemble des candidats aux deux concours.



## ÉPREUVES ORALES

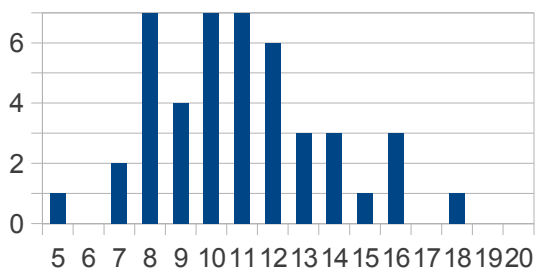
### Résultats des candidats aux épreuves orales :

Nature de l'épreuve	Moyenne des candidats présents aux épreuves orales	Ecart-type
Exposé de physique	10,23	3,05
Exposé de chimie	10,85	2,75
Montage de physique	9,91	3,88
Montage de chimie	9,96	3,41

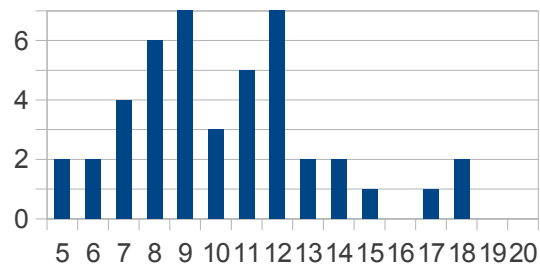
	Agrégation interne	CAERPA
Barre d'admission	48,4	47,1
Nombre d'admis	40	9

### Distribution des notes des candidats présents aux épreuves orales :

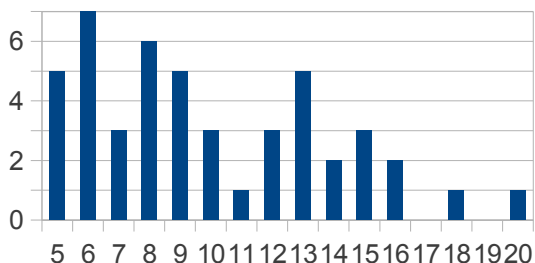
Exposé de chimie



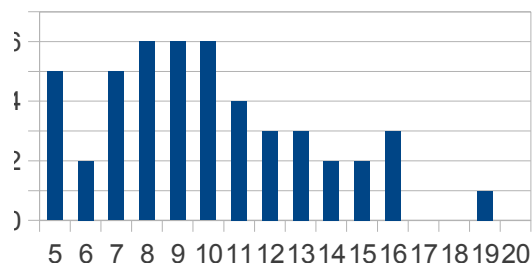
Exposé de physique



Montage de physique

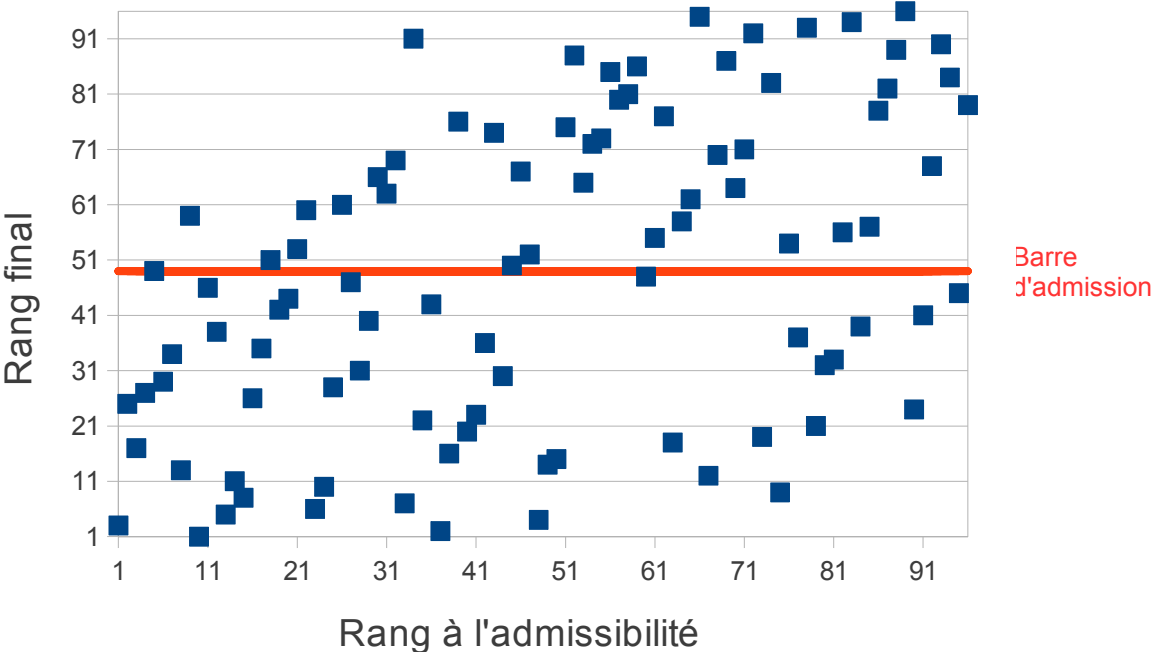


Montage de chimie





CORRÉLATION ENTRE LES RÉSULTATS DÉFINITIFS ET CEUX DE L'ADMISSIBILITÉ



## RÉPARTITION DES CANDIDATS PAR ACADÉMIE

### AGRÉGATION INTERNE

Académie	Inscrits	Présents	Admissibles	Admis
AIX-MARSEILLE	60	36	2	1
BESANCON	10	7	2	1
BORDEAUX	52	27	2	0
CAEN	25	18	5	3
CLERMONT-FERRAND	16	13	3	3
DIJON	27	15	1	1
GRENOBLE	51	32	4	3
LILLE	116	78	7	5
LYON	63	38	5	2
MONTPELLIER	63	36	3	2
NANCY-METZ	64	40	3	1
POITIERS	20	12	0	0
RENNES	37	24	1	1
STRASBOURG	55	38	5	2
TOULOUSE	48	26	1	1
NANTES	47	31	1	0
ORLEANS-TOURS	50	30	2	0
REIMS	23	17	1	0
AMIENS	50	33	2	1
ROUEN	39	26	1	1
LIMOGES	10	7	1	0
NICE	44	30	1	0
CORSE	17	12	1	0
REUNION	48	36	1	0
MARTINIQUE	16	10	0	0
GUADELOUPE	24	12	1	0
GUYANE	12	9	0	0
NOUVELLE CALEDONIE	4	1	0	0
POLYNESIE FRANCAISE	9	1	0	0
MAYOTTE	5	3	0	0
CRETEIL-PARIS-VERSAIL.	302	193	27	12



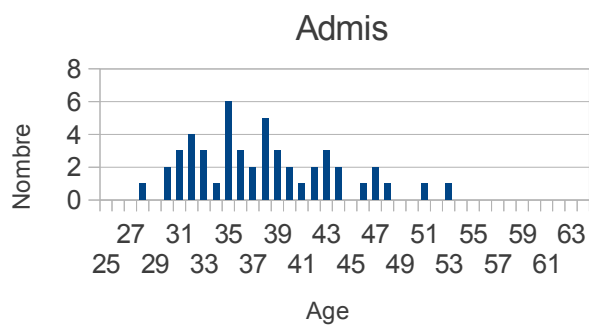
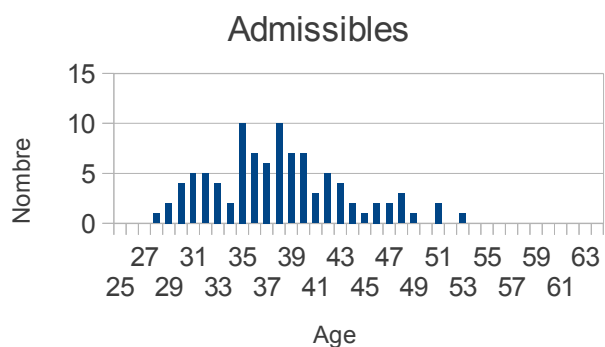
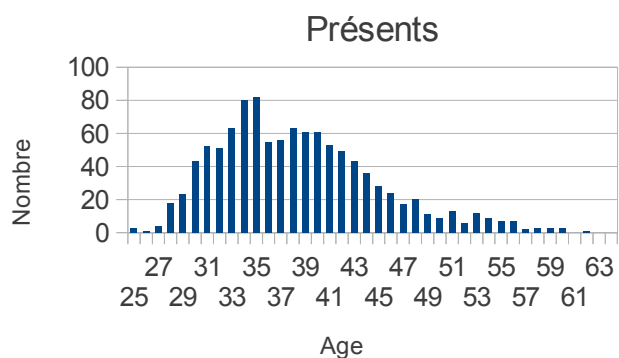
**CAERPA**

<b>Académie</b>	<b>Inscrits</b>	<b>Présents</b>	<b>Admissibles</b>	<b>Admis</b>
AIX-MARSEILLE	9	5	0	0
BESANCON	3	3	1	0
BORDEAUX	15	11	0	0
CAEN	5	2	0	0
CLERMONT-FERRAND	6	4	1	1
DIJON	10	8	0	0
GRENOBLE	14	7	1	0
LILLE	28	21	1	1
LYON	21	13	2	2
MONTPELLIER	4	2	1	1
NANCY-METZ	14	11	0	0
POITIERS	2	1	0	0
RENNES	12	8	0	0
STRASBOURG	10	7	0	0
TOULOUSE	10	5	1	1
NANTES	23	16	0	0
ORLEANS-TOURS	5	5	1	1
REIMS	3	2	0	0
AMIENS	6	3	0	0
ROUEN	3	1	0	0
LIMOGES	1	1	0	0
NICE	5	3	0	0
REUNION	2	2	1	1
MARTINIQUE	1	1	0	0
GUADELOUPE	3	2	0	0
GUYANE	2	2	0	0
NOUVELLE CALEDONIE	2	1	0	0
POLYNESIE FRANCAISE	2	1	0	0
CRETEIL-PARIS-VERSAIL.	51	33	3	1

## RÉPARTITION DES CANDIDATS PAR SEXE

2013	AGREGATION INTERNE			CAERPA		
	présents	admissibles	admis	présents	admissibles	Admis
HOMMES	578	65	31	107	8	6
	65%	78%	77%	59%	62%	67%
FEMMES	313	18	9	74	5	9
	35%	22%	23%	41%	38%	33%

## RÉPARTITION DES CANDIDATS PAR AGE



# SUJET DE PHYSIQUE

## Indications générales :

- Les vecteurs sont notés en caractères gras. Par exemple la norme du vecteur  $\mathbf{A}$  sera notée  $A = \|\mathbf{A}\|$

## À la recherche des ondes gravitationnelles

Cette composition, dont le thème central est la mise en évidence des ondes gravitationnelles, est constituée de deux parties indépendantes.

- Dans une première partie, on étudie le système binaire de deux étoiles compactes découvert par Hulse et Taylor en 1974 qui met en évidence de façon indirecte l'existence d'ondes gravitationnelles.
- La seconde partie porte sur un dispositif de détection directe d'ondes gravitationnelles par une technique interférométrique qui pourrait permettre d'ouvrir une nouvelle fenêtre observationnelle sur l'Univers.

## I Le système binaire PRS 1913+16

On étudiera dans cette première partie quelques caractéristiques d'un système de deux étoiles à partir d'informations générales contenues dans un texte documentaire et des données de Hulse et Taylor (*Discovery of a pulsar in a binary system*, Hulse and Taylor, *Astro. Phys. Journal* **195**, L51-L53, 1975).

### I.1 Quelques informations sur l'objet céleste répertorié sous la désignation : PSR B1913+16.

#### I.1.1 Analyse d'un document

Le questionnement de la première partie de l'épreuve (partie I) s'appuie sur les informations données dans le document 1 et utilise les données rassemblées dans les annexes A.1, A.3, A.4 et A.5

On répondra aux questions Q1 à Q7 après avoir pris connaissance du document 1.

- Q1.** Donner la définition d'une année-lumière. Dédurre de cette définition sa valeur en unités SI.
- Q2.** Qu'appelle-t-on « Voie lactée » ? Quel est l'ordre de grandeur de ses dimensions en années-lumière ? Comparer la distance séparant le pulsar 1913+16 de la Terre à celle séparant le Soleil de la Terre.
- Q3.** Quels sont ces « instruments actuels » qui peuvent permettre de détecter les pulsars ?
- Q4.** Peut-on affirmer que le pulsar existe au moment de son observation, en 1974 ?
- Q5.** Calculer, d'après les données du texte, un ordre de grandeur de la masse volumique d'un pulsar. Proposer alors une justification de l'appellation « *d'étoile à neutrons* » en utilisant les données de l'annexe A.1.
- Q6.** Si le document 1 était donné à lire à des élèves de classe de terminale S, il serait certainement utile de s'assurer de leur bonne compréhension du texte, dès la lecture du premier paragraphe. Les expressions suivantes : « *sources radios* », « *après avoir consommé tout son carburant nucléaire* », « *s'effondre* », sont chargées d'implicite. Rédiger, pour chacune de ces expressions, une ou plusieurs questions écrites à poser aux élèves qui leur permettent d'en décoder le sens physique. Rédiger également, en quelques lignes, les réponses attendues.

- Q7.** Ce texte laisse entendre que la découverte du pulsar est le fruit du hasard. Pensez-vous qu'il faille conforter les élèves dans cette vision de l'élaboration du savoir scientifique par les chercheurs ? Argumenter votre réponse à l'aides d'exemples décrits brièvement.

### Document 1 – Les pulsars

*Le premier pulsar a été découvert en 1967. Il s'agit d'une étoile à neutrons, c'est-à-dire une étoile arrivée à l'ultime étape de son évolution ; l'étoile, après avoir consommé tout son carburant nucléaire, s'effondre sous l'action des forces gravitationnelles. Elle renferme alors une masse proche de celle du Soleil, dans une sphère de quelques dizaines de kilomètres de diamètre.*

*Un pulsar tourne sur lui-même à une fréquence qui peut aller jusqu'à plusieurs centaines de tours par seconde et émet un fort rayonnement électromagnétique dans la direction de son axe magnétique. Comme celui-ci n'est en général pas parfaitement aligné avec l'axe de rotation, le pulsar émet un faisceau qui balaie un cône au cours du temps, un peu à la manière d'un phare côtier. Un pulsar se signale donc pour un observateur situé sur son cône d'émission par un signal périodique, dont la période est la période de rotation de l'astre. Un pulsar est une horloge naturelle très stable au cours du temps. Les astronomes ont aujourd'hui recensé presque 1800 pulsars dans la Voie lactée.*

*C'est en 1974, au cours d'une recherche systématique des sources radios stellaires, que les radioastronomes Hulse et Taylor découvrirent le pulsar PSR B1913+16 situé à une distance de  $2,3 \times 10^4$  années-lumière (al) de la Terre. Celui-ci présente une variation cyclique inhabituelle de sa période qu'ils attribuèrent à la présence d'un compagnon invisible avec les instruments actuels. La masse de ce compagnon, connue très précisément, suggère qu'il s'agit aussi d'une étoile à neutrons qui pourrait éventuellement être un pulsar, mais dont le faisceau d'émission ne balayerait pas notre système solaire. PSR B1913+16 est le premier représentant découvert de la classe des pulsars binaires.*

*Il est aussi l'un des plus étudiés, du fait de ses caractéristiques orbitales très intéressantes. En effet, l'orbite de ce système est extrêmement resserrée, les deux astres orbitant dans un volume qui pourrait presque être compris à l'intérieur du Soleil, sa période orbitale étant voisine de 7,75 heures. Le pulsar et son compagnon suivent des orbites elliptiques autour de leur centre de masse. Chaque étoile se déplace sur son orbite en accord avec les lois de Kepler : à tout instant les 2 étoiles se situent aux extrémités d'un segment passant par le centre de masse.*

*L'étude de ce pulsar, poursuivie durant de nombreuses années, a permis de mettre en évidence une diminution progressive de la période orbitale du système, correspondant à un resserrement des orbites, qu'on attribue à une perte d'énergie par rayonnement d'ondes gravitationnelles. Cette découverte, qui valide de façon indirecte la théorie de la relativité générale, valut le prix Nobel en 1993 aux deux découvreurs.*

#### I.1.2 Estimation de la taille d'un pulsar

On suppose qu'une étoile est une sphère homogène de masse  $M$  et de rayon  $R$ , assimilable à un solide en rotation autour d'un axe passant par son centre, avec une vitesse angulaire  $\Omega$ .

- Q8.** Ces hypothèses sont-elles réalistes ?

- Q9.** À partir de la définition du moment d'inertie  $I$  d'un solide par rapport à son axe de rotation, montrer, par exemple par analyse dimensionnelle, que le moment d'inertie de l'étoile s'écrit sous la forme

$$I = kM^\alpha R^\beta$$

où  $k$  est une constante qu'on ne cherchera pas à expliciter, et  $\alpha$  et  $\beta$  des nombres entiers dont on établira les valeurs.

Donner l'expression du moment cinétique  $\mathbf{L}$  de l'étoile en fonction de  $I$  et de  $\Omega$ .

- Q10.** Une étoile à neutrons est l'ultime étape d'évolution d'une étoile lorsque celle-ci, après avoir consommé tout son carburant nucléaire, s'effondre sous l'action des forces gravitationnelles, passant d'une étoile de rayon  $R_i$ , voisin du rayon du Soleil, à un rayon  $R_f$  beaucoup plus petit.
- (a) Si on néglige la perte de masse qui a lieu au cours de cette transformation et que l'on considère l'étoile comme isolée, exprimer le rayon final  $R_f$  en fonction de  $R_i$  et des périodes de rotation  $T_i$  et  $T_f$  de l'étoile avant et après la contraction.
- (b) Application numérique : on prendra  $R_i = R_\odot$  rayon du Soleil,  $T_i = 25$  jours et  $T_f = 1$  ms. Calculer  $R_f$  et commenter ce résultat.

## I.2 Effet Doppler-Fizeau

### I.2.1 Théorie

- Q11.** Indiquer deux exemples d'effet Doppler, l'un tiré de l'acoustique (effet Doppler proprement dit) et l'autre de l'optique (ou effet Doppler-Fizeau).
- Q12.** Quelle théorie repose sur l'hypothèse que la vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels galiléens ? Sur quelle autre hypothèse, impliquant les lois de la physique, cette théorie repose-t-elle également ?
- Q13.** On considère une source émettant périodiquement des impulsions et on suppose que cette source est en mouvement à la vitesse  $v$  constante en direction d'un observateur au repos dans le référentiel d'étude. On suppose  $v \ll c$  pour négliger tout effet relativiste, ce qui permet de mener les calculs dans le cadre de la physique classique. Soit  $T_p$  la période du signal mesurée dans un référentiel où la source est au repos et  $T'_p$  la période mesurée par l'observateur. Montrer que ces deux périodes sont reliées par la relation

$$T'_p = T_p \left( 1 - \frac{v}{c} \right)$$

- Q14.** Vérifier que cette relation permet de rendre compte de l'effet Doppler-Fizeau mentionné plus haut.
- Q15.** On suppose à présent que le déplacement de la source se fait à une vitesse  $\mathbf{v}$  qui n'est pas colinéaire au vecteur unitaire  $\mathbf{u}$  qui relie la source à l'observateur. Montrer que la variation relative de la période mesurée par l'observateur s'écrit

$$\frac{\Delta T_p}{T_p} = \frac{T'_p - T_p}{T_p} = -\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{u}}{c}$$

En déduire la variation de longueur d'onde correspondante

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = -\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{u}}{c}$$

- Q16.** Comment expliquer qualitativement la variation cyclique de la période du signal émis par le pulsar binaire PSR B1913+16 mentionnée dans le document 1 ?

### I.2.2 Mise en œuvre d'une activité expérimentale en classe de terminale S

Dans le cadre des programmes en vigueur (voir annexe A.5), un professeur souhaite faire réaliser à ses élèves de terminale S une détermination de la période de rotation de Jupiter autour d'elle-même à partir d'un traitement d'image réalisé avec un logiciel adapté. Il fait des recherches sur internet pour



obtenir des données d'observations astronomiques qui pourraient lui permettre de bâtir une activité d'exploitation de documents portant sur l'effet Doppler-Fizeau. Ce professeur trouve un site proposant des clichés de spectres de la lumière émise par la planète Jupiter réalisés par des astronomes amateurs et, notamment, l'image d'un spectre obtenu avec un télescope équipé d'un spectrographe à réseau de 2400 traits/mm, équipé d'une fente de largeur  $30\ \mu\text{m}$  alignée sur l'équateur de la planète Jupiter. Le spectre montre des raies inclinées et des raies droites, les deux plus contrastées étant identifiées comme les deux raies du sodium. Quelques commentaires des astronomes amateurs explicitent les données d'observation, le tout est rassemblé dans le document 2. Le professeur a exploité le cliché au moyen du logiciel de pointage d'image *SalsaJ* et les résultats de ses mesures figurent sur le document 3.

### Questions :

- Q17.** Quelques points importants devront être explicités aux élèves pour qu'ils parviennent à exploiter les informations contenues dans l'image. Répondre à ces questions :
- (a) De quel type de spectre s'agit-il en comparaison avec les exemples qu'ils ont pu rencontrer au cours de leur scolarité? Sachant qu'il n'y a pas d'atomes de sodium dans l'atmosphère de Jupiter, justifier la présence de ces raies de sodium dans le spectre observé.
  - (b) Proposer une expérience simple permettant de faire comprendre aux élèves comment il est possible, à l'aide d'un réseau, d'une part de visualiser le spectre d'émission d'une source et d'autre part de déterminer la longueur d'onde d'une raie de longueur d'onde inconnue si l'on connaît la longueur d'onde d'au moins deux raies présentes dans le même spectre. On s'appuiera sur un schéma du dispositif expérimental, et l'on s'attachera à souligner les analogies et les différences entre l'expérience proposée et le protocole retenu par les astronomes amateurs. Les hypothèses retenues pour l'exploitation quantitative du spectre seront explicitées.
  - (c) Pour une raie inclinée du spectre, quelles sont les parties de la raie associées au « bord » A et au « bord » B de la planète Jupiter?
  - (d) Quel est le référentiel implicitement choisi pour déterminer la vitesse équatoriale de Jupiter?
  - (e) Quelles justifications qualitatives peut-on formuler pour expliquer le facteur 4 dans la relation entre la vitesse équatoriale, l'écart de longueur d'onde et la longueur d'onde moyenne de la raie observée?
  - (f) Déterminer la valeur de la vitesse équatoriale de Jupiter en conduisant l'exploitation que les élèves vont devoir faire avec le logiciel. Estimer l'incertitude de la mesure et en déduire un encadrement de la période de rotation de Jupiter autour d'elle-même. Comparer le résultat aux données numériques du document 2.

- Q18.** Concevoir une activité de deux heures environ destinée à des élèves de terminale S, utilisant les documents précédents. On fera l'hypothèse que les élèves disposent des prérequis nécessaires sur l'effet Doppler. La compétence exigible du programme particulièrement mobilisée dans l'activité à construire est la suivante : « *Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mesurer une vitesse en utilisant l'effet Doppler* ».

*Indications pour rédiger cette question :*

En 500 mots maximum et éventuellement quelques schémas :

- Préciser l'environnement matériel prévu pour cette séance, la gestion de classe envisagée, ainsi que les informations pratiques données aux élèves avant d'accomplir les tâches demandées.

**Document 2** – Commentaires sur le spectre de la lumière issue de l'équateur de Jupiter, reçue par la fente du spectroscopie et dispersée par le réseau.

On obtient un spectre dans lequel certaines raies d'absorption sont inclinées. Cela est provoqué par la rotation de la planète : le bord qui s'approche de nous voit son spectre décalé vers le bleu par rapport au centre de la planète, par effet Doppler-Fizeau. Le bord qui s'éloigne de la même façon voit son spectre décalé vers le rouge. À noter les autres raies présentes dans le spectre mais bien verticales : ce sont les raies d'absorption de l'atmosphère terrestre (raies telluriques) ; il est normal qu'elles ne soient pas inclinées puisque l'atmosphère est fixe par rapport à nous.

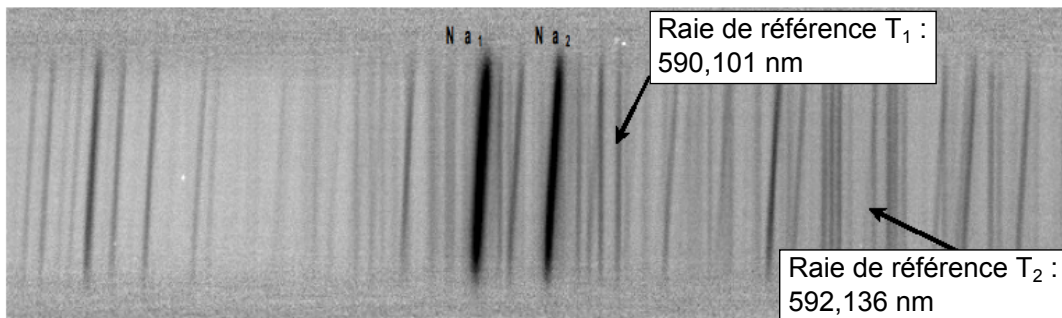
La simplicité de cette mesure tient, outre le faible temps de pose et la facilité de pointer l'objet, au fait que toute l'information est contenue dans l'image : c'est à l'inclinaison relative des raies de Jupiter par rapport à celles de l'atmosphère terrestre que l'on va s'attacher.

La période de rotation de Jupiter autour d'elle-même est de 9,92 heures, et son diamètre équatorial est de  $1,43 \cdot 10^5$  km. Au laboratoire, sur Terre, les raies du doublet du sodium ont pour longueur d'onde  $\lambda_1(\text{Na}) = 588,995$  nm et  $\lambda_2(\text{Na}) = 589,592$  nm.

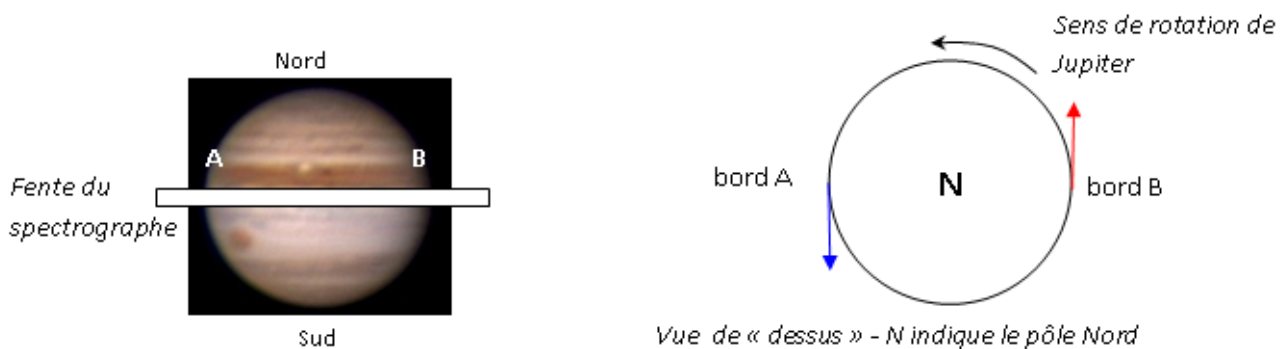
En mesurant, avec un logiciel de traitement d'images le décalage de longueur d'onde aux deux bords extrêmes des raies inclinées, on peut calculer la vitesse d'un point de l'équateur de la planète par rapport au centre de la planète (qu'on nommera en raccourci vitesse équatoriale) par la relation :

$$V_e = \frac{1}{4} c \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

(a) Image du spectre recadré sur laquelle 2 raies telluriques connues sont repérées



(b) Positionnement de la fente du spectroscopie par rapport à l'équateur de Jupiter



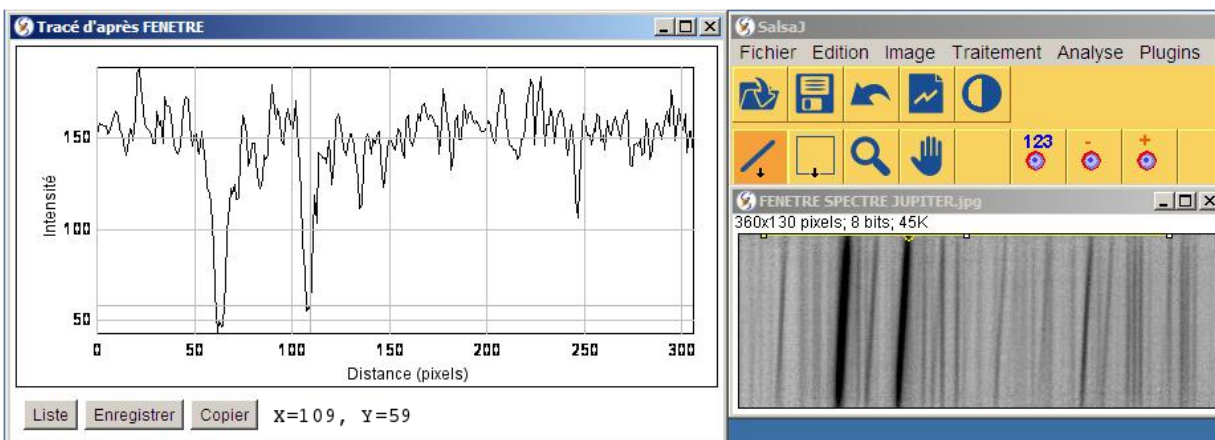
**Document 3** – *Exploitation réalisée par le professeur avec le logiciel de traitement d'images SalsaJ 2.1*

Développé dans le cadre du projet EU-HOU (Europe, Hands-On Universe), le logiciel gratuit SalsaJ permet aux élèves des collèges et lycées de s'initier au traitement et à l'analyse d'images en classe. À partir d'images d'astronomie obtenues par des télescopes professionnels, ou même directement depuis la classe avec des télescopes robotisés, les élèves peuvent découvrir des planètes, mesurer des cratères et des volcans, obtenir des « coupes » de spectres à partir d'une photographie, mesurer des longueurs d'ondes...

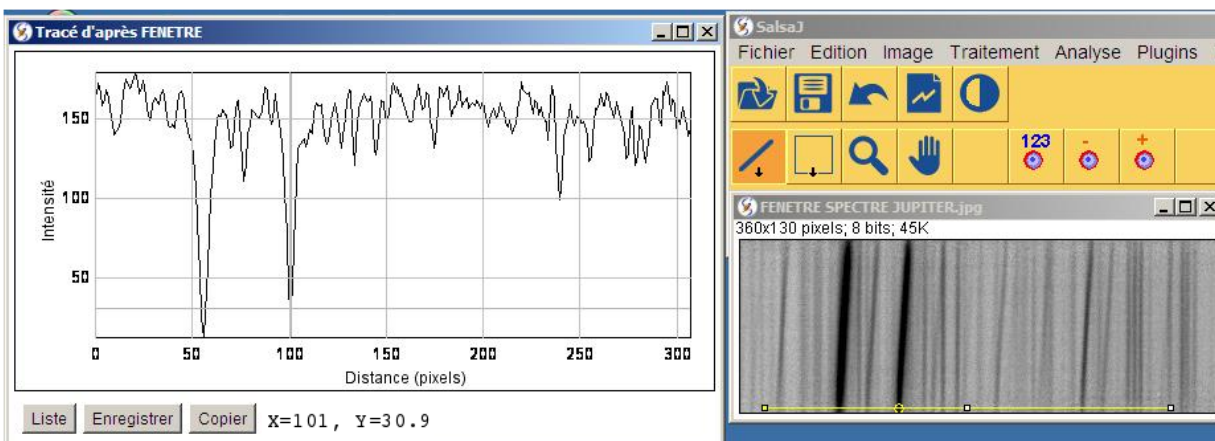
(a) Tableau d'étalonnage de l'écran

	Raie T1	Raie T2	Écart
Lecture en pixel	185	347	162
Longueur d'onde en nm	590,101	592,136	2,035

(b) Coupe haute du spectre



(c) Coupe basse du spectre



- Décrire les tâches demandées aux élèves en précisant les documents dont ils disposent. Rédiger les réponses attendues.

*Remarque* : Au cas où certains éléments correspondent à des réponses déjà écrites aux questions 17a à 17f, on évitera de les répéter en prévoyant alors de faire un renvoi vers la réponse donnée.

### I.3 Caractéristiques du système binaire

On se propose maintenant de déterminer les paramètres orbitaux du pulsar binaire.

#### I.3.1 Transformation du problème à deux corps en problème à un corps

On modélise le pulsar binaire par un système de deux étoiles de masse  $m_1$  et  $m_2$  supposées ponctuelles (1 désigne le pulsar et 2 son compagnon). On note  $G_1$  et  $G_2$  les centres de masse des 2 étoiles. On suppose de plus que les deux étoiles forment un système isolé du reste de l'Univers et agissent l'une sur l'autre au moyen de l'interaction gravitationnelle.

- Q19.** Quels commentaires peut-on faire à des élèves de terminale S à propos des 2 hypothèses énoncées ci-dessus (étoiles supposées ponctuelles et système isolé) ?
- Q20.** Rappeler l'expression de la force de gravitation universelle que chacune des étoiles exerce sur l'autre.
- Q21.** Définir le centre de masse  $G$  du système et le référentiel du centre de masse  $\mathcal{R}^*$  associé. Montrer que ce référentiel est un référentiel galiléen.
- Q22.** Dans la suite, on se placera dans le référentiel  $\mathcal{R}^*$ . Comment peut-on justifier ce choix ?
- Q23.** Soit  $\mathbf{r}_1 = \mathbf{G}G_1$  le vecteur position du pulsar et  $\mathbf{r}_2 = \mathbf{G}G_2$  celui de son compagnon évalué dans  $\mathcal{R}^*$ . On notera  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$  le vecteur position relative.
- (a) Montrer que l'étude du mouvement des deux étoiles se ramène à celui d'une particule fictive  $P$  de masse  $\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$  soumise à une force centrale égale à la force  $\mathbf{F}$  qu'exerce l'étoile 2 sur l'étoile 1.
- (b) En déduire que les caractéristiques de la trajectoire du pulsar (resp. de son compagnon) se déduisent de celle de la particule fictive  $P$  par une homothétie dont on précisera le centre et dont on exprimera le rapport  $\eta$  (resp  $\eta - 1$  pour la particule 2) en fonction de  $m_1$  et  $m_2$ .
- Q24.** Énergie et moment cinétique

- (a) Exprimer l'énergie mécanique  $E$  du système binaire dans  $\mathcal{R}^*$ . Montrer que celle-ci s'écrit à l'aide des paramètres de la particule fictive sous la forme

$$E = \frac{1}{2} \mu \mathbf{v}^2 - \frac{k}{r}$$

où  $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$ ,  $r = \|\mathbf{r}\|$  et  $k = Gm_1 m_2$ .

- (b) Exprimer le moment cinétique  $\mathbf{L}$  du système binaire et montrer que celui-ci s'écrit à l'aide des paramètres de la particule fictive

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \wedge \mu \mathbf{v}$$

### I.3.2 Paramètres orbitaux

On admet que la trajectoire de la particule fictive introduite ci-dessus est une ellipse. En annexe, sont rappelées les propriétés essentielles des ellipses ainsi que les notations utilisées.

- Q25.** Rappeler, dans le cadre du système solaire, l'énoncé des 3 lois de Kepler. Comment se situent chronologiquement les travaux de Kepler en comparaison des résultats connus en astronomie à son époque ? Décrire brièvement la démarche de Kepler pour aboutir à l'énoncé de ces lois.
- Q26.** En utilisant le fait que le système est isolé, montrer que le mouvement de la particule fictive est contenue dans un plan.
- Q27.** Par la suite on travaillera dans ce plan et on choisira un repère polaire  $(r, \theta)$  centré en  $G$ .
- Démontrer la deuxième loi de Kepler (loi des aires).
  - On pose  $C = L/\mu$  avec  $L = \|\mathbf{L}\|$  le module du moment cinétique ; montrer que dans le cas d'une trajectoire elliptique on a la relation

$$C = \frac{2\pi}{T}ab$$

où  $a$  et  $b$  sont respectivement les demi-grand axe et demi-petit axe de l'ellipse de la *particule fictive* et  $T$  la période de révolution du système binaire.

- Q28.** Troisième loi de Kepler. On considère le mouvement circulaire d'une masse  $m$  autour d'une masse  $M$  très supérieure à  $m$ . Établir que le rayon  $R$  de l'orbite et la période  $T$  de révolution sont reliés par

$$\frac{R^3}{T^2} = c^{ste}$$

où l'on exprimera la constante en fonction de  $G$ , de  $M$  et de constantes numériques.

On admettra que cette relation reste valable dans le cas d'un système binaire quelconque de trajectoire elliptique à condition de remplacer  $R$  par le demi-grand axe  $a$  de l'ellipse et  $M$  par la masse totale du système binaire.

- Q29.** L'observateur placé sur Terre est repéré par rapport au système binaire par le vecteur unitaire  $\mathbf{u}$ , incliné d'un angle  $i$  par rapport à l'axe  $z$  perpendiculaire au plan de l'orbite (cf figure 1). L'étude complète des paramètres orbitaux montre de plus que le vecteur  $\mathbf{u}$  est situé dans le plan  $(yFz)$  avec une projection dans le plan orbital dirigée en sens opposé de l'axe  $Fy$ . Les axes  $x$  et  $y$  sont les axes « canoniques » de l'ellipse correspondant aux notations de l'annexe.

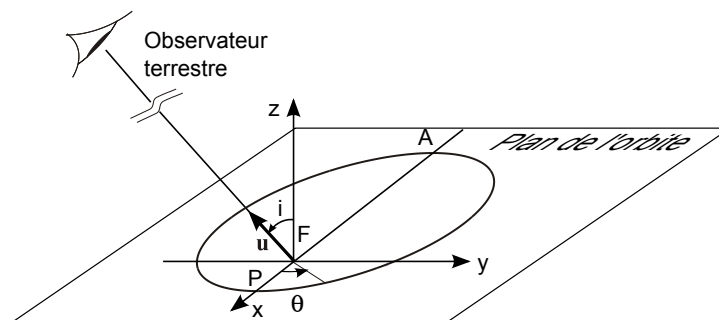


Figure 1 – Plan de l'orbite vu par un observateur terrestre

(a) Établir que  $\mathbf{v} \cdot \mathbf{u}$  s'écrit

$$\mathbf{v} \cdot \mathbf{u} = -K [e + \cos \theta]$$

où  $K = \frac{C \sin i}{p}$  et  $e$  est l'excentricité de l'orbite.

*Indications* : on montrera tout d'abord que la composante orthoradiale de la vitesse est  $v_\theta = \frac{C}{r}$ , puis, à l'aide de la relation 1 de l'annexe A.2 que la composante radiale de la vitesse est  $v_r = C \frac{\sin \theta}{p} e$ .

(b) Montrer que l'on a la relation

$$K = \frac{2\pi a \sin i}{T\sqrt{1-e^2}}$$

où  $T$  est la période orbitale du système binaire.

(c) On note  $\mathbf{v}_1$  la vitesse du pulsar et on définit sa vitesse radiale par  $V_{\text{rad}} = \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{u}$ . Montrer que

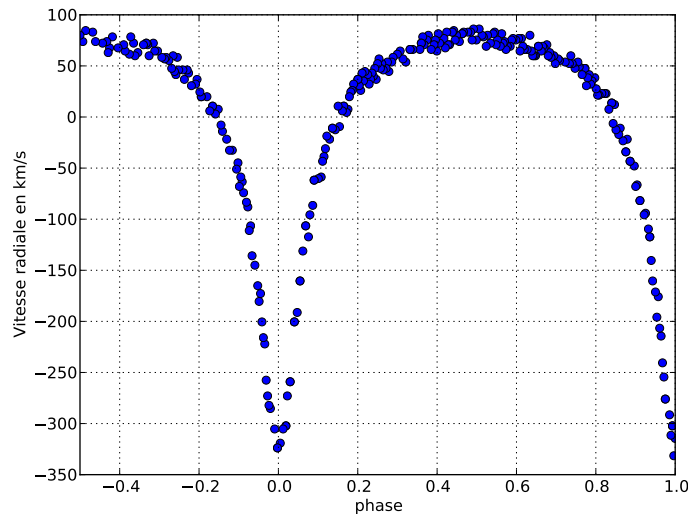
$$V_{\text{rad}} = -K_1 [e + \cos \theta]$$

avec

$$K_1 = \frac{2\pi a_1 \sin i}{T\sqrt{1-e^2}}$$

où  $a_1$  est le demi-grand axe de l'orbite du pulsar (et non de la particule fictive).

**Q30. Analyse du graphe donné par Hulse et Taylor.** (cf. figure 2) En abscisse est représentée la phase, c'est-à-dire le temps en unité de période de révolution  $T$  du système normalisé tel qu'à  $t = 0$  le pulsar est au périastre. En ordonnée est représentée la vitesse radiale mesurée en utilisant l'effet Doppler et exprimée en km/s.



**Figure 2** – Vitesse radiale du Pulsar PSR B1913+16, d'après l'article de Hulse et Taylor

- Discuter qualitativement la forme de la courbe présentée.
- Déterminer la valeur de  $K_1$  et celle de l'excentricité  $e$  à partir de cette courbe.
- La période de révolution du système binaire est  $T = 7 \text{ h } 45 \text{ mn}$ . En déduire la valeur  $a_1 \sin i$  du produit du demi-grand axe de l'orbite du pulsar par le sinus de l'inclinaison de l'orbite par rapport à l'observateur.

**Q31.** Un paramètre important caractéristique des systèmes binaires est la fonction de masse  $f$  définie par la relation :

$$f = \frac{(m_2 \sin i)^3}{M^2}$$

(a) À partir de l'expression de  $K_1$  en fonction de  $a_1 \sin i$ ,  $T$  et  $e$  établie plus haut et la troisième loi de Kepler, montrer que

$$f = \frac{T}{2\pi G} K_1^3 (1 - e^2)^{3/2}$$

(b) En utilisant les valeurs numériques de  $K_1$  et  $e$  déterminées plus haut montrer que

$$f = 0,13 M_\odot$$

où on rappelle que  $M_\odot$  est la masse du Soleil.

(c) On a pu mesurer un peu plus tard que  $i = 46^\circ$ . En faisant l'hypothèse que  $m_1 = m_2$ , en déduire la masse du pulsar en unité de masse solaire.

## I.4 Ondes gravitationnelles

L'étude sur une dizaine d'années de ce système binaire a montré une diminution de la période orbitale correspondant à un resserrement de l'orbite du pulsar que l'on a pu attribuer à une perte d'énergie par rayonnement d'ondes gravitationnelles. Afin de retrouver un ordre de grandeur de cette diminution de la période orbitale, on se placera dans l'hypothèse simplificatrice d'une orbite circulaire et d'une masse identique pour le pulsar et son compagnon :  $m_1 = m_2 = m$ . Pour les applications numériques on prendra  $m = 1,4 M_\odot$ .

### I.4.1 Pertes par rayonnement

On montre en relativité générale que la puissance rayonnée  $P_r$  d'ondes gravitationnelles d'un système de moment cinétique  $L$  et tournant à la vitesse angulaire  $\omega$  s'écrit

$$P_r = \frac{32GL^2\omega^4}{5c^5}$$

où  $G$  est la constante de gravitation universelle et  $c$  la vitesse de la lumière.

**Q32.** On note  $R$  la distance entre les deux étoiles du système binaire et on suppose pour le moment que le mouvement est parfaitement circulaire.

*Remarque :* on pourra utiliser les résultats de la question 24

(a) Montrer que le moment cinétique du système s'écrit avec ces hypothèses

$$L = \frac{m}{2} R^2 \omega$$

où  $\omega$  est la vitesse angulaire de rotation que l'on exprimera en fonction de la période de révolution  $T$ .

(b) Montrer que l'énergie totale du système s'écrit

$$E = -\frac{Gm^2}{2R}$$

(c) Montrer que  $R$  et la période de révolution  $T$  sont reliés par la relation

$$R = \left( \frac{Gm}{2\pi^2} \right)^{1/3} T^{2/3}$$

En déduire l'expression de l'énergie totale en fonction de  $T$

**Q33.** On tient compte à présent de la perte d'énergie par rayonnement.

- (a) Relier la perte d'énergie du système  $\frac{dE}{dt}$  à la puissance rayonnée.
- (b) Évaluer la perte d'énergie sur une révolution et la comparer à l'énergie totale du système.
- (c) En précisant la nature de l'approximation effectuée, déduire le taux de variation de la période orbitale du pulsar

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{384 \pi^2 (2\pi^2)^{1/3}}{5 c^5} \left( \frac{Gm}{T} \right)^{5/3}$$

(d) Application numérique : on prendra  $m = 1,4M_{\odot}$  et  $T = 7 \text{ h } 45 \text{ mn}$  qui est la période orbitale actuelle.

On notera  $\dot{P}_b \equiv \frac{dT}{dt}$  ce taux de variation de  $T$  évalué pour la période de révolution actuelle. Comparer et commenter les éventuels écarts avec la valeur mesurée :

$$\dot{P}_b = 2,4 \times 10^{-12}$$

#### I.4.2 Test du modèle

On appelle « décalage cumulé de la période » (*cumulative shift of period*) l'effet cumulé de la diminution de la période de rotation du système dû à la perte d'énergie par rayonnement gravitationnel depuis le moment de la première observation.

On note  $T_0 = 7 \text{ h } 45 \text{ mn}$  la période de rotation à l'instant  $t = 0$  pris comme origine de la première observation (année 1975) et  $T_k$  la période de la  $k^{\text{ième}}$  rotation comptée à un instant  $t_k$  d'observation. Ainsi on écrira d'après les notations de la question précédente

$$T_k = T_0 - \dot{P}_b t_k$$

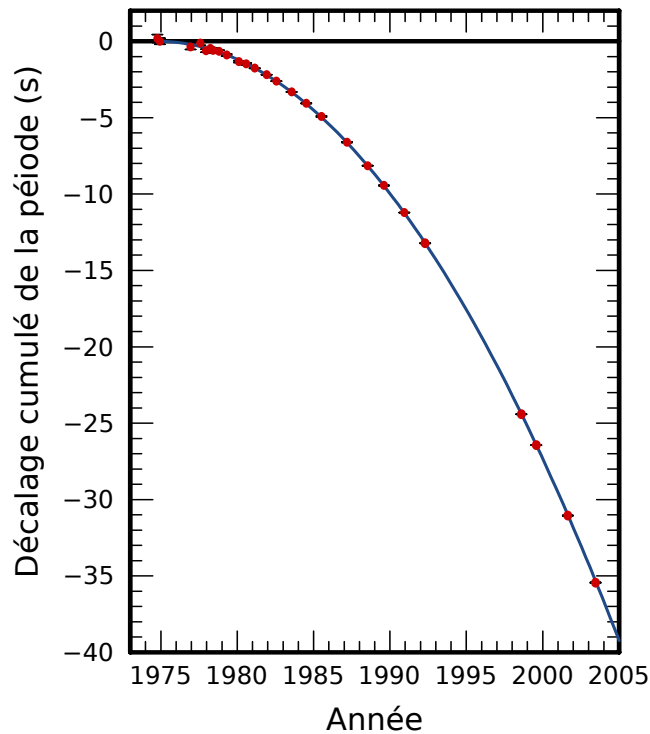
On gardera à l'esprit que la période de rotation est très courte au regard des durées d'observation du phénomène : plusieurs mois et à présent plusieurs dizaines d'années.

**Q34.** Si on note  $\Delta t_N$  le « décalage cumulé de la période » à l'instant  $t_N$  d'observation de la  $N^{\text{ième}}$  rotation, montrer que

$$\Delta t_N = -\frac{\dot{P}_b t_N^2}{2 T_0}$$

**Q35.** Vérifier que ce résultat est compatible avec les données de la figure 3. Conclure.



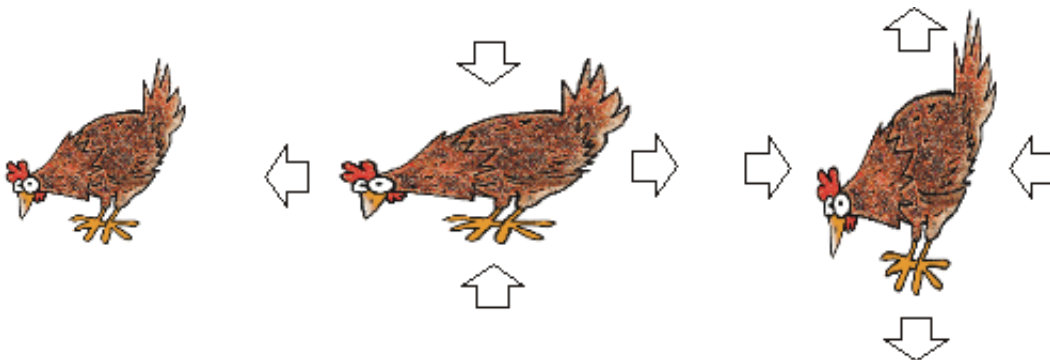


**Figure 3** – « décalage cumulé de la période » d'après l'article de Weisberg et Taylor<sup>1</sup>

## II Détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles

Une onde gravitationnelle est une perturbation de la métrique qui se propage à la vitesse de la lumière. L'effet physique associé est donc une variation de la mesure de la distance  $L$  entre deux masses test lors du passage de l'onde.

Le passage d'une onde gravitationnelle a pour effet de déformer de façon différentielle un objet comme représenté de façon schématisée sur la séquence de la figure 4. On observe que lorsque les longueurs s'allongent dans une direction, elles rétrécissent dans la direction perpendiculaire.



**Figure 4** – Séquence temporelle indiquant de façon imagée l'action sur un objet (ici une poulette) d'une onde gravitationnelle se propageant perpendiculairement au plan de la feuille. On remarquera l'action de forces différentielles de type forces de marée.

1. J.M. Weisberg, J.H.Taylor : Relativistic Binary Pulsar B1913+16 : Thirty Years of Observations and Analysis, ASP Conference Series, Vol. TBD, 2004

## Présentation du dispositif

**Q36.** Le document 4 indique le principe de fonctionnement d'un détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles.

- (a) Qu'est-ce qu'une cavité Fabry-Perot ?
- (b) Pourquoi peut-on dire que « *les photons y parcourent [...] un chemin optique de l'ordre de la centaine de kilomètres* » tandis que « *Virgo a [...] des bras de 3 kilomètres* » ?
- (c) Qu'entend-on par « *une source laser stable* » ?

On fera les hypothèses suivantes concernant la réflexion et la transmission de la lumière dans l'interféromètre et la modélisation de l'onde émise par le laser :

- les miroirs  $A_1$  et  $A_2$ , parfaitement réfléchissants, ont des coefficients de réflexion en amplitude  $r_1$  et  $r_2$  égaux à  $-1$  ;
- la lame séparatrice semi-réfléchissante est supposée sans pertes ;
- pour un faisceau lumineux incident à  $45^\circ$ , le coefficient de transmission en amplitude  $t_s$  est indépendant du sens de la traversée, de valeur  $t_s = \frac{1}{\sqrt{2}}$  ;
- toujours pour les amplitudes, le coefficient de réflexion « avant » (côté source)  $r_s$  est l'opposé du coefficient de réflexion « arrière » (côté miroir  $A_1$ )  $r'_s$ , avec  $r_s = -\frac{1}{\sqrt{2}}$  et  $r'_s = \frac{1}{\sqrt{2}}$  ;
- on notera,  $L_x$  et  $L_y$  la longueur des bras du Michelson en l'absence de perturbation et  $L = \frac{L_x + L_y}{2}$  la longueur moyenne des bras.

L'onde incidente produite par un laser est monochromatique. En tout point du dispositif, l'onde se propage dans le vide et sera décrite par une onde plane scalaire. En notation complexe, son amplitude sera choisie, avec origine au niveau de la séparatrice et pour une direction de propagation selon  $Ox$ , de la forme

$$E_{in} = E_0 e^{i\omega(t - \frac{x}{c})}$$

avec  $c$  la vitesse de la lumière dans le vide. On notera  $k = \frac{\omega}{c}$ .

### Questions :

**Q37.** Déterminer l'amplitude  $E_{out}$  de l'onde sortant vers la photodiode en fonction de celle de l'onde incidente  $E_0$ , de  $k$ ,  $L$  et  $\Delta L = L_x - L_y$ .

**Q38.** Exprimer la puissance  $P_{out}$  du faisceau sortant en fonction de la puissance d'entrée  $P_{in}$ . Montrer que cette expression se met sous la forme :

$$P_{out} = P_{in} \sin^2(k\Delta L)$$

**Q39.** Au passage de l'onde gravitationnelle, le bras dans la direction  $i$  ( $i = x, y$ ) passe de  $L_i$  à  $L_i + \delta L_i$  avec  $\delta L_x = +h \frac{L_x}{2}$  et  $\delta L_y = -h \frac{L_y}{2}$ . Compte tenu de la petitesse de la perturbation, montrer que la puissance en sortie s'écrit

$$P_{out} = P_{dc} + \delta P_{grav}$$

où  $P_{dc}$  correspond à la puissance en l'absence de la perturbation et  $\delta P_{grav}$  est le terme associé à la perturbation et a pour expression

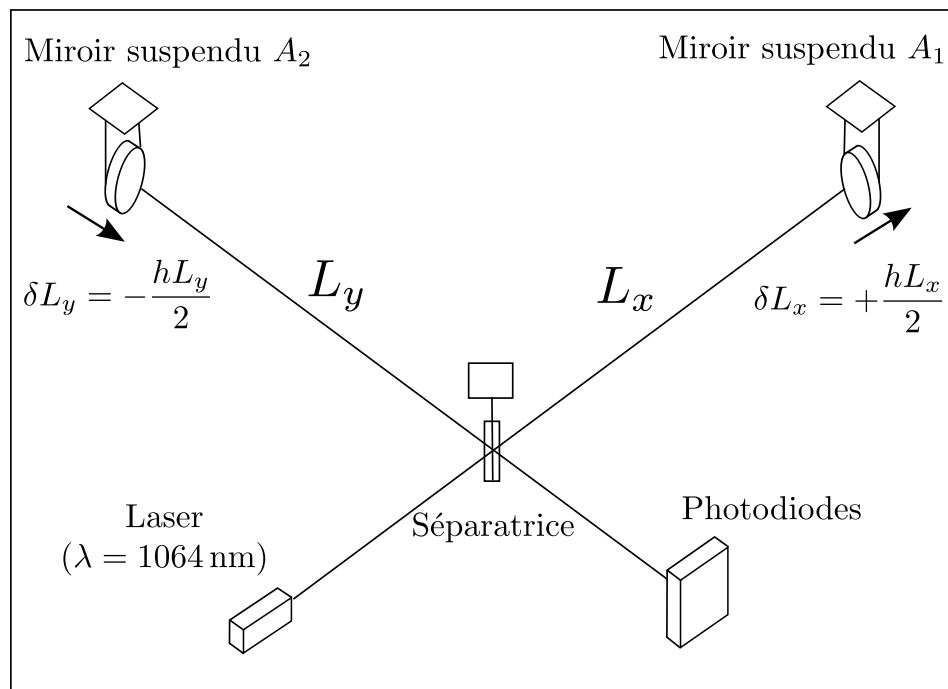
$$\delta P_{grav} = P_{in} k h L \sin(2k\Delta L)$$

Vérifier que ce résultat est bien conforme aux spécifications indiquées dans le document 4.

## Document 4 – Principe du détecteur Virgo

Depuis une dizaine d'années un certain nombre de laboratoires dans le monde (projet VIRGO en Italie, LIGO aux USA...) tentent de monter des expériences susceptibles de détecter directement des ondes gravitationnelles. Tous les détecteurs actuels reposent sur une méthode interférentielle basée sur un interféromètre de Michelson dont chaque bras mesure plusieurs kilomètres ! La variation différentielle des bras se traduisant par un défilement de franges.

On considère l'interféromètre dont le principe est représenté figure ci-dessous.



Les deux miroirs suspendus sont parfaitement réfléchissants. La variation relative maximale de distance  $\delta L$  selon une direction donnée est alors reliée à l'amplitude  $h$  de l'onde gravitationnelle détectée par la relation  $\frac{\delta L}{L} = \frac{h}{2}$ .

L'interféromètre de Michelson éclairé par une source laser stable de longueur d'onde  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  de puissance 20 W permet la mesure de la différence de phase de la lumière qui suit deux trajets orthogonaux selon les deux « bras » de longueur  $L$  de l'interféromètre. Ce déphasage est lui-même relié à la différence de chemin optique qui est justement l'effet induit par l'éventuel passage d'une onde gravitationnelle. Le déphasage est donc proportionnel à l'amplitude  $h$  de l'onde gravitationnelle détectée. Une mesure interférométrique de l'amplitude  $h$  est ainsi a priori possible. Pour atteindre une sensibilité qui permette de détecter un pulsar par exemple ( $h \sim 10^{-21}$ ) il faut cependant quelques raffinements...

Le premier paramètre sur lequel on peut jouer pour améliorer la sensibilité est la longueur des bras. Virgo a ainsi des bras de 3 kilomètres dans lesquels la lumière est « repliée » à l'aide de cavités Fabry-Perot de finesse modérée (de l'ordre de 50) ; les photons y parcourent alors un chemin optique de l'ordre de la centaine de kilomètres. De plus, une valeur élevée de  $L$  permet de diminuer l'influence des bruits de mesure (bruit sismique ou bruit thermique par exemple).

Un second facteur d'amélioration est lié à la puissance lumineuse  $P$  qui arrive sur la lame séparatrice de l'interféromètre. L'interféromètre est réglé sur une frange sombre en l'absence de perturbation. C'est un choix qui peut a priori surprendre, mais qui s'avère le plus pertinent pour recueillir de manière sélective le signal utile. Ce choix a pour conséquence de mettre en place un traitement adapté de ce signal de très faible puissance par des dispositifs complémentaires d'amplification ou de modulation.

- Q40.** Pour quelles valeurs du différentiel de longueur des bras  $\Delta L$  le signal utile  $\delta P_{grav}$  est-il maximal ? Former dans ces conditions le rapport  $\delta P_{grav}$  sur le signal continu  $P_{dc}$ , puis évaluer numériquement ce rapport à partir des données du document 4 et conclure quant au choix de se placer sur une « frange sombre ».
- Q41.** On choisit finalement de se placer sur une « frange sombre » c'est-à-dire telle que le signal continu  $P_{dc}$  soit nul. Indiquer la ou les valeurs de  $\Delta L$  correspondantes. En déduire que pour un réglage de « frange sombre » le signal utile  $\delta P_{grav}$  est proportionnel à  $h^2$ . En quoi ce résultat permet-il d'élucider le dernier paragraphe du texte ?

# A Annexes

## A.1 Données numériques :

- Constante de gravitation universelle	$G = 6,67.10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$
- Masse du Soleil	$M_{\odot} = 2,0.10^{30} \text{ kg}$
- Rayon du Soleil	$R_{\odot} = 7,0.10^8 \text{ m}$
- masse d'un nucléon (proton ou neutron)	$m_n = 1,7.10^{-27} \text{ kg}$
- rayon d'un nucléon (proton ou neutron)	$r_n = 1,2.10^{-15} \text{ m}$
- Vitesse de la lumière dans le vide	$c = 3,0.10^8 \text{ m.s}^{-1}$

## A.2 Caractéristiques d'une ellipse

On a représenté sur le schéma une ellipse de foyer  $F$  et de centre  $O$  et d'axe principal  $Ox$ .  
On définit les différents paramètres de l'ellipse :

- le demi-grand axe :  $a = OA = OP$
- le demi-petit axe :  $b = OB$
- la distance du foyer au centre de l'ellipse :  $c = OF = OF'$
- l'excentricité :  $e = c/a$  avec  $0 \leq e < 1$  et  $e = 0$  dans le cas particulier du cercle
- $P$  le point le plus proche du foyer  $F$  est appelé périastre et  $A$  le point le plus éloigné du foyer  $F$  est appelé apoastre.

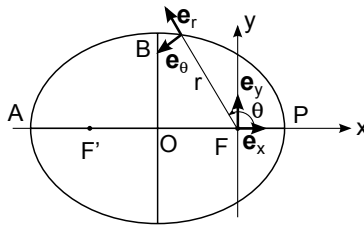


Figure 5 – Paramètres d'une ellipse

On a les propriétés suivantes :

- l'équation en coordonnées polaires de cette ellipse s'écrit

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \theta} \quad (1)$$

où  $p$  est le paramètre de l'ellipse, relié aux demi-grand axe et demi-petit axe par la relation

$$p = \frac{b^2}{a}$$

- le demi-grand axe, le demi-petit axe et l'excentricité sont reliés par la relation

$$b = a\sqrt{1 - e^2}$$

- l'aire d'une ellipse est

$$S = \pi ab$$

### A.3 Extrait des programmes de physique-chimie en classe de seconde générale et technologique en vigueur depuis la rentrée 2010 :

Notions et contenus	Compétences attendues
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Description de l'Univers : l'atome, la Terre, le système solaire, la Galaxie, les autres galaxies, exoplanètes et systèmes planétaires extrasolaires.</li><li>▪ Propagation rectiligne de la lumière.</li><li>▪ Vitesse de la lumière dans le vide et dans l'air.</li><li>▪ L'année-lumière.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Savoir que le remplissage de l'espace par la matière est essentiellement lacunaire, aussi bien au niveau de l'atome qu'à l'échelle cosmique.</li><li>▪ Connaître la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide (ou dans l'air).</li><li>▪ Connaître la définition de l'année-lumière et son intérêt.</li><li>▪ Expliquer l'expression : « voir loin, c'est voir dans le passé ».</li><li>▪ Utiliser les puissances de 10 dans l'évaluation des ordres de grandeur.</li></ul>

## A.4 Extrait des programmes de physique-chimie en classe de première S en vigueur depuis la rentrée 2011

<b>COMPRENDRE</b>	
<b>Lois et modèles</b>	
<i>Quelles sont les causes physiques à l'œuvre dans l'Univers ? Quelles interactions expliquent à la fois les stabilités et les évolutions physiques et chimiques de la matière ? Quels modèles utilise-t-on pour les décrire ? Quelles énergies leur sont associées ?</i>	
Notions et contenus	Compétences attendues
<b>Cohésion et transformations de la matière</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La matière à différentes échelles : du noyau à la galaxie.</li> <li>▪ Particules élémentaires : électrons, neutrons, protons.</li> <li>▪ Charge élémentaire <math>e</math>.</li> <li>▪ Interactions fondamentales : interactions forte et faible, électromagnétique, gravitationnelle.</li> <li>▪ Cohésion du noyau, stabilité. Radioactivité naturelle et artificielle. Activité. Réactions de fission et de fusion.</li> <li>▪ Lois de conservation dans les réactions nucléaires. Équivalence masse-énergie ; défaut de masse.</li> <li>▪ Réactions nucléaires et aspects énergétiques associés.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Connaître les ordres de grandeur des dimensions des différentes structures des édifices organisés.</li> <li>▪ Connaître l'ordre de grandeur des valeurs des masses d'un nucléon et de l'électron. Savoir que toute charge électrique peut s'exprimer en fonction de la charge élémentaire <math>e</math>.</li> <li>▪ Associer, à chaque édifice organisé, la ou les interactions prédominantes. Utiliser la représentation symbolique <math>{}^A_ZX</math> ; définir l'isotopie et reconnaître des isotopes.</li> <li>▪ Utiliser les lois de conservation pour écrire l'équation d'une réaction nucléaire. Utiliser la relation <math>E = mc^2</math>.</li> <li>▪ Ordre de grandeur des énergies mises en jeu dans les réactions nucléaires.</li> <li>▪ Recueillir et exploiter des informations sur les réactions nucléaires (domaine médical, domaine énergétique, domaine astronomique, ...).</li> </ul>

## A.5 Extrait des programmes de physique-chimie en classe de terminale S en vigueur depuis la rentrée 2012 :

<b>OBSERVER</b>	
<b>Ondes et matière</b>	
<i>Les ondes et les particules sont supports d'informations.</i>	
<i>Comment les détecte-t-on ? Quelles sont les caractéristiques et les propriétés des ondes ?</i>	
<i>Comment réaliser et exploiter des spectres pour identifier des atomes et des molécules ?</i>	
Notions et contenus	Compétences exigibles
Ondes et particules	
<b>Rayonnements dans l'Univers</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Absorption de rayonnements par l'atmosphère terrestre.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Extraire et exploiter des informations sur l'absorption de rayonnements par l'atmosphère terrestre et ses conséquences sur l'observation des sources de rayonnements dans l'Univers.</li> <li>▪ Connaître des sources de rayonnement radio, infrarouge et ultraviolet.</li> </ul>
Caractéristiques et propriétés des ondes	
<b>Propriétés des ondes</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diffraction. Influence relative de la taille de l'ouverture ou de l'obstacle et de la longueur d'onde sur le phénomène de diffraction.</li> <li>▪ Cas des ondes lumineuses monochromatiques, cas de la lumière blanche.</li> <li>▪ Interférences.</li> <li>▪ Cas des ondes lumineuses monochromatiques, cas de la lumière blanche. Couleurs interférentielles.</li> <li>▪ Effet Doppler.</li> </ul>	<p>Savoir que l'importance du phénomène de diffraction est liée au rapport de la longueur d'onde aux dimensions de l'ouverture ou de l'obstacle. Connaître et exploiter la relation <math>\theta = \lambda/a</math>. Identifier les situations physiques où il est pertinent de prendre en compte le phénomène de diffraction.</p> <p>Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier ou utiliser le phénomène de diffraction dans le cas des ondes lumineuses.</p> <p>Connaître et exploiter les conditions d'interférences constructives et destructives pour des ondes monochromatiques.</p> <p>Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier quantitativement le phénomène d'interférence dans le cas des ondes lumineuses</p> <p>Mettre en oeuvre une démarche expérimentale pour mesurer une vitesse en utilisant l'effet Doppler. Exploiter l'expression du décalage Doppler de la fréquence dans le cas des faibles vitesses. Utiliser des données spectrales et un logiciel de traitement d'images pour illustrer l'utilisation de l'effet Doppler comme moyen d'investigation en astrophysique.</p>



# A la recherche des ondes gravitationnelles

## Un corrigé

### 1 Le système binaire PRS 1913+16

#### 1.1 Quelques informations sur l'objet céleste répertorié sous la désignation : PSR B1913+16

##### 1.1.1 Analyse d'un document

1. Une année-lumière (al) est la distance parcourue par la lumière pendant une année :

$$1 \text{ al} = c \times \Delta t$$

avec

- $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$  est la vitesse de la lumière
  - et  $\Delta t = 365 \times 24 \times 3600 = 3,16.10^7 \text{ s}$  est la durée d'une année en unité SI (seconde)
- d'où  $1 \text{ al} = 3.10^8 \times 3,16.10^7 = 9,5.10^{15} \text{ m}$

2. On appelle « Voie Lactée » la galaxie à laquelle appartient notre système solaire.

Ordre de grandeur de la Voie lactée  $\sim 100\,000 \text{ al}$ .

La distance de PSR 1913+16 à la Terre est donnée de  $23\,000 \text{ al}$  ce qui le situe très probablement (d'après les indications du texte) dans notre Galaxie.

Le Soleil est environ à huit minutes de lumière (ou 150 millions de km) de la Terre, l'étoile 1913+16 est située à  $23\,000 \text{ al}$  de la Terre est donc environ 1 milliard de fois plus loin de la Terre que le Soleil.

3. Les instruments actuels dont disposent les astronomes sont :

- les télescopes à miroirs dans le domaine de l'optique ainsi que dans l'infra-rouge et l'UV si ceux-ci sont placés en dehors de l'atmosphère terrestre (satellite)
- les antennes radiotélescopes dans le domaine radio
- les détecteurs  $X$  (Uhuru ou Chandra) et  $\gamma$  (Fermi)

4. Le fait qu'un astronome observe ce pulsar situé à  $23,3.10^3$  années de lumière de lui ne peut lui garantir qu'il existe encore, car l'observation lui montre un objet « vieux » de  $23,3.10^3$  années.

5. Une masse proche de celle du Soleil, logée dans une sphère de quelques dizaines de kilomètres de diamètre permet de faire un calcul d'ordre de grandeur de la masse volumique de l'objet 1913+16. On estime la masse volumique du pulsar à l'aide de la relation

$$\rho_p = \frac{M_p}{V_p}$$

avec

- $M_p \sim M_\odot \sim 10^{30} \text{ kg}$  est la masse du Soleil,
  - et  $V_p = \frac{4\pi}{3}R^3$  volume d'une sphère de rayon  $R \sim 10 \text{ km} = 10^4 \text{ m}$  ce qui donne  $V_p \sim (10^4)^3 = 10^{12} \text{ m}^3$
- soit  $\rho_p \sim \frac{10^{30}}{10^{12}} = 10^{18} \text{ kg.m}^{-3}$

On estime alors la densité nucléaire (ou masse volumique du noyau)

$$\rho_n = \frac{m_n}{V_n}$$

avec

- $m_n \sim 10^{-27} \text{ kg}$  est la masse d'un nucléon
  - et  $V_n = \frac{4\pi}{3}r_n^3$  volume d'un nucléon de rayon  $r_n \sim 10^{-15} \text{ m}$  ce qui donne  $V_n \sim (10^{-15})^3 = 10^{-45} \text{ m}^3$
- soit  $\rho_n \sim \frac{10^{-27}}{10^{-45}} = 10^{18} \text{ kg.m}^{-3}$

On constate que  $\rho_p \sim \rho_n$  c'est-à-dire que ce type d'objet stellaire possède une densité voisine de la densité nucléaire. Pour des raisons de stabilité liées à la répulsion électrostatique, la force nucléaire faible transforme les protons en neutrons, d'où l'appellation d'*étoiles à neutrons*.

*Remarque* : Ce calcul ne permet en aucun cas de justifier pourquoi il s'agirait plutôt de neutrons que de protons.

6. Les deux types de propositions faites ici illustrent la diversité des possibilités en terme de niveau de maîtrise exigé des élèves. La première proposition vise plutôt un objectif d'approfondissement des notions, tandis que la seconde s'adresse à des élèves dont la culture scientifique est encore à construire et l'accès aux textes documentaires moins familier.

Points de vocabulaire :

« sources radios »

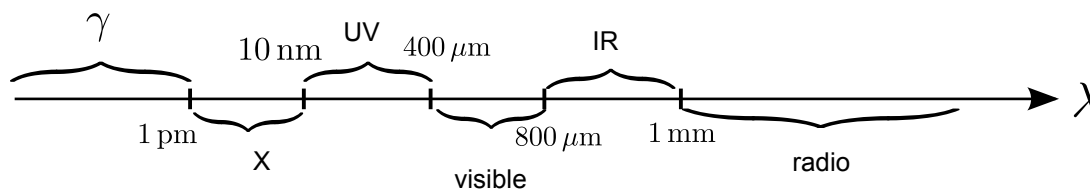
• **1ère proposition :**

**questions pour les élèves :**

- Qu'appelle-t-on onde électromagnétique ?
- Qu'est-ce qu'un spectre électromagnétique ? Le représenter sous forme d'un diagramme en longueur d'ondes et nommez les différentes parties du spectre.
- Citez des sources terrestres d'ondes radios.

**réponses :**

- Une onde électromagnétique correspond à une vibration de champs électriques et magnétiques couplés se propageant dans le vide à la vitesse de la lumière.
- Un spectre électromagnétique est la décomposition d'un rayonnement électromagnétique en fonction de la fréquence  $f$  ou de façon équivalente de la longueur d'onde  $\lambda$  puisqu'on a la relation (dans le vide)  $\lambda = \frac{c}{f}$



- Sources terrestres :

- émetteurs TV
- émetteurs radiodiffusion : grandes ondes et bande FM
- téléphone mobile
- communications internet sans fil : wifi

• **2ème proposition :**

**questions pour les élèves :**

- Les ondes radio font-elle partie des ondes acoustiques ou électromagnétiques ?
- Une onde radio de fréquence 1000 MHz est détectée par un radio télescope. Peut-on en faire une observation visuelle ?

**réponses :**

- Il s'agit d'ondes électromagnétiques.
- les longueurs d'onde visibles se situent entre 400 nm et 800 nm, ce qui correspond à des fréquences calculées par la relation  $\nu = c/\lambda$  égales à  $7,5 \cdot 10^{14}$  Hz et  $3,75 \cdot 10^{14}$  Hz. La lumière visible a une fréquence beaucoup plus élevée que les ondes radio.

« l'étoile s'effondre »

• **1ère proposition :**

**questions pour les élèves :**

- Si on admet qu'une étoile assimilée à une sphère homogène de masse  $M$  et de rayon  $R$  a une énergie potentielle de gravitation de la forme

$$E_p = -kG \frac{M^2}{R}$$

où  $k$  est une constante qui dépend de la géométrie et  $G$  est la constante de gravitation universelle. En déduire qu'une perte d'énergie par rayonnement doit se traduire par une diminution du rayon de l'étoile. On admet que l'énergie de l'étoile n'est ici que potentielle.

- En déduire qu'en l'absence de source d'énergie (nucléaire par exemple) une étoile va nécessairement s'effondrer.

**réponses :**

- (a) Par conservation de l'énergie, une perte par rayonnement doit s'accompagner d'une diminution de l'énergie potentielle de l'étoile et donc puisque celle-ci est une fonction qui décroît lorsque  $R$  décroît, on en déduit que le rayon de l'étoile doit diminuer.
- (b) Puisqu'une étoile à une température non nulle, elle rayonne, donc elle perd de l'énergie, et d'après la question précédente on en déduit que l'étoile s'effondre sur elle-même.

• **2ème proposition :**

**questions pour les élèves :**

- (a) Quel concept de la physique vient justifier l'effondrement de l'étoile ?
- (b) Quels sont les mots qui vous semblent le mieux décrire cet « effondrement » de l'étoile ?
  - A** : Des cavités apparaissent à sa surface,
  - B** : Sa matière occupe un volume plus faible
  - C** : L'étoile s'effrite en perdant de la matière

**réponses :**

- (a) C'est la loi de l'attraction universelle selon laquelle tous les objets s'attirent du fait qu'ils ont une masse.
- (b) Réponse **B**

« après avoir consommé tout son carburant nucléaire »

• **1ère proposition :**

**questions pour les élèves :**

- (a) Qu'appelle-t-on réaction de fusion et réaction de fission. Laquelle des deux s'attend-t-on à trouver au sein des étoiles ?
- (b) Pourquoi récupère-t-on de l'énergie dans cette réaction ?
- (c) Pourquoi ce processus de fusion a-t-il un terme ?

**réponses :**

- (a) On appelle *fusion* le processus de mise en commun de 2 noyaux nucléaires « légers » pour former un noyau plus « lourd » (avec éventuellement élimination ou création de particules), tandis que le mécanisme de *fission* correspond lui à la scission d'un noyau lourd en plusieurs noyaux (généralement 2 et avec éventuellement aussi élimination ou création de particules).
- (b) C'est la différence de masse (si on néglige en première approximation la masse des 2 positrons... et des neutrinos)

$$\Delta m = 4m_p - m_{He} > 0$$

qui, convertie par la relation d'Einstein  $Q = (\Delta m) c^2$ , fournit l'énergie nécessaire à l'équilibre de l'étoile.

- (c) Le gain énergétique dans le mécanisme de fusion est conservé jusqu'à la production de noyaux de fer. Au-delà les réactions nucléaires sont endothermiques (courbe d'Aston) et aucune réaction nucléaire ne pourra compenser les pertes d'énergie par rayonnement. L'effondrement gravitationnel s'en suivra donc inexorablement.

• **2ème proposition :**

**questions pour les élèves :**

- (a) Donner une analogie et une différence entre le « carburant » d'une étoile et celui d'un moteur ?
- (b) Quel exemple de carburant nucléaire pouvez-vous donner ?
- (c) L'apparition de nouveaux noyaux lorsque le « carburant » réagit modifie-t-elle progressivement la masse de l'étoile ?

**réponses :**

- (a) Une analogie : c'est la libération d'énergie par une transformation de la matière, une différence : c'est que les entités sont des atomes ou des molécules (réaction chimique) dans un moteur tandis que ce sont des noyaux (réaction nucléaire) dans une étoile. Les ordres de grandeur des énergies libérées sont également très différents. Pour une masse donnée de matière l'énergie nucléaire libérée est beaucoup plus conséquente que l'énergie chimique.

(b) Des noyaux d'hydrogène, d'hélium.

(c) La masse diminue même si les noyaux formés sont de plus en plus « lourds ». C'est à ce prix que l'étoile brille !

7. Une découverte scientifique n'est jamais le fruit d'un pur hasard, compris comme une évidence qui apparaîtrait naturellement, comme spontanément, aux yeux de l'expérimentateur. Au contraire, toute découverte s'inscrit toujours dans le cadre d'un programme de recherche. L'aspect surprenant de certains résultats découlant alors d'un « désaccord » avec un schéma théorique attendu. Voici quelques exemples :

- la découverte du fond diffus cosmologique : Penzias et Wilson, deux chercheurs des laboratoires Bell, cherchant à étalonner leur détecteur radio dans des régions du ciel « dépourvues de sources » découvrirent un signal résiduel qu'ils attribuèrent *a posteriori* au rayonnement fossile dans le cadre du modèle de Big Bang.
- la découverte de la radioactivité : A la toute fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, l'utilisation de plaques photographiques dans le cadre de l'étude de la fluorescence de sels d'uranium par Henri Becquerel, conduisit celui-ci à la découverte d'une émission de rayonnement alors même que le matériau n'avait pas été soumis à une excitation lumineuse (suivant le principe habituel d'étude de la fluorescence). C'est l'analyse de cette « anomalie » dans le cadre, tel que compris à l'époque, du comportement de ce type de matériau qui permit à Becquerel d'identifier le nouveau phénomène.
- la découverte de l'action des courants électriques sur une boussole par Ørsted en 1820. C'est la similarité des comportements électrique et magnétique (existence de pôles électriques et magnétiques, phénomènes d'attraction-répulsion, etc.) qui conduisit plusieurs « savants » à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle et au début du XIX<sup>ème</sup>, à rechercher des interactions entre électricité et magnétisme (comme par exemple la magnétisation d'aiguilles par la foudre interprétée correctement comme un courant électrique). Ce n'est donc pas par hasard qu'Ørsted découvrit cette action, mais c'est, semble-t-il, ses présupposés théoriques qui l'empêcheront pendant plusieurs années de concevoir la « bonne expérience ».
- la loi de la gravitation « découverte » par Newton en regardant tomber une pomme. On sait à présent que cette histoire est probablement apocryphe et que le processus par lequel Newton parvint à cette conclusion, résulte en réalité d'une longue recherche des lois mathématiques susceptibles « d'expliquer » les lois empiriques de Kepler.

### 1.1.2 Estimation de la taille d'un pulsar

8. Les étoiles sont plutôt des sphères gazeuses (plasma) cependant les forces de viscosité finissent par conférer à l'étoile une rotation uniforme identique à un solide. La nature sphérique de l'étoile est aussi une approximation car les forces d'inertie centrifuge ont tendance à (très) légèrement aplatir aux pôles les corps célestes en rotation.

9. Définition du moment d'inertie d'un solide rapport à un axe  $\Delta$

Soit un petit volume  $d\tau$  du solide autour d'un point  $P$  de masse  $dm$  et situé à une distance  $r = HP$  d'un axe  $\Delta$ .

On définit le moment d'inertie par la formule

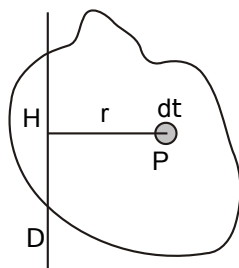


FIGURE 1 – Moment d'inertie par rapport à un axe  $\Delta$

$$I_{\Delta} = \int_{\text{tout le solide}} r^2 dm = \int HP^2 \rho(P) d\tau$$

On en déduit par analyse dimensionnelle que

$$I = kMR^2$$

En particulier pour une sphère le calcul détaillé donne  $k = \frac{2}{5}$

Pour un solide en rotation autour d'un axe fixe le moment cinétique  $\mathbf{L} = I_{\Delta}\boldsymbol{\Omega}$

10. Effet « patineuse »

(a) Par conservation du moment cinétique (le système étant isolé)  $\mathbf{L}_f = \mathbf{L}_i$  où les indices  $i$  et  $f$  font respectivement références aux états initial et final.

Comme il s'agit de solide on a  $I_{\Delta f}\Omega_f = I_{\Delta i}\Omega_i$  et puisque  $\Omega = 2\pi/T$  on obtient la relation

$$\frac{T_i}{T_f} = \left(\frac{R_i}{R_f}\right)^2$$

(b) Application numérique : on tire le rayon final de la relation précédente

$$R_f = R_i \sqrt{\frac{T_f}{T_i}} = 7.10^8 \sqrt{\frac{10^{-3}}{2,19.10^6}} = 1,5.10^4 \text{ m}$$

soit  $R_f = 15 \text{ km}$ . C'est l'estimation de ce très petit rayon qui permet d'attribuer à ce corps le nom d'étoile à neutrons compte tenu de la densité voisine de la matière nucléaire.

## 1.2 Effet Doppler-Fizeau

### 1.2.1 Théorie

11. Effet Doppler :

- en acoustique : c'est un son de fréquence plus élevée lorsqu'une sirène vient vers un observateur et de fréquence plus basse lorsqu'elle s'en éloigne.
- en optique : effet de « rougissement » d'une source lumineuse qui s'éloigne d'un observateur et de « bleuissement » lorsqu'elle s'en éloigne.

12. C'est le principe de la relativité restreinte d'Einstein qui stipule (par exemple) :

- qu'il n'est pas possible de détecter son état de mouvement par une expérience *interne* de physique (c'est-à-dire sans référence à un référentiel extérieur) dans un référentiel galiléen.
- et que la vitesse de la lumière est une constante dans tous les référentiels galiléens

13. On suppose pour simplifier que la source envoie des tops très courts tous les intervalles de temps de durée  $T_p$  mesurés dans un référentiel où la source est au repos.

Pour un observateur  $O$  placé dans un référentiel qui voit la source  $S$  en mouvement à la vitesse  $v$  en

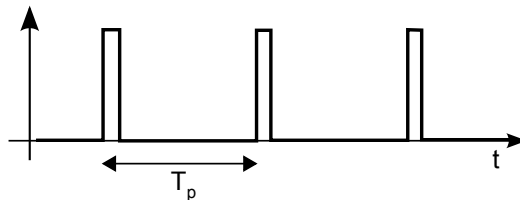


FIGURE 2 – Série de tops signaux

direction de  $O$ , on note la date  $t_{e,1} = 0$  lorsque la source envoie un premier top.

L'onde se propageant à la vitesse  $c$ , ce top est reçu par  $O$  à la date

$$t_{r,1} = \frac{d_1}{c}$$

où  $d_1$  correspond à la distance  $SO$  au moment de l'émission du top.

L'onde émet alors le second top à la date  $t_{e,2} = T_p$  et celui-ci est reçu par l'observateur à la date

$$t_{r,2} = T_p + \frac{d_2}{c}$$

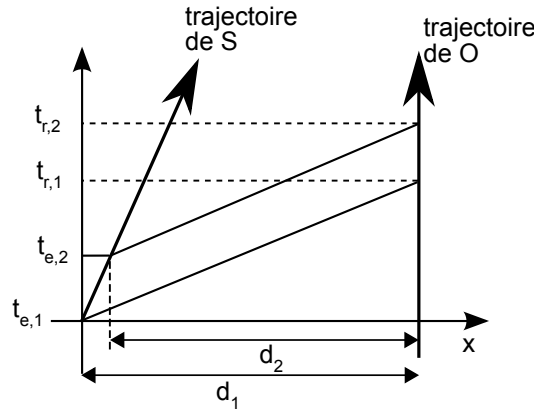


FIGURE 3 – Diagramme espace-temps pour l'effet Doppler-Fizeau

où  $d_2$  correspond à la distance  $SO$  au moment de l'émission su second top.  
on peut résumé ce scénario dans un diagramme d'espace-temps

La période apparente mesurée par l'observateur est par définition

$$T'_p = t_{r,2} - t_{r,1} = T_p + \frac{1}{c} (d_2 - d_1)$$

Or  $d_1$  et  $d_2$  sont liés par la relation  $d_1 = d_2 + vT_p$ , d'où

$$T'_p = T_p \left( 1 - \frac{v}{c} \right)$$

14. Si  $v > 0$  alors  $T'_p < T_p$  soit en terme de fréquence  $f_p < f'_p$ . La fréquence apparente est donc plus élevée que la fréquence propre et inversement si  $v < 0$ . Ce comportement est bien en accord avec l'effet Doppler ou Doppler-Fizeau mentionné dans l'introduction.
15. On suppose à présent que la source ne se déplace pas en direction de l'observateur. Le raisonnement établi plus haut s'applique en prenant la composante de la vitesse en direction de  $O$ , soit  $v_r = \mathbf{v} \cdot \mathbf{u}$  où  $\mathbf{u}$  est un vecteur unitaire dirigé de la source vers l'observateur.

On a alors

$$T'_p = T_p \left( 1 - \frac{v_r}{c} \right) = T_p \left( 1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{u}}{c} \right)$$

soit

$$\frac{\Delta T_p}{T_p} = - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{u}}{c}$$

En terme de longueur d'onde, puisque  $\lambda = cT_p$  on en déduit que

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{u}}{c}$$

16. Le pulsar possédant un compagnon, il est en rotation autour du centre d'inertie du système binaire et passe ainsi successivement d'une phase où il se rapproche de l'observateur (fréquence plus élevée) d'une phase où il s'en éloigne (fréquence plus basse) et ceci suivant la période orbitale du pulsar.

### 1.2.2 Mise en œuvre d'une activité expérimentale en classe de terminale S

17. Questions :

- (a) Les élèves ont étudié des spectres atomiques d'émission et d'absorption. Il s'agit ici d'un spectre d'absorption de la lumière émise par le « coeur » du Soleil, par les atomes constituant le gaz de la couronne solaire. Cette lumière est reçue par la planète Jupiter qui constitue une source secondaire pour l'observateur terrestre.
- (b) On peut réaliser la projection d'un spectre avec un réseau et une lampe à vapeur de mercure par exemple. La connaissance de la longueur d'onde des raies permet d'étalonner la surface de projection avec les raies d'ordre 1 par exemple. On peut montrer la proportionnalité entre la longueur d'onde et la déviation angulaire, donc entre la longueur d'onde et la déviation mesurée

sur l'écran. Pour faire comprendre aux élèves qu'on dispose d'un moyen de mesurer une longueur d'onde par étalonnage de l'écran on peut, en conservant les mêmes réglages, réaliser le spectre d'une lampe à vapeur de sodium et discuter de la précision de la mesure. L'analogie est celle du principe de l'étalonnage de l'image photographique au moyen de raies connues. La différence se joue sur le fait que les raies du sodium sont des raies d'absorption et non pas d'émission, mais cela ne change rien à la méthode de mesure.

- (c) Les points de l'équateur de la planète Jupiter qui s'éloignent de l'observateur (en considérant comme fixe le centre de la planète au moment de l'observation) émettent une lumière qui sera perçue comme « décalée vers le rouge » du fait de l'effet Doppler-Fizeau. La photographie du spectre montre, grâce aux raies de référence, que les longueurs d'onde croissent vers la droite. Le bord « fuyant » de la planète pour un observateur terrestre émet donc la lumière reçue par le bord haut de l'image du spectre.
- (d) C'est le référentiel jupiterocentrique.
- (e) L'écart de longueur d'onde est mesuré entre deux points qui ont un mouvement antagoniste vis à vis de l'observateur, l'un se rapproche et l'autre s'éloigne, on cumule donc deux écarts quand on compare l'information lumineuse *émise* par ces deux points source *A* et *B*, cela justifie un facteur 2. Pour justifier le facteur 4, il faut comprendre que Jupiter est une *source secondaire*, les points *A* et *B* ont des mouvements antagonistes lorsqu'ils reçoivent la lumière du Soleil. Ce sont des récepteurs en mouvement, il y a donc un décalage de longueur d'onde concernant le signal lumineux *reçu* par ces deux points. Les deux effets se cumulent car la Terre est placée entre Jupiter et le Soleil pour que l'observation soit possible. Par contre il n'est pas certain que les centres des trois astres soient alignés au moment de l'observation, or c'est l'hypothèse qui est faite pour justifier le facteur 4.
- (f) Vitesse radiale de Jupiter

- **Détermination de la vitesse équatoriale à partir des documents :** On ne connaît pas ici les causes d'erreurs liées au dispositif utilisé. On fait donc l'hypothèse que la seule source d'erreur est celle de la lecture de l'écart en longueur d'onde, dû à l'inclinaison de la raie du sodium, mesuré en pixels entre les deux bords du spectre. On fait le choix d'estimer l'incertitude sur la différence de longueur d'onde à 1 pixel.

La soustraction des deux abscisses donne 8 pixels, ceci pour la raie  $\text{Na}_2$ . En utilisant l'étalonnage de l'écran on peut encadrer  $\Delta\lambda$  entre 0,0879 et 0,1131 nm et la vitesse radiale  $V_e$  calculée est ainsi comprise entre 11,2 et 14,4 km/s dans le référentiel « jupiterocentrique ».

- **Les élèves peuvent entreprendre une comparaison avec la valeur de référence de la période :** la période de rotation de Jupiter indiquée dans les données est de 9,92 heures, pour un diamètre équatorial de  $1,43 \cdot 10^5$  km dans le référentiel « jupiterocentrique ». La période de rotation que l'on peut calculer à partir des mesures effectuées est alors comprise entre 8,67 h et 11,1 h. La valeur de référence se situe dans l'intervalle. Les hypothèses faites pour exploiter l'image permettent d'obtenir une estimation de la période de rotation avec un écart d'environ 10 %.

18. Voici un exemple possible de production :

- **Environnement matériel :**

- Salle de TP avec ordinateurs.
- Paillasse du professeur équipée d'un dispositif dispersif muni d'une fente et d'un réseau, permettant d'observer le spectre d'émission d'une lampe spectrale.

- **Organisation :**

Les élèves travaillent par petits groupes (de 2 à 4) avec un ordinateur à disposition et le logiciel Salsaj. Après quelques tâches guidées permettant l'appropriation du logiciel (trente minutes) et du dispositif (15 minutes), ils travailleront ensuite en autonomie, le professeur apportant de l'aide ponctuellement.

- **Tâches demandées et réponses attendues :**

- Dans une première partie, on prévoit de familiariser les élèves avec le logiciel Salsaj. Les élèves doivent repérer les commandes du logiciel qui vont permettre de faire une coupe de spectre et de réaliser l'étalonnage de l'image. Une photographie d'un spectre d'émission réalisé au laboratoire du lycée à partir d'une lampe spectrale peut permettre aux élèves de s'exercer. Ils doivent comprendre la nécessité de connaître au moins deux longueurs d'ondes assez espacées pour étalonner le spectre

avec une précision convenable si on souhaite procéder à des mesures ultérieures avec le même dispositif.

- Dans une seconde partie on fera réfléchir les élèves sur la situation observée à partir des éléments du document 2. l'expérience montée sur la paillasse montrant un spectre d'émission doit leur permettre de se représenter la situation réelle étudiée et notamment la corrélation entre la position dans l'espace de la fente et celle des raies. Pour s'assurer de l'appropriation de la situation par les élèves on peut leur demander de réaliser un schéma montrant la position du Soleil, la position de la Terre et celle de Jupiter pour qu'une observation de la lumière issue de Jupiter soit possible.
- Le document 2 sera complété par un autre document montrant un spectre de la lumière solaire observé directement et quelques explications (rappels de ce qui a été vu en classe de première) sur le processus d'absorption de la lumière émise par le coeur de l'étoile par les couches les plus externes.
- La proportionnalité entre la déviation des raies et leur longueur d'onde sera posée pour les élèves comme une propriété du réseau qu'on ne cherchera pas à établir. De même qu'on ne demandera pas de justification du facteur 4 apparaissant dans la relation donnant la vitesse radiale.
- A partir de cet ensemble de documents, et après avoir vérifié leur appropriation de la situation on pose aux élèves les questions suivantes qu'ils résoudront en autonomie :
  - Dans l'espace, où sont les atomes de sodium responsables des raies visibles sur le spectre ? Réponse question Q17 (a)
  - D'après vos connaissances sur l'effet Doppler-Fizeau, identifier sur le spectre quels sont les points de la planète qui s'approchent de l'observateur terrestre et quels sont ceux qui s'en éloignent. Réponse question Q17 (c)
  - Après avoir étalonné le spectre au moyen du logiciel Salsaj, déterminer la vitesse radiale de Jupiter en utilisant la relation donnée dans le document. La réponse sera donnée par un encadrement et comparée à une valeur connue. Réponse question Q17 (f).

### 1.3 Caractéristiques du système binaire

#### 1.3.1 Transformation du problème à deux corps en problème à un corps

19. Commentaires :

- on peut assimiler les étoiles à des points matériels car leurs dimensions ( $\sim 10$  km) sont très faibles au regard des distances qui les séparent ( $\sim 10^6$  km).
- de plus on peut supposer le système isolé car la distance moyenne entre deux étoiles (ou deux systèmes d'étoiles) est très grande comparativement à la distance qui sépare les étoiles du système binaire ( $\sim 1$  al  $\sim 10^{13}$  km).

20. La force de gravitation de Newton qui s'exerce sur les deux particules  $P_1$  et  $P_2$  de masses respectives  $m_1$  et  $m_2$  s'écrit :

$$\mathbf{F}_{2 \rightarrow 1} = -\mathbf{F}_{1 \rightarrow 2} = -G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2} \mathbf{u}_{2 \rightarrow 1}$$

où  $r_{12}$  est la distance de  $P_1$  à  $P_2$  et  $\mathbf{u}_{2 \rightarrow 1}$  un vecteur unitaire dirigé de 2 vers 1.

21. Le centre de masse  $G$  du système est défini par référence à un point  $O$  par la relation

$$(m_1 + m_2) \mathbf{OG} = m_1 \mathbf{OP}_1 + m_2 \mathbf{OP}_2$$

dans le cas particulier où ce point  $O$  est justement le point  $G$  on obtient simplement

$$m_1 \mathbf{GP}_1 + m_2 \mathbf{GP}_2 = \mathbf{0}$$

On appelle référentiel du centre de masse (noté  $\mathcal{R}^*$ ) un référentiel en translation par rapport à un référentiel galiléen et centré sur  $G$ .

Le système binaire étant isolé l'application du théorème du centre d'inertie à l'ensemble donne

$$(m_1 + m_2) \frac{d^2 \mathbf{OG}}{dt^2} = \mathbf{0}$$

car il n'y a pas de forces extérieures qui s'exercent sur le système.

Après intégration on obtient

$$\frac{d\mathbf{OG}}{dt} = \mathbf{c}^{\text{ste}}$$



ce qui indique que  $G$  a un mouvement de translation rectiligne uniforme. On en déduit que  $\mathcal{R}^*$  est aussi galiléen.

22. Celui-ci constitue donc un « bon » référentiel dans la mesure où on peut choisir ce référentiel pour appliquer la relation fondamentale de la dynamique.
23. Particule fictive :

(a) On applique le principe fondamental de la dynamique à chaque particule

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 \mathbf{r}_1}{dt^2} = \mathbf{F}_{2 \rightarrow 1} = \mathbf{F} & (1) \\ m_2 \frac{d^2 \mathbf{r}_2}{dt^2} = \mathbf{F}_{1 \rightarrow 2} = -\mathbf{F} & (2) \end{cases}$$

On combine les deux équations de la façon suivante

$$\frac{(1)}{m_1} - \frac{(2)}{m_2}$$

On obtient alors en introduisant la distance relative  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$

$$\mu \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F}$$

où on a posé

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

Le problème se ramène donc à l'étude d'une particule fictive (notée  $P$ ) repérée par le vecteur  $\mathbf{r} = \mathbf{GP} = \mathbf{P}_2 \mathbf{P}_1$  de masse  $\mu$  appelée masse réduite et obéissant à l'équation dynamique précédente.

(b) Par définition du centre de masse on a avec les nouvelles notations

$$m_1 \mathbf{r}_1 + m_2 \mathbf{r}_2 = \mathbf{0}$$

comme par ailleurs  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$  on en déduit

$$\begin{cases} \mathbf{r}_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \mathbf{r} \\ \mathbf{r}_2 = -\frac{m_1}{m_1 + m_2} \mathbf{r} \end{cases}$$

en posant  $\eta = \frac{m_2}{m_1 + m_2}$  on trouve que la trajectoire de la particule (1) (respectivement (2)) se déduit de celle de la particule fictive  $P$  par une homothétie de centre  $G$  et de rapport  $\eta = \frac{m_2}{m_1 + m_2}$  (respectivement  $1 - \eta = -\frac{m_1}{m_1 + m_2}$ ).

24. Énergie et moment cinétique

(a) Par définition l'énergie mécanique est la somme des énergies cinétiques et potentielles soit

$$E = E_c + E_p = \frac{1}{2} m_1 \mathbf{v}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \mathbf{v}_2^2 - \frac{G m_1 m_2}{r}$$

D'après les relations exprimant  $\mathbf{r}_1$  et  $\mathbf{r}_2$  en fonction de  $\mathbf{r}$  on a  $\mathbf{v}_1 = \eta \mathbf{v}$  et  $\mathbf{v}_2 = (1 - \eta) \mathbf{v}$  où  $\mathbf{v}$  est la vitesse de la particule fictive. L'énergie cinétique devient

$$E_c = \frac{1}{2} (m_1 \eta^2 + m_2 (1 - \eta)^2) \mathbf{v}^2 = \frac{1}{2} \mu \mathbf{v}^2$$

donc

$$E = \frac{1}{2} \mu \mathbf{v}^2 - \frac{k}{r}$$

avec  $k = G m_1 m_2$ .

(b) Le moment cinétique total est par définition égal à la somme des moments cinétiques de chaque particule, soit

$$\begin{aligned} \mathbf{L} &= \mathbf{l}_1 + \mathbf{l}_2 = \mathbf{r}_1 \wedge m_1 \mathbf{v}_1 + \mathbf{r}_2 \wedge m_2 \mathbf{v}_2 \\ &= \mathbf{r}_1 \wedge m_1 \eta \mathbf{v} + \mathbf{r}_2 \wedge m_2 (1 - \eta) \mathbf{v} \\ &= \mathbf{r}_1 \wedge \mu \mathbf{v} - \mathbf{r}_2 \wedge \mu \mathbf{v} \\ &= (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \wedge \mu \mathbf{v} = \mathbf{r} \wedge \mu \mathbf{v} \end{aligned}$$

### 1.3.2 Paramètres orbitaux

25. Énoncé des 3 lois de Kepler :

- les planètes tournent autour du Soleil suivant des trajectoires elliptique dont il occupe l'un des foyers.
- le rayon vecteur des planètes balaye des aires égales pendant des intervalles de temps égaux
- le rapport du cube du demi-grand axe des trajectoires elliptiques des planètes sur le carré des temps mis pour qu'elles effectuent une révolution, est une constante pour le système solaire.

Kepler se situe dans la continuité de Copernic dont il reprend la thèse héliocentrique. Comme assistant de Tycho Brahe (le plus grand observateur de son temps), il exploite les données de ce dernier pour établir les 3 lois rappelées plus haut. Sa démarche est purement empirique puisqu'il ne dispose pas à son époque (début XVII<sup>ème</sup>) de « lois » permettant d'établir ces relations<sup>1</sup>. C'est Newton plus d'un demi-siècle plus tard qui parviendra le premier à les démontrer suivant les principes de la mécanique qu'il aura lui-même établi.

26. Le moment cinétique total  $L$  est constant ce qui signifie que  $\mathbf{r}$  est toujours perpendiculaire à la direction de  $\mathbf{L}$  et donc que le mouvement se fait dans le plan perpendiculaire à  $\mathbf{L}$ .

27. Deuxième loi de Kepler

(a) En coordonnées polaires la vitesse s'écrit :  $\mathbf{v} = \dot{r} \hat{\mathbf{e}}_r + r\dot{\theta} \hat{\mathbf{e}}_\theta$  donc

$$\mathbf{L} = r \hat{\mathbf{e}}_r \wedge \mu (\dot{r} \hat{\mathbf{e}}_r + r\dot{\theta} \hat{\mathbf{e}}_\theta) = \mu r^2 \dot{\theta} \hat{\mathbf{e}}_z$$

avec  $\hat{\mathbf{e}}_z = \hat{\mathbf{e}}_r \wedge \hat{\mathbf{e}}_\theta$ .

Géométriquement  $dA = \frac{1}{2} \|\mathbf{r} \wedge \mathbf{v}\| dt$  correspond à l'aire balayée par le rayon vecteur pendant l'intervalle de temps  $dt$ . Or  $\|\mathbf{r} \wedge \mathbf{v}\| = \|\mathbf{L}\| / \mu = c^{ste}$ , on en déduit que

$$\frac{dA}{dt} = c^{ste}$$

c'est la loi des aires ou 2<sup>ème</sup> loi de Kepler.

(b) On pose  $C = \frac{L}{\mu} = 2 \frac{dA}{dt}$  donc la vitesse aréolaire

$$\frac{dA}{dt} = \frac{C}{2}$$

On peut d'autre part évaluer la vitesse aréolaire en prenant l'aire balayée pendant une période de révolution soit

$$\frac{\pi ab}{T}$$

où  $\pi ab$  correspond à l'aire de l'ellipse. Ce qui donne

$$C = \frac{2\pi ab}{T}$$

28. Pour un mouvement circulaire l'accélération est purement centripète et s'écrit :

$$\mathbf{a} = -\frac{v^2}{R} \hat{\mathbf{e}}_r$$

en remplaçant dans l'équation dynamique de la particule fictive

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F} = \frac{GmM}{R^2} (-\hat{\mathbf{e}}_r)$$

on obtient

$$\frac{v^2}{R} = \frac{GM}{R^2}$$

---

1. La notion de « lois » mathématiques n'apparaîtra en définitive qu'à la suite des travaux de Galilée, Descartes et Newton parmi tant d'autres.

Comme le mouvement est circulaire uniforme le module de la vitesse peut s'écrire

$$v = \frac{2\pi R}{T}$$

On en déduit que

$$\frac{R^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

## 29. Éléments de l'orbite

(a) Le vecteur  $\mathbf{u}$  de la direction de l'observateur a pour composantes dans le repère  $(Fxyz)$

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\sin i \\ \cos i \end{pmatrix}$$

tandis que la vitesse du pulsar s'écrit dans le même repère

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} v_r \cos \theta - v_\theta \sin \theta \\ v_r \sin \theta + v_\theta \cos \theta \\ 0 \end{pmatrix}$$

le produit scalaire donne

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = -\sin i (v_r \sin \theta + v_\theta \cos \theta)$$

En utilisant la loi des aires :  $r^2 \dot{\theta} = C$  on obtient l'expression de la composante orthoradiale

$$v_\theta = r \dot{\theta} = \frac{C}{r}$$

À partir de l'équation de l'ellipse

$$\frac{1}{r} = \frac{1 + e \cos \theta}{p}$$

qui donne par dérivation par rapport au temps

$$-\frac{\dot{r}}{r^2} = -\frac{e}{p} \dot{\theta} \sin \theta$$

la vitesse radiale s'écrit alors

$$v_r = \dot{r} = \frac{e}{p} r^2 \dot{\theta} \sin \theta = \frac{e}{p} C \sin \theta$$

Finalement on obtient pour le produit scalaire

$$\begin{aligned} \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} &= -\frac{C}{p} \sin i [(e \sin \theta) \sin \theta - (1 + e \cos \theta) \cos \theta] \\ &= -\frac{C}{p} \sin i (e + \cos \theta) \end{aligned}$$

(b) D'après l'expression de  $p = C^2/GM$  on a

$$K = \frac{GM}{C} \sin i$$

La 3<sup>ème</sup> loi de Kepler donne pour le produit  $GM$

$$GM = 4\pi^2 \frac{a^3}{T^2}$$

et la constante des aires

$$C = \frac{2\pi ab}{T} = \frac{2\pi a^2 \sqrt{1 - e^2}}{T}$$

où on a remplacé le demi-petit axe  $b$  par son expression en fonction du demi-grand axe  $a$  et de l'excentricité  $e$ .

En remplaçant on trouve

$$K = \frac{2\pi a \sin i}{T \sqrt{1 - e^2}}$$

- (c) La vitesse radiale  $V_{\text{rad}} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{v}_1$  et  $\mathbf{v}_1 = \eta \mathbf{v}$  ce qui donne

$$V_{\text{rad}} = \eta \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = K\eta [e + \cos \theta]$$

En posant  $K_1 = K\eta$  on trouve pour  $K_1$

$$K_1 = \frac{2\pi\eta a \sin i}{T\sqrt{1-e^2}}$$

Comme l'orbite de la particule (1) est déduite de la particule fictive par l'homothétie de centre  $G$  et de rapport  $\eta$  il s'agit aussi d'une ellipse de demi-grand axe  $a_1 = \eta a$ . D'où l'expression de  $K_1$

$$K_1 = \frac{2\pi a_1 \sin i}{T\sqrt{1-e^2}}$$

### 30. Analyse du graphe donné par Hulse et Taylor.

- (a) On retrouve qu'au périastre la vitesse est d'autant plus grande que la durée de transit dans cette région est courte conformément à la deuxième loi de Kepler. L'asymétrie de la figure est reliée à l'excentricité de l'orbite ; pour une trajectoire circulaire on aurait une simple sinusoïde.
- (b) On a

$$\begin{aligned} V_{\text{min}} &= -K_1(1+e) \\ V_{\text{max}} &= K_1(1-e) \end{aligned}$$

d'où on tire

$$K_1 = \frac{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}}{2}$$

On mesure alors sur le graphe  $V_{\text{max}} = +80 \text{ km.s}^{-1}$  et  $V_{\text{min}} = -330 \text{ km.s}^{-1}$  ce qui donne  $K_1 = 205 \text{ km.s}^{-1}$ .

- (c) De  $V_{\text{min}}$  et  $V_{\text{max}}$  on tire l'excentricité

$$e = \frac{V_{\text{min}} + V_{\text{max}}}{V_{\text{min}} - V_{\text{max}}} = 0,61$$

De  $K_1$  on tire le produit  $a_1 \sin i$

$$a_1 \sin i = \frac{K_1 T_b \sqrt{1-e^2}}{2\pi} = \frac{2,05 \cdot 10^5 \times 2,79 \cdot 10^4}{2\pi} \sqrt{1-(0,61)^2} = 7,2 \cdot 10^8 \text{ m}$$

où on a pris  $T_b = 7 \text{ h } 45 \text{ mn} = 7 \times 3600 + 45 \times 60 = 2,79 \cdot 10^4 \text{ s}$

### 31. Détermination des masses

- (a) À partir de l'équation donnant  $K_1$  on tire

$$(\sin i)^3 = \frac{K_1^3 T_b^3 (1-e^2)^{3/2}}{(2\pi)^3 a_1^3}$$

D'après la troisième loi de Kepler

$$\frac{T_b^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

comme de plus  $a = a_1/\eta$ . On peut écrire

$$f = \frac{m_2^3}{M^2} \frac{K_1^3 T_b^3}{(2\pi)^3} \eta^{-3} \frac{4\pi^2}{GM} (1-e^2)^{3/2}$$

avec  $\eta^3 = m_2^3/M^3$  on obtient finalement

$$f = \frac{T_b}{2\pi G} K_1^3 (1-e^2)^{3/2}$$

- (b) Application numérique :

$$f = 2,85 \cdot 10^{29} \text{ kg}$$

ou encore  $f = 0,14 M_\odot$

- (c) On donne  $i = 46^\circ$  avec l'hypothèse que  $m_1 = m_2 \equiv m$  on obtient

$$m = \frac{4f}{(\sin i)^3} = 1,5 M_\odot$$

## 1.4 Ondes gravitationnelles

### 1.4.1 Pertes par rayonnement

#### 32. Mouvement circulaire

- (a) On a vu que le moment cinétique du système avait pour expression  $\mathbf{L} = \mathbf{r} \wedge \mu \mathbf{v}$  soit pour un mouvement circulaire :  $L = \mu R v$  et la vitesse est reliée à la pulsation  $\omega$  par  $v = R\omega$ . Les masses étant supposées égales, la masse réduite  $\mu = m/2$  ce qui donne

$$L = \frac{m}{2} R^2 \omega$$

- (b) L'énergie a pour expression

$$E = \frac{1}{2} \mu v^2 - \frac{G m_1 m_2}{R} = \frac{1}{2} \mu v^2 - \frac{G m^2}{R}$$

Par ailleurs l'accélération étant purement centripète on a pour un mouvement circulaire

$$\mu \mathbf{a} = \mathbf{F} \quad \Rightarrow \quad -\mu \frac{v^2}{R} = -\frac{G m^2}{R^2}$$

en remplaçant  $\mu v^2$  dans l'expression de l'énergie on obtient

$$E = -\frac{G m^2}{2R}$$

- (c) On utilise de nouveau la relation qui lie l'accélération centripète et la force en notant que  $\mu = m/2$

$$\frac{m}{2} \left( \frac{2\pi R}{T} \right)^2 = \frac{G m^2}{R}$$

avec  $v = \frac{2\pi R}{T}$  pour un mouvement circulaire uniforme.

On retrouve alors sous une forme particulière la 3ème loi de Kepler

$$R = \left( \frac{G m}{2\pi^2} \right)^{1/3} T^{2/3}$$

d'où l'énergie totale

$$E = -\frac{G m^2}{2R} = -\frac{G m^2}{2} \left( \frac{G m}{2\pi^2} \right)^{-1/3} T_b^{-2/3}$$

#### 33. Mouvement avec perte par rayonnement

- (a) On identifie la perte d'énergie au rayonnement d'onde gravitationnelle  $\frac{dE}{dt} = -P_r$   
 (b) D'après les questions précédentes l'énergie  $E$  en fonction de la période orbitale  $T$  s'écrit

$$E = -\frac{G m^2}{2} \left( \frac{G m}{2\pi^2} \right)^{-1/3} T^{-2/3}$$

donc en supposant la période lentement variable dans le temps

$$\frac{dE}{dt} = +\frac{2}{3} \frac{G m^2}{2} \left( \frac{G m}{2\pi^2} \right)^{-1/3} T^{-5/3} \frac{dT}{dt}$$

- (c) La puissance rayonnée est donnée par

$$P_r = \frac{32G}{5c^5} L^2 \omega^4 = \frac{32G}{5c^5} \left( \frac{m}{2} \right)^2 R^4 \omega^6 = \frac{8}{5} \frac{G m^2}{c^5} \left( \frac{G m}{2\pi^2} \right)^{4/3} T^{8/3} \left( \frac{2\pi}{T} \right)^6$$

On obtient en remplaçant dans la relation liant la perte d'énergie au rayonnement d'ondes gravitationnelles

$$\frac{G m^2}{3} \left( \frac{G m}{2\pi^2} \right)^{-1/3} T^{-5/3} \frac{dT}{dt} = -\frac{8}{5} \frac{G m^2}{c^5} \left( \frac{G m}{2\pi^2} \right)^{4/3} T^{-10/3} (2\pi)^6$$

soit

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{384}{5} \frac{\pi^2 (2\pi^2)^{1/3}}{c^5} \left( \frac{G m}{T} \right)^{5/3} = -2,05 \cdot 10^3 \frac{1}{c^5} \left( \frac{G m}{T} \right)^{5/3}$$

(d) Application numérique :  $m = 1,4 \times 2.10^{30} = 2,8.10^{30}$  kg et  $T = 2,79.10^4$  s

$$\frac{dT}{dt} = \frac{2,05.10^3}{(3.10^8)^5} \left( \frac{6,67.10^{-11} \times 2,8.10^{30}}{2,79.10^4} \right)^{5/3} = 2,01.10^{-13}$$

On constate que  $\dot{P}_b = \dot{P}_{bm}/10$ . L'écart s'explique par le fait que l'on n'a pas tenu compte de l'excentricité de l'orbite.

### 1.4.2 Test du modèle

34. Remarquons tout d'abord que  $\dot{P}_b$  étant très faible, l'instant  $t_k$  de la  $k^{\text{ème}}$  révolution, s'écrit à l'ordre zéro

$$t_k \simeq kT_0$$

La durée de la  $k^{\text{ème}}$  révolution s'écrira donc

$$T_k \simeq T_0 - \dot{P}_b k T_0$$

et le décalage sur la  $k^{\text{ème}}$  période

$$\delta T_k = T_k - T_0 = -\dot{P}_b k T_0$$

Le décalage cumulé sur  $N$  période devient alors

$$\Delta t = \sum_{k=1}^N \delta T_k = -\dot{P}_b T_0 \sum_{k=1}^N k = -\dot{P}_b T_0 \frac{N(N-1)}{2}$$

soit pour  $N$  grand

$$\Delta t \simeq -\dot{P}_b T_0 \frac{N^2}{2}$$

et comme  $N$  est relié à l'instant d'observation par  $t \simeq NT_0$  on retrouve bien la relation

$$\Delta t = -\frac{\dot{P}_b}{2} \frac{t^2}{T_0}$$

35. L'allure du graphe semble bien de type parabolique comme l'indique la formule du « décalage cumulé de la période » établie ci-dessus. Il ne reste plus qu'à vérifier qu'en prenant l'origine des temps à l'année 1975 on retrouve des points situés au voisinage de la courbe de tendance.

• en 1985 soit  $t = 10$  ans =  $10 \times 365,25 \times 24 \times 3600 = 3,156.10^8$  s

$$\Delta t = -\frac{2,4.10^{-12}}{2} \frac{(3,156.10^8)^2}{2,790.10^4} = -4,3 \text{ s}$$

avec  $T_0 = 7 \text{ h } 45 \text{ mn} = 7,75 \text{ h} = 2,790.10^4$  s

• en 2005 soit  $t = 30$  ans

$$\Delta t = -3^2 \times 4,3 = -39 \text{ s}$$

ce qui valide l'analyse de la perte d'énergie par rayonnement gravitationnel.

## 2 Détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles

36. Lecture du document :

- C'est une cavité délimitée par deux miroirs permettant à la lumière d'effectuer un grand nombre d'aller-retour. On parle à son propos d'interférences à  $N$  ondes.
- Si la finesse de la cavité est élevée cela traduit le fait que les coefficients de réflexion des miroirs du FP sont proches de 1. Ainsi le nombre d'aller-retour avant un amortissement significatif de l'amplitude de l'onde sera important, ce qui explique l'allongement de la longueur des bras du Michelson de 3 à 100 km.

- (c) On entend par source laser stable, un laser qui produit un faisceau dont l'intensité lumineuse ne varie pas au cours du temps. En effet puisque la sensibilité de l'appareil dépend de la puissance du laser il faut que celle-ci ne varie pas dans le temps de façon à ne pas rajouter de « bruit » au signal utile.

37. Si l'onde incidente a une amplitude  $E_0$  avant de frapper la séparatrice, on obtiendra

- en suivant le chemin  $Ox$  :  $E_1 = E_0 t_s r_1 r'_s e^{i(\omega t - 2kL_x)}$
- en suivant le chemin  $Oy$  :  $E_2 = E_0 r_s r_2 t_s e^{i(\omega t - 2kL_y)}$

d'où une amplitude en sortie

$$\begin{aligned} E_{out} &= E_1 + E_2 \\ &= E_0 e^{i\omega t} \left[ \frac{1}{\sqrt{2}} (-1) \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-i2kL_x} + \left( -\frac{1}{\sqrt{2}} \right) (-1) \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-i2kL_y} \right] \\ &= \frac{E_0}{2} e^{i(\omega t - k(L_x + L_y))} \left[ e^{ik(L_x - L_y)} - e^{-ik(L_x - L_y)} \right] \end{aligned}$$

soit en posant  $\Delta L = L_x - L_y$  et  $L_x + L_y = 2L$

$$E_{out} = iE_0 e^{i(\omega t - 2kL)} \frac{[e^{ik\Delta L} - e^{-ik\Delta L}]}{2i}$$

On obtient en définitive pour l'amplitude de sortie

$$E_{out} = iE_0 e^{i(\omega t - 2kL)} \sin(k\Delta L)$$

38. La puissance est proportionnelle au carré de l'amplitude, soit  $P_{in} = K |E_{in}|^2 = K |E_0|^2$  et  $P_{out} = K |E_{out}|^2 = K |E_0|^2 \sin^2(k\Delta L)$ . Ce qui donne

$$P_{out} = P_{in} \sin^2(k\Delta L)$$

39. Le même calcul avec  $L_x$  (resp.  $L_y$ ) qui devient  $L_x + \delta L_x$  (resp.  $L_y + \delta L_y$ ) donne

$$\begin{aligned} E_{out} &= iE_i e^{i(\omega t - 2kL)} \sin(k\Delta L + k(\delta L_x - \delta L_y)) \\ &= iE_i e^{i(\omega t - 2kL)} \sin\left(k\Delta L + k\frac{h}{2}(L_x + L_y)\right) \\ &= iE_i e^{i(\omega t - 2kL)} \sin(k\Delta L + khL) \end{aligned}$$

d'où une puissance

$$P_{out} = P_{in} \sin^2(k\Delta L + khL)$$

puisque  $khL \ll 1$  on peut faire un développement limité au 1er ordre

$$P_{out} \simeq P_{in} \sin^2(k\Delta L) + P_{in} khL \left. \frac{\partial}{\partial u} \sin^2 u \right|_{u=k\Delta L} + \dots$$

Le premier terme correspond à la puissance en l'absence de la perturbation

$$P_{dc} = P_{in} \sin^2(k\Delta L)$$

tandis que le terme suivant correspond à la puissance lumineuse en sortie de l'interféromètre associé à la perturbation de l'onde, soit

$$\delta P_{grav} = P_{in} khL \times 2 \sin(k\Delta L) \cos(k\Delta L)$$

On retrouve l'expression demandée

$$\delta P_{grav} = P_{in} khL \sin(2k\Delta L)$$

On constate que le signal détecté est bien

- proportionnel à la grandeur physique recherchée :  $h$

- proportionnel à la longueur des bras  $L$  (plus les bras sont plus le détecteur est sensible)
  - proportionnel à la puissance du laser utilisé.
40.  $\delta P_{grav}$  sera maximal si le sinus est maximal ce qui correspond à la relation :  $2k\Delta L = \frac{\pi}{2} + n\pi$ . On en déduit que

$$P_{dc} = P_{in} \left( \mp \frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 = \frac{P_{in}}{2}$$

Le rapport du signal utile sur le signal continu donne avec les données du document 4 ( $\lambda \simeq 1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$ ,  $h \sim 10^{-21}$  et  $L \sim 100 \text{km} = 10^5 \text{m}$ )

$$\frac{\delta P_{grav}}{P_{dc}} = 2khL = \frac{4\pi}{\lambda} hL = \frac{4\pi}{10^{-6}} 10^{-21} \times 10^5 \simeq 10^{-9}$$

Le signal utile est très faible en regard de la puissance du laser. En se plaçant sur une frange sombre on cherche à éliminer le signal de fond

41. On se place donc sur une frange sombre :  $k\Delta L = n\pi$  où  $n \in \mathbb{N}$ . Dans ces conditions non seulement  $P_{dc} = 0$  mais aussi le terme du premier ordre dans le développement limité. En reprenant l'expression exacte de  $P_{out}$  on obtient

$$P_{out} = P_{in} \sin^2(n\pi + khL) = P_{in} \sin^2(khL) \simeq P_{in} (khL)^2$$

On trouve bien un signal utile proportionnel à  $h^2$  qui compte tenu de la très faible valeur de  $h$  rend le signal utile bien trop faible pour être détecté.



## Rapport sur l'épreuve écrite de Physique

Le sujet portait sur la mise en évidence de l'existence des ondes gravitationnelles prédites par la théorie de la relativité générale d'Einstein. Ces ondes gravitationnelles font aujourd'hui encore l'objet d'une intense activité de recherche.

La première partie traitait de l'une des conséquences indirectes de l'émission d'ondes gravitationnelles, la diminution de la période de rotation d'un pulsar binaire, et suivait, pour l'étudier, les grandes lignes du travail de Hulse et Taylor qui leur valut le prix Nobel de physique en 1993. La seconde partie, beaucoup plus courte, évoquait le principe de la détection directe de ces ondes par un dispositif interférentiel de type Michelson.

### Remarques générales :

Le sujet comportait environ un tiers de questions à caractère didactique principalement regroupées d'une part dans l'analyse d'un texte de vulgarisation scientifique (partie I.1.1) et d'autre part dans l'élaboration d'une activité pédagogique que les candidats devaient construire à partir d'un ensemble de documents techniques fournis dans le sujet (partie I.2.2).

Si la première partie a effectivement bien été abordée par la plupart des candidats, le jury s'étonne qu'assez peu de candidats, néanmoins professeurs, aient essayé de traiter les questions portant sur la séquence d'enseignement ; et lorsqu'ils l'ont fait, c'est le plus souvent avec un manque de cohérence et de rigueur assez inquiétant compte tenu du profil des candidats qui, dans leur quotidien professionnel, se doivent de maîtriser cet exercice.

Le jury bien entendu se réjouit d'avoir corrigé quelques très bonnes copies traitant de ces aspects didactiques mais en nombre beaucoup trop faible.

Plus généralement, même si le temps semble manquer au candidat, il doit se convaincre qu'il a de meilleures chances de réussir l'épreuve en apportant la preuve qu'il maîtrise les questions abordées et ne se contente pas de réponses hâtives ou superficielles. La qualité de la communication écrite, aussi bien dans la richesse de son contenu que dans sa forme, est prise en considération avec attention par le jury :

- les schémas doivent être réalistes et légendés ;
- les lignes de calculs doivent être articulées par des phrases ou des connecteurs logiques ;
- les réponses doivent être précises et argumentées, il ne s'agit pas seulement de répondre juste mais aussi de montrer sa capacité à expliquer ;
- un commentaire sur les résultats obtenus est grandement apprécié et montre la capacité d'analyse du professeur vis-à-vis de sa production. On évitera le lapidaire « C.Q.F.D. » qui positionne le candidat en exécutant d'une commande, plutôt que dans une attitude réflexive sur ce qu'il peut démontrer ou expliquer.

Précisons enfin qu'environ 10 % de la note était consacrée à la qualité de la copie : présentation, orthographe et rigueur rédactionnelle, de façon à valoriser les candidats qui ont fait cet effort de communication.

Le jury invite les candidats à se reporter aux rapports des années précédentes qui restent toujours d'actualité.

### Remarques particulières :

#### I Le système binaire PRS 1913+16

##### I.1 Quelques informations sur l'objet céleste répertorié sous la désignation : PSR B1913+16.

###### I.1.1 Analyse d'un document

**Q1** - Le nombre de chiffres significatifs doit être en rapport avec les données du texte.

**Q2** - La taille de la Voie Lactée n'est pas toujours connue et comparer deux grandeurs suppose de les avoir exprimées dans la même unité pour en faire le rapport.

**Q3** - La plupart des candidats semblent ignorer la palette d'instruments dont disposent actuellement les astrophysiciens pour exploiter la totalité du spectre électromagnétique.

**Q5** - Toutes les données utiles étaient fournies dans le texte, encore fallait-il les convertir dans les bonnes unités.

**Q6** - Il ne suffisait pas de reprendre les questions telles quelles : que signifie « sources radios » ? que veut dire « a consommé tout son carburant » ? que signifie « s'effondre » ? Il s'agissait d'imaginer un questionnement progressif, partant des difficultés prévisibles des élèves et il fallait aussi rédiger la correction des questions proposées.

**Q7** - Quelle que soit l'argumentation choisie, pour ou contre la place du hasard en science, il était important de proposer des exemples pertinents, récents et suffisamment développés en physique. Combien d'Archimède a-t-on vu sortir tout nu de sa baignoire et de Newton assommé par une pomme ! Les images d'Épinal de la science faisaient partie des chausse-trappes que les candidats se devaient d'éviter. Le jury suggère aux futurs candidats de déminer les lieux communs de l'histoire des sciences par la lecture de quelques auteurs « poil à gratter » comme Jean-Marc Lévy Leblond, Françoise Balibard et quelques autres.

### **I.1.2 Estimation de la taille d'un pulsar**

**Q8** - La nature solide de la rotation a rarement été discutée.

**Q9** - La notion de moment d'inertie et de moment cinétique est ignorée de la plupart des candidats. Une définition doit contenir la signification des grandeurs qui interviennent et être éventuellement illustrée d'un schéma. Enfin, précisons que la relation demandée entre moment cinétique et vecteur rotation est une relation vectorielle.

**Q10** - La conservation du moment cinétique n'est souvent pas justifiée. Quant à la troisième loi de Kepler souvent invoquée, elle n'apporte pas les arguments attendus ici.

Pour l'application numérique, il fallait là encore prendre soin d'utiliser des unités cohérentes et dans tous les cas de discuter de la vraisemblance du résultat.

## **I.2 Effet Doppler-Fizeau**

### **I.2.1 Théorie**

**Q11** - La modification de la fréquence (plus ou moins aiguë ou plus ou moins grave suivant le mouvement de la source par rapport à l'observateur) n'est pas toujours mentionnée.

**Q12** - Toutes les théories physiques ont été passées en revue : physique classique, relativité générale et même mécanique quantique ! Il est de plus assez stupéfiant qu'un nombre non négligeable de candidats ne puissent énoncer le contenu physique du principe de relativité alors que celui-ci est enseigné à présent en classe de terminale.

**Q13** - La démonstration de la variation de la période du signal reçu en fonction de la vitesse de la source a souvent été assez bien menée mais le jury attendait l'utilisation de schémas clairs qui aidaient à la compréhension du raisonnement étant donné que la formule attendue était fournie dans le texte.

**Q15** - Là encore un schéma permettait d'expliquer pourquoi la projection sur la direction de visée était nécessaire. De plus une projection ne suffit pas, il faut aussi que la distance émetteur-observateur soit grande devant la distance parcourue par la source pendant une période.

**Q16** - Curieusement alors que toute l'information était contenue dans le texte à analyser très peu de candidats ont su répondre correctement à cette question.

### **I.2.2 Mise en œuvre d'une activité expérimentale en TS**

**Q17** – a) L'origine des raies du sodium est incomprise de la plupart des candidats.

b) Les schémas proposés pour réaliser le spectre sont souvent irréalistes : il manque la fente-source et presque toujours la lentille qui sert, rappelons-le, à faire l'image de la fente sur l'écran. Profitons-en pour indiquer qu'un professeur se doit de maîtriser les techniques élémentaires de dessin !

e) Le facteur 4 n'a pratiquement jamais été élucidé.

f) Un certain nombre de candidats n'ont pas vu le document 3 et ont travaillé à la règle sur le document 2, ce qui a entraîné des résultats très imprécis.

Les incertitudes de mesure n'ont souvent pas été évaluées, même par les candidats qui ont compris comment faire.

**Q18** - Dans sa pratique professionnelle courante, la préparation de l'écriture d'une activité

d'apprentissage demande au professeur de se constituer une documentation qu'il doit exploiter pour délimiter les savoirs et savoir-faire qui seront mobilisés dans l'activité.

Dans cette question, il était demandé aux candidats, après des questions préliminaires lui permettant de s'appropriier le sujet d'étude (Q17a à Q17f), d'en opérer une transposition didactique et pédagogique tenant compte des connaissances exigibles au niveau donné.

Il ne suffisait donc pas d'articuler dans un timing donné les questions allant de 17a à 17f avec leurs réponses, mais bien d'en opérer une transposition à la portée des élèves en partant de prérequis réalistes, sans excéder la demande institutionnelle des programmes. La prise en compte des difficultés attendues des élèves devait amener à exposer les activités d'appropriation des documents, des concepts, du matériel. Il s'agissait également de reformuler des questions adaptées au niveau des élèves et d'apporter éventuellement une aide pour comprendre certains documents.

### **I.3 Caractéristiques du système binaire**

#### **I.3.1 Transformation du pb à 2 corps en pb à 1 corps**

**Q19** - Beaucoup de candidats se sont contentés d'affirmer le résultat sans justification.

**Q20** - Comme toute force, la force gravitationnelle est un vecteur et à ce titre doivent être précisés non seulement sa norme mais aussi sa direction et son sens.

**Q21** - Dans la définition de  $R^*$ , il ne suffit pas de dire que  $G$  est fixe.

#### **I.3.2 Paramètres orbitaux**

**Q25** - L'énoncé des lois de Képler est resté trop souvent évasif voire incohérent (une planète ne balaie pas une aire par exemple).

**Q27** – Là encore un dessin était le bienvenu pour étayer le raisonnement.

**Q28** – Exercice classique de mécanique mais où beaucoup de candidats n'ont pas pris soin d'explicitier la nature vectorielle de l'accélération centripète pour la mettre en relation avec la force de gravitation. Il en résulte des démonstrations très approximatives (si tant est qu'une démonstration fautive puisse être qualifiée d'approximativement vraie).

**Q29** – Le passage de la particule fictive au pulsar n'a quasiment jamais été traité. C'était pourtant l'objet de la question Q23 qui préparait ce travail.

### **I.4 Ondes gravitationnelles**

#### **I.4.1 Pertes par rayonnement**

**Q32** – Il fallait bien entendu utiliser la masse réduite du système comme le suggérait le renvoi à la question Q24

**Q33** – Bien qu'associé à une perte d'énergie le signe « - » n'a très souvent pas été pris en compte pour relier la puissance rayonnée avec le taux de variation d'énergie du système.

#### **I.4.2 Test du modèle**

**Q34-Q35** – Ces questions n'ont jamais été traitées.

### **II Détecteur d'ondes gravitationnelles**

**Q36** – Très peu de candidats savent ce qu'est une cavité Fabry-Perot. Il était donc évidemment difficile dans ces conditions de comprendre l'allongement du parcours dans chaque bras.

**Q37 à Q39** – Ces questions ont très rarement été traitées.

**Q40** - Il n'y a pas que la valeur  $\pi/2$  qui rend le sinus maximal.

**Q41** - Il n'y a pas que la valeur  $\pi$  qui annule le sinus.

# SUJET DE CHIMIE

## A l'interface de la chimie avec la physique : la spintronique

Pouvons-nous réduire jusqu'à une très petite échelle les unités susceptibles de stocker l'information ? Cette question n'a cessé d'agiter la communauté scientifique associant chimistes et physiciens depuis la conjecture de Feynman en 1959 « *There is plenty of room at the bottom* » (« Il y a beaucoup d'espace en bas ») ; cet illustre physicien considérait alors qu'il devait être possible de manipuler les atomes un à un, comme briques de construction, et il proposait même d'offrir 1000 \$ à celui qui parviendrait à mettre les informations d'une page de livre à une échelle 25 000 fois plus petite.... A ce jour des millions de documents ont été numérisés et bientôt des bibliothèques entières le seront aussi. Encore très actuel, le défi de la miniaturisation conduit des laboratoires du monde entier à chercher à dépasser les limites de l'électronique en développant, outre l'électronique moléculaire, une technique plus prometteuse la spintronique ; cette électronique de spin exploite une propriété supplémentaire de l'électron, la propriété quantique de spin, et permet d'imaginer des circuits à l'échelle de quelques atomes. Les chimistes contribuent à cette aventure scientifique en synthétisant des matériaux inorganiques (oxydes métalliques) ou métallo-organiques (complexes à ligands organiques) capables de conserver le spin des électrons qui s'y trouvent et de s'auto-assembler en couches minces.

Dans ce sujet, on se propose d'étudier le monde atomique à travers l'élaboration historique des modèles de l'atome et leur construction pédagogique avec les élèves, d'analyser sommairement le principe de la spintronique et d'étudier quelques synthèses et propriétés d'espèces chimiques constituant les matériaux de la spintronique.

Le sujet comporte trois parties indépendantes :

- I. Du collège au lycée : l'évolution du modèle de l'atome
- II. De la chimie quantique à la spintronique
- III. Des matériaux pour la spintronique

Le sujet comporte des questions pédagogiques clairement identifiées dans le sujet par l'abréviation « **QP** » comme par exemple I.4.**QP**.

L'ensemble des questions pédagogiques représente le tiers du total des points accordés à cette épreuve. Les candidats sont donc vivement invités à consacrer le temps nécessaire en rapport avec l'importance accordée à ces questions. Les réponses apportées doivent être suffisamment **explicites et concises** de façon à mettre en avant les qualités pédagogiques d'un professeur de physique-chimie.

## Données

- Constante de Planck :  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J.s
- Moment magnétique associé au spin, magnéton de Bohr :  $\mu_B = 9,27 \times 10^{-24}$  J.T<sup>-1</sup>
- Rayon de Bohr :  $a_0 = 51,9 \times 10^{-12}$  m
- Constante des gaz parfaits :  $R = 8,31$  J.K<sup>-1</sup>.mol<sup>-1</sup>
- Numéro atomique :  $Z_{Fe} = 26$  ;  $Z_{Bi} = 83$  ;  $Z_O = 8$
- Masses molaires atomiques en g.mol<sup>-1</sup> :  $M_H = 1,00$  ;  $M_C = 12,0$  ;  $M_N = 14,0$  ;  $M_O = 16,0$  ;  $M_{Fe} = 55,8$
- Produit de solubilité à 298 K de  $Ce(OH)_4(s)$  :  $K_S = 1,3 \times 10^{-50}$
- Potentiels standard à 298 K (les ions considérés sont tous dissous en solution aqueuse) :  
 $E^0(Cr_2O_7^{2-}/Cr^{3+}) = 1,33$  V ;  $E^0(Fe^{3+}/Fe^{2+}) = 0,77$  V ;  $E^0(Ce^{4+}/Ce^{3+}) = 1,71$  V ;  $E^0(Zn^{2+}/Zn(s)) = -0,760$  V ;  
 $E_{ECS}^0 = 0,244$  V (E.C.S = électrode au calomel saturée en  $KCl(s)$ )  
 $E^0([Fe(phen)_3]^{3+}(bleu)/[Fe(phen)_3]^{2+}(rose)) = 1,04$  V, *phen* = orthophénantroline
- A 298 K, on prendra  $\frac{RT}{F} \ln(x) = 0,06 \lg(x)$  en V
- Données utiles à la spectroscopie RMN du proton et à la spectroscopie IR :

### Spectroscopie Infrarouge

Liaison	Type de composé	Nb d'onde (cm <sup>-1</sup> )	Intensité	Liaison	Type de composé	Nb d'onde / cm <sup>-1</sup>	Intensité
O-H	alcool libre	3580 - 3670	variable, aiguë	C=O	ester	1735 - 1750	forte
O-H	alcool associé	3200 - 3400	forte, large	C=O	aldéhyde, cétone	1650 - 1730	forte
C-H	alcyne	3300	forte	C=O	acide carboxylique.	1680 - 1710	forte
N-H	amine primaire : 2 bandes amine secondaire : 1 bande	3100 - 3500	moyenne	C=O	amide	1650 - 1700	forte
C-H	alcène	3010 - 3100	moyenne	C=N	imine	1640 - 1690	moyenne
C-H	aromatique	3030 - 3080	moyenne	C=C	alcène	1620 - 1680	variable
C-H	alcane	2800 - 2960	forte	N-H	amine, amide	1560 - 1640	moyenne
C-H	aldéhyde	2750 - 2900	moyenne	C=C	aromatique	1450 - 1600	3 ou 4 bandes
O-H	acide carboxylique	2500 - 3200	variable, large	C-H	CH <sub>3</sub>	1370 - 1390	forte, 2 bandes
C≡N	nitrile	2120 - 2260	variable	C-O	éther	1070 - 1250	forte
C≡C	alcyne	2100 - 2250	variable	C-C	alcane	1000 - 1250	forte

### Spectroscopie RMN du <sup>1</sup>H (R : groupe aliphatique ; Ar : noyau aromatique)

H concerné (en gras)	$\delta$ (ppm) plage indicative	H concerné (en gras)	$\delta$ (ppm) plage indicative
<b>ROH</b>	0,5 - 6	<b>R-CH<sub>2</sub>-OH</b>	3,3 - 4,0
<b>RNH<sub>2</sub></b>	0,8 - 1,8	<b>R-CH<sub>2</sub>-OR</b>	3,3 - 3,9
<b>R-CH<sub>3</sub></b>	0,9 - 1,3	<b>Ar-OH</b>	4,5 - 12
<b>R-CH<sub>2</sub>-R'</b>	1,2 - 1,6	<b>R<sub>2</sub>C=CH<sub>2</sub></b>	4,6 - 5,0
<b>R<sub>2</sub>N-CH<sub>3</sub></b>	2,2 - 3,4	<b>R<sub>2</sub>C=CH-R</b>	5,2 - 5,7
<b>Ar-CH<sub>3</sub></b>	2,2 - 2,5	<b>Ar-H</b>	6,8 - 8,5
<b>Ar-CH<sub>2</sub>-R</b>	2,3 - 2,8	<b>RCHO</b>	9 - 10

## I. Du collège au lycée : l'évolution du modèle de l'atome

Dans la quête de la compréhension du monde, les scientifiques élaborent des théories et des modèles pour rendre compte des phénomènes qu'ils étudient. La formation scientifique donnée aux élèves, du collège au lycée, s'attache à leur faire comprendre les liens entre les faits, les modèles et les théories scientifiques. L'interprétation d'expériences réalisées en classe ou d'expériences historiques amène l'enseignant à construire progressivement un modèle de l'atome, à montrer son efficacité dans sa capacité à prédire et ses limites dans son incapacité à rendre compte de certains faits qui nécessitent alors de le faire évoluer.

I.1.QP. Une expérience classiquement présentée en classe de quatrième pour travailler sur la modélisation de la matière est celle du mélange de deux gaz dont l'un est coloré.



photographie1



photographie 2



photographie 3

Proposer une activité permettant de faire travailler les élèves sur le modèle particulaire, en précisant :

- la (ou les) situation(s) de départ représentée(s) sur les photos ci-dessus,
- les connaissances mobilisées sur le modèle particulaire et celles qui pourraient être construites,
- les productions attendues des élèves.

I.2.QP. Compléter le tableau figurant en **annexe 1** (à rendre avec la copie) pour donner une vision synthétique de l'évolution du modèle de l'atome construit de la classe de quatrième à la classe de première S. Des extraits de BOEN sont donnés en annexe 5.

I.3.QP. La mise en perspective historique étant recommandée dans tous les préambules des programmes, les professeurs proposent très souvent à leurs élèves de troisième ou de seconde de réaliser une frise chronologique sur laquelle figure les siècles, les schémas des modèles des atomes et les noms, (photos ou portraits) des savants les ayant élaborés. A partir de vos connaissances, représenter une frise historique la plus complète possible sur le sujet.

I.4. Un manuel scolaire de seconde propose l'exercice ci-dessous :

### Des ions dans nos aliments

Le sel de table que nous consommons dans notre alimentation est indispensable à l'organisme, en quantités limitées.

C'est en réalité du chlorure de sodium, un solide ionique.

1. Donner la structure électronique de l'atome de sodium, de noyau  ${}^{23}_{11}\text{Na}$ , et de l'atome de chlore, de noyau  ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ .

2. En déduire la formule des ions sodium et chlorure que nous ingérons.



I.4.1.QP. Quelle méthodologie peut-on donner aux élèves pour répondre aux deux questions posées ?

I.4.2.QP. Quelles sont les compétences visées par cet exercice ?

I.5. En 1885, Anders Jonas Angström, astronome et physicien suédois, pionnier dans l'étude des spectres, identifie quatre raies dans le spectre visible de l'hydrogène, de longueurs d'onde : 656,2 nm, 486,1 nm, 434,0 nm et 410,1 nm (figure 1).

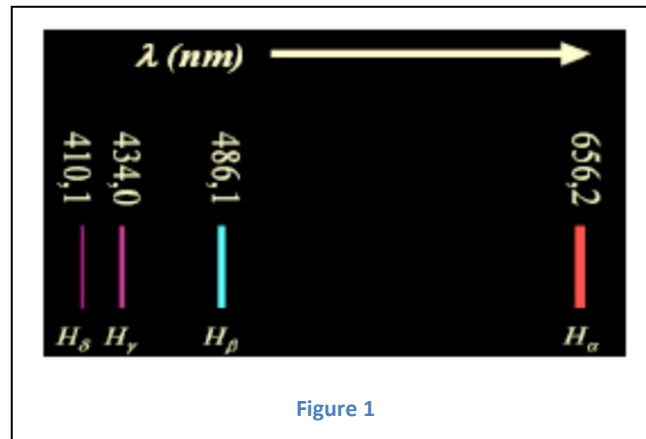


Figure 1

Johann Jakob Balmer, physicien et mathématicien suisse, établit alors empiriquement que ces quatre longueurs d'onde  $\lambda$  peuvent s'exprimer par la formule :  $\frac{1}{\lambda} = G \frac{n^2 - 4}{n^2}$  avec  $n > 2$ .

Cette formule, généralisée en 1888 sous la forme  $\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right)$  par Walter Ritz et Johannes Rydberg, a été validée expérimentalement par la découverte de nouvelles raies d'émission de l'hydrogène dans le domaine de l'ultraviolet. Dans cette relation,  $p$  est un entier (indice de la série) et  $n$  un entier (indice de la raie) avec  $n > p$ .

I.5.1. A partir de la formule établie par Balmer, attribuer les valeurs de  $n$  ( $n = 3, 4, 5, 6$ ) aux quatre raies du spectre visible de l'hydrogène en explicitant la démarche.

I.5.2. Montrer que la constante de Rydberg  $R_H$  est égale à  $4G$  et déterminer la valeur de cette constante.

I.5.3. Déduire de ce qui précède que l'énergie  $E_n$  des différents niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène est donnée par la relation :  $E_n (eV) = -\frac{13,6}{n^2}$  avec  $n \in \mathbb{N}^*$ .

I.5.4. Définir l'énergie d'ionisation d'un atome et déterminer sa valeur pour l'atome d'hydrogène.

I.5.5. QP. Comment expliquer à des élèves de première S, que cette étude spectroscopique a permis de faire évoluer le modèle de l'atome ?

Le physicien danois Niels Bohr propose en 1913 une première théorie permettant d'interpréter l'existence des raies d'absorption et d'émission. Pour cela, il utilise le modèle planétaire de l'atome adopté à l'époque et quantifie le moment cinétique de l'électron, ce qui lui permet de justifier la formule expérimentale de Balmer. Cependant, ce modèle ne permettant pas d'expliquer le spectre des atomes autres que l'hydrogène et la structure hyperfine des raies de l'hydrogène mise en évidence par Zeeman, la théorie de Bohr est mise en défaut. En 1925, l'avènement de la théorie quantique et l'équation de Schrödinger donnent une nouvelle approche du modèle de l'atome.

## II. De la chimie quantique à la spintronique.

La résolution de l'équation de Schrödinger permet de déterminer la fonction d'onde  $\psi_{n,l,m}(r, \theta, \varphi)$  associée à l'électron de l'atome d'hydrogène,  $(r, \theta, \varphi)$  étant les coordonnées sphériques. Cette fonction peut s'écrire sous la forme :  $\psi_{n,l,m} = R_{n,l}(r) \cdot Y_{l,m}(\theta, \varphi)$ ,  $R_{n,l}(r)$  étant la partie radiale et  $Y_{l,m}(\theta, \varphi)$  la partie angulaire.

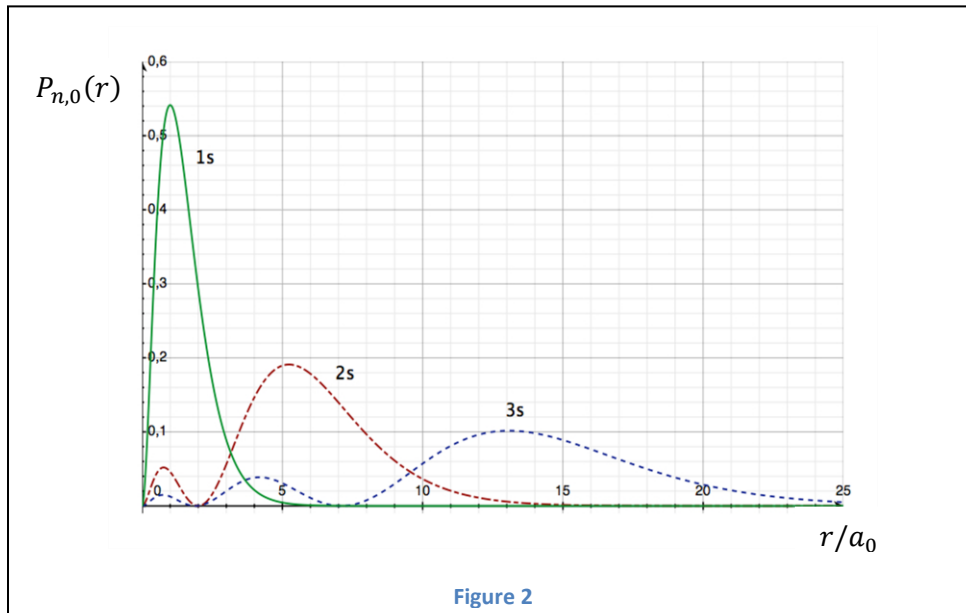
II.1. Indiquer à quoi correspondent les indices  $n, l, m$ .

II.2. On donne les expressions mathématiques des parties radiales des fonctions d'onde 1s et 2s :

$$R_{1,0} = A e^{-r/a_0} \text{ et } R_{2,0} = A'(2 - r/a_0) e^{-r/2a_0}$$

Justifier les indices dans la notation  $R_{1,0}$  et  $R_{2,0}$ .

II.3. On appelle densité de probabilité radiale  $P_{n,0}(r)$ , la quantité  $4\pi r^2 [R_{n,0}(r)]^2$ . La figure 2 donne les courbes représentant l'évolution de  $P_{n,0}(r)$  en fonction de  $r/a_0$  pour  $n = 1, 2$  et 3.



II.3.1. **QP.** Comment utiliser la courbe  $P_{1,0}(r)$  pour expliquer à des élèves la différence existant entre le modèle classique (modèle de Bohr) et le modèle quantique de l'atome d'hydrogène. Quel schéma simplifié de l'atome d'hydrogène, pris dans son état fondamental, peut-on donner pour le modèle quantique ?

II.3.2. A quoi correspondent les maxima des courbes  $n = 1, 2$  et  $3$  ?

II.4. Pour décrire le comportement des électrons des atomes, la fonction d'onde  $\psi_{n,l,m}$  seule ne suffit pas, il faut lui adjoindre le spin. La genèse de ce concept au début du XX<sup>ème</sup> siècle a été d'autant plus difficile que ce moment cinétique intrinsèque n'a pas d'équivalent en mécanique classique. Pour l'électron, le spin est égal à  $\frac{\hbar}{2}$ .

II.4.1. Quelles sont les deux valeurs que peut prendre  $m_s$  le nombre quantique de spin ?

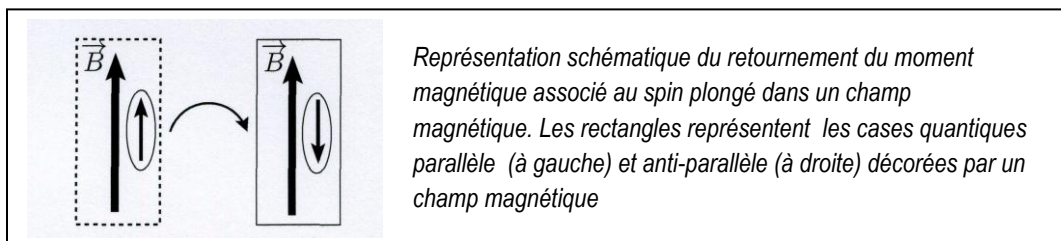
II.4.2. Représenter symboliquement un électron dans chacun des deux états de spin appelés « up » et « down ».

II.5. Alors que l'électronique actuelle repose sur la charge électrique de l'électron, la spintronique exploite la propriété quantique du spin de l'électron.

II.5.1. Un chercheur français a été colauréat du prix Nobel de physique en 2007 pour ses travaux sur la magnétorésistance géante (Giant Magneto Resistance GMR) en lien avec la spintronique. Quel est le nom de ce chercheur ?

II.5.2. Considérons un électron  $1s$  placé dans un champ magnétique extérieur  $\vec{B}$  de direction verticale.

Formellement, l'état (ou la case quantique)  $1s$  éclate en deux états (ou cases) d'énergies différentes. Nous parlerons de « décoration » d'une case quantique par le champ magnétique extérieur résultant en une case parallèle et une case anti-parallèle.



Si  $\mu_B$ , magnéton de Bohr, désigne la valeur du moment magnétique associé au spin de l'électron, déterminer l'énergie de retournement  $E_{flip}$  (en eV) pour passer de la situation parallèle à la situation anti-parallèle, la valeur  $B$  du champ magnétique étant égale à 1 tesla.

Finalement, un champ magnétique interagissant avec le spin de l'électron est susceptible de différencier les mouvements d'électrons « up » et « down » au sein d'un matériau.



II.5.3. **QP.** Le document en **annexe 2** décrit un modèle simple de la magnétorésistance géante et de sa principale application. Deux compétences occupent une place centrale en terminale S : « extraire » et « exploiter ».

Proposer un exemple de texte attendu des élèves auxquels aurait été donnée la consigne suivante : écrire un texte comportant au maximum quinze lignes expliquant les termes "vanne de spin" et "spintronique".

### III. Les matériaux pour la spintronique.

Les premiers matériaux utilisés en spintronique, dans les années 1995, étaient des multicouches alternant un métal ferromagnétique et un métal non magnétique, par exemple fer/cobalt ou fer/cuivre. Les avancées technologiques en matière de croissance de films minces d'oxydes ont favorisé le développement de recherches sur les oxydes ferromagnétiques comme  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  et multiferroïques comme  $\text{BiFeO}_3$  plus efficaces pour le filtrage de spin que les métaux magnétiques. Enfin, comme dans le domaine de l'électronique moléculaire, celui de la spintronique moléculaire recherche des espèces chimiques possédant de bonnes propriétés magnétiques. Sont explorées actuellement de nombreuses voies de synthèse de complexes métalliques à base d'ions de métaux de transition ou de lanthanides et de ligands organiques ; parmi les complexes étudiés, nombre d'entre eux comportent plusieurs ions métalliques et leurs assemblages forment des « clusters ».

#### III.1. Les métaux magnétiques et non magnétiques des multicouches.

III.1.1. Les métaux sont étudiés en classe de troisième. Un professeur distribue à ses élèves de troisième des caisses remplies d'objets métalliques divers et leur propose l'activité suivante :

##### « Chez le ferrailleur »

Le ferrailleur vous propose de prendre le contenu de votre caisse pour 5 euros.

Vous devez savoir si vous faites affaire avec lui ou non !  
Expliquez à l'écrit comment parvenir à identifier les métaux.

Etablir une pré-facture détaillée pour votre paiement.



III.1.1.1. **QP.** Quelles compétences peuvent être évaluées lors de cette activité ?

III.1.1.2. **QP.** Quelles aides peuvent être apportées à des élèves rencontrant des difficultés ?

III.1.2. **QP.** Nommer les différentes familles de métaux. Placer ces familles et quelques éléments de ces familles dans la classification périodique donnée en **annexe 3** (à rendre avec la copie).

III.1.3. Donner la configuration électronique des atomes de fer et de cobalt.

III.1.4. Le fer  $\alpha$  cristallise en adoptant la structure cubique centrée (cc).

III.1.4.1. Faire un schéma de la maille élémentaire et établir la relation donnant le paramètre de la maille  $a$  en fonction du rayon  $R$  de l'atome de fer.

III.1.4.2. Déterminer la compacité de la maille et conclure.

#### III.2. Les oxydes ferromagnétiques et multiferroïques.

III.2.1. Quels sont les ions monoatomiques courants du fer, du cobalt, de bismuth et de l'oxygène ?

III.2.2. Dans l'oxyde multiferroïque  $\text{BiFeO}_3$ , quel est le degré d'oxydation de l'ion fer ?

III.2.3. Dans l'oxyde magnétique  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ , étudier les différents degrés d'oxydation possibles du fer.

III.2.4. La minette de Lorraine est un minerai constitué en partie d'hématite ou oxyde de fer(III)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . On se propose de déterminer de deux manières différentes la teneur en fer dans la minette de Lorraine.

### III.2.4.1. Protocole donné à des olympiades régionales de la chimie.

Pour faciliter sa pesée et sa mise en solution, l'échantillon de minette de Lorraine a été finement broyé. Il a été, par ailleurs, séché à l'étuve pendant plusieurs jours.

#### Étape 1 : mise en solution

- Peser, exactement, une masse  $m$  de minette de Lorraine de l'ordre de 0,120 à 0,130 g directement dans un erlenmeyer. Noter cette valeur pour vos calculs ultérieurs.
- Ajouter 25 mL d'une solution d'acide chlorhydrique à 6 mol.L<sup>-1</sup>.
- Chauffer à « douce ébullition » jusqu'à dissolution complète du minerai.
- L'élément fer se trouve alors essentiellement sous forme d'ions  $Fe^{3+}$ .
- Laisser refroidir (au besoin sous un filet d'eau). On obtient la solution  $S_1$ .

**Étape 2 : réduction des ions  $Fe^{3+}$**  : le titrage de l'élément fer se faisant à partir d'ions  $Fe^{2+}$ , les ions  $Fe^{3+}$  sont préalablement réduits par le zinc métal.

- Ajouter par petites quantités, environ 2 g de zinc métal à la solution  $S_1$ , tout en agitant.
- Tout le zinc doit disparaître ainsi que la coloration des ions  $Fe^{3+}$ . Eventuellement, ajouter une petite quantité de zinc si la décoloration n'est pas parfaite. On obtient la solution  $S_2$ .

**Étape 3 : titrage des ions  $Fe^{2+}$**  : le titrage est réalisé par une solution de dichromate de potassium de concentration molaire  $\frac{1}{120}$  mol.L<sup>-1</sup>, en milieu acide et en présence de diphénylaminésulfonate de baryum comme indicateur coloré.

- A la solution  $S_2$ , ajouter 20 mL d'acide sulfurique de concentration molaire 1 mol.L<sup>-1</sup>, 5 mL d'acide phosphorique commercial et 10 gouttes d'indicateur.
- Ajouter, à l'aide d'une burette graduée, la solution de dichromate de potassium, la solution prend progressivement une teinte verte. L'équivalence est observée lors du passage du vert au violet très foncé. La teinte violette apparaît au cours du titrage et disparaît très vite. Ajouter très lentement la solution de dichromate de potassium au voisinage de l'équivalence.
- Noter le volume  $V_E$  de solution de dichromate de potassium versé à l'équivalence.

III.2.4.1.a. En les justifiant, écrire les équations des réactions mises en jeu au cours des étapes 1,2 et 3.

III.2.4.1.b. Déterminer, en explicitant votre raisonnement, la teneur massique en fer de ce minerai lorrain. Pour un échantillon de masse  $m = 0,122$  g, le volume obtenu à l'équivalence est  $V_E = 17,5$  mL.

### III.2.4.2. Protocole de titrage potentiométrique à courant nul.

Les étapes 1 et 2 sont reconduites en partant d'une masse de minerai  $m = 0,123$  g. Le volume de la solution  $S_2$  obtenue est ajusté dans une fiole jaugée à 100,0 mL. Un volume  $V = 10,0$  mL de la solution obtenue est prélevé, puis titré par une solution de sulfate de cérium(IV) de concentration molaire  $C_{ox} = 0,0050$  mol.L<sup>-1</sup>. Ce titrage est suivi par potentiométrie à courant nul et la courbe donnant la différence de potentiel  $\Delta E$  en fonction du volume  $V_{ox}$  de la solution de sulfate de cérium(IV) versé est représentée en figure 3.

III.2.4.2.a. Faire un schéma du dispositif expérimental sachant qu'une des électrodes utilisées est une électrode au calomel saturée. Préciser la nature de la deuxième électrode et justifier son choix.

III.2.4.2.b. Expliquer ce qu'on entend par potentiométrie à courant nul.

III.2.4.2.c. Expliquer, par un calcul simple, pourquoi la solution de sulfate de cérium(IV) est préparée en milieu acide sulfurique concentré.

III.2.4.2.d. Déterminer la concentration molaire  $C_{red}$  en ions  $Fe^{2+}$  dans la solution étudiée et en déduire la teneur en fer du minerai lorrain.

III.2.4.2.e. Le titrage potentiométrique à courant nul peut être remplacé par un titrage colorimétrique utilisant comme indicateur coloré, la ferroïne ou orthophénantroline de fer(II). Expliquer le principe de ce titrage et le changement de couleur attendu.

III.2.4.2.f. Les expressions de la différence de potentiel  $\Delta E$ , avant et après l'équivalence, s'écrivent en fonction de  $C_{ox}$ ,  $C_{red}$ ,  $V_{ox}$ ,  $V$  et des potentiels standard.

Montrer que ces expressions sont celles écrites ci-dessous, en précisant ce que représentent les potentiels standard  $E_1^0$  et  $E_2^0$ .

$$\Delta E = E_1^0 - E_{ECS} + 0,06 \cdot \lg \frac{C_{ox} \cdot V_{ox}}{C_{red} \cdot V - C_{ox} \cdot V_{ox}} \quad \text{et} \quad \Delta E = E_2^0 - E_{ECS} + 0,06 \cdot \lg \frac{C_{ox} \cdot V_{ox} - C_{red} \cdot V}{C_{red} \cdot V}$$

III.2.4.2.g. Déterminer, à l'aide de la courbe tracée expérimentalement et représentée figure 3, les valeurs des potentiels standard des deux couples d'oxydoréduction mis en jeu et les comparer aux valeurs tabulées. Conclure simplement quant aux écarts observés.

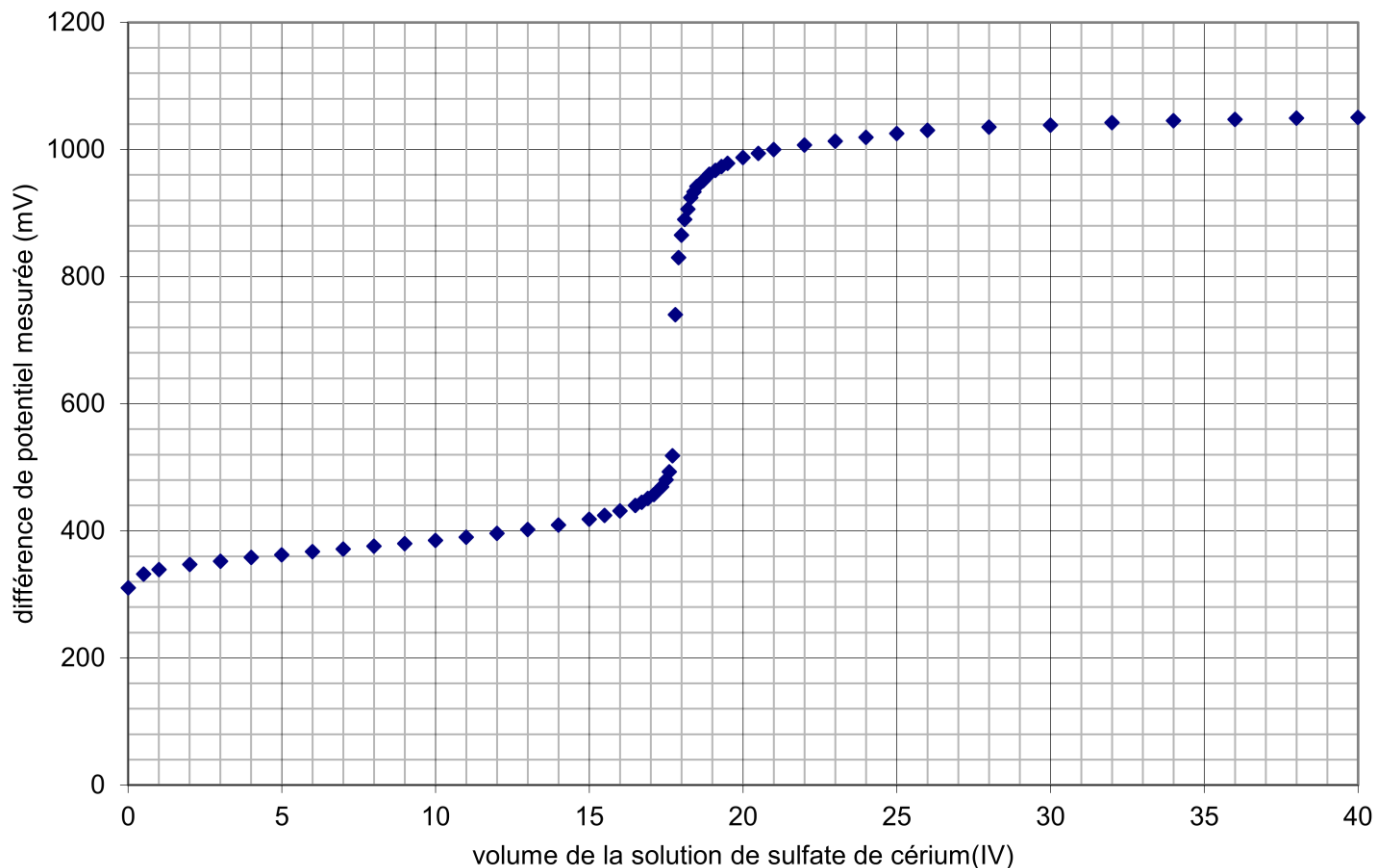


figure 3

### III.3 Les complexes de la spintronique moléculaire.

Dans cette partie sont étudiées deux voies de synthèse de complexes comportant un ion central de fer(II) et des ligands atranes. Le ligand atrane est très utilisé en chimie de coordination car il possède la propriété de complexer aussi bien des ions métalliques comme le fer, le vanadium ou encore le cuivre, que des non métaux comme le phosphore, le bore ou le silicium. Ce ligand conduit ainsi à des complexes présentant des propriétés remarquables, en particulier pour la spintronique moléculaire.

III.3.1. Le programme de terminale S (**annexe 5**) aborde les grandes catégories de réaction de la chimie organique et la notion de mécanisme réactionnel.

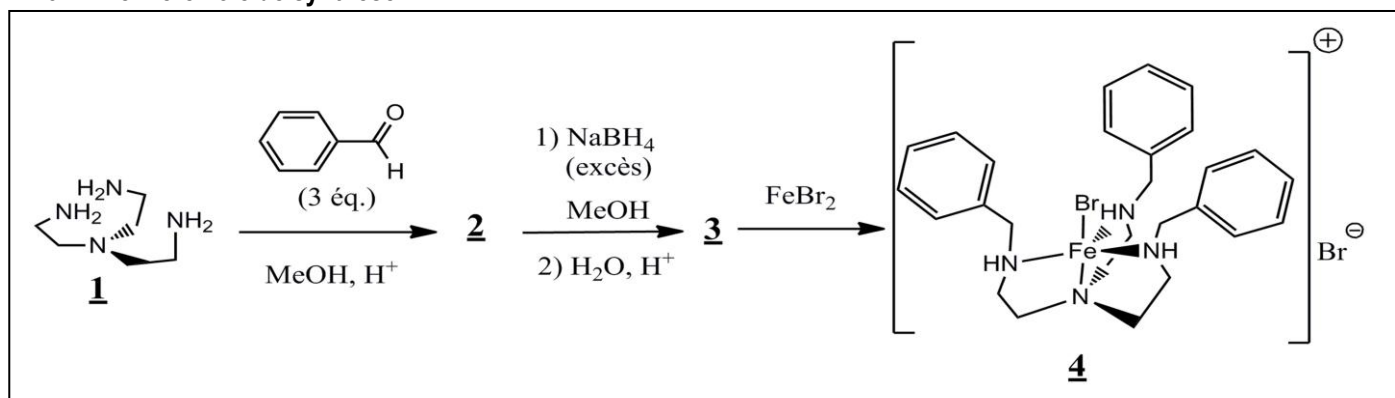
III.3.1.1.QP. Proposer aux élèves un exemple concret illustrant chacune des catégories de réaction en précisant les conditions expérimentales.

III.3.1.2.QP. Proposer une démarche permettant aux élèves d'identifier un site donneur ou un site accepteur dans une molécule.

III.3.1.3. Sur l'exemple de la réaction de nitration du toluène (méthylbenzène), identifier l'électrophile et proposer un mécanisme réactionnel permettant de justifier l'orientation de la mono-nitration.

III.3.1.4.QP. Le document donné en **annexe 4**, à rendre avec la copie, propose deux mécanismes réactionnels extraits d'une copie d'élève. Identifier les mécanismes réactionnels abordés et les erreurs éventuellement commises par cet élève. Proposer un corrigé précis de la copie avec d'éventuels conseils à donner à l'élève.

### III.3.2. Première voie de synthèse.



III.3.2.1 Donner la formule semi-développée du composé **2**.

III.3.2.2 Quel est le nouveau groupe caractéristique formé ?

III.3.2.3 En utilisant des formules simplifiées, proposer un mécanisme réactionnel expliquant la formation du composé **2**.

III.3.2.4 Les auteurs de ce travail ont caractérisé le composé **2** par spectroscopie RMN du proton (300 MHz, CDCl<sub>3</sub>). Les signaux obtenus sont les suivants :

Déplacements chimiques $\delta$ (ppm)	Multiplicité du signal	Intégration	Constante de couplage J (Hz)
2,94	triplet	6H	6,5
3,70	triplet	6H	6,5
7,38	multiplet	9H	
7,52	doublet	6H	6,6
8,1	singulet	3H	

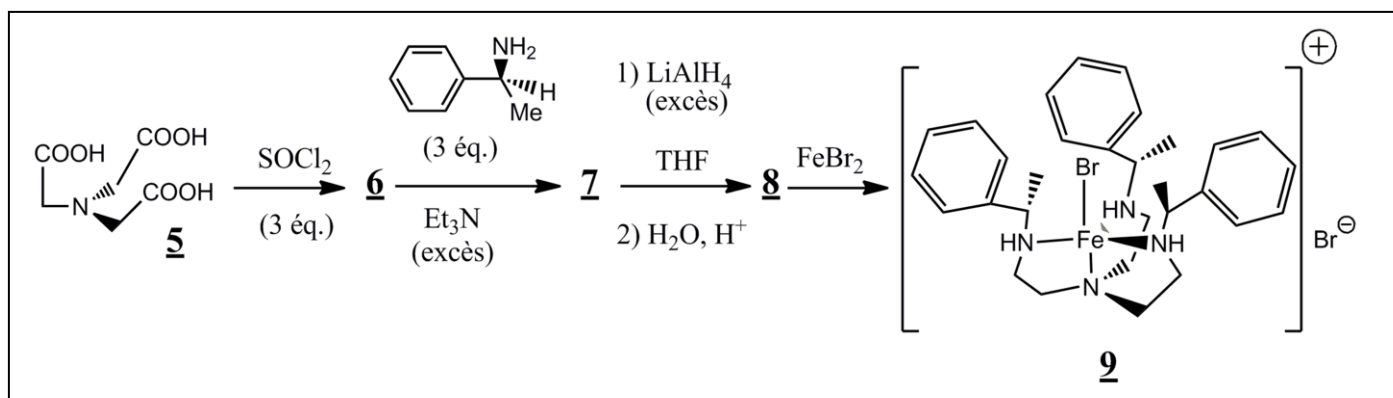
III.3.2.4.a. Pourquoi les auteurs ont-ils utilisé le solvant CDCl<sub>3</sub> pour effectuer le spectre RMN ?

III.3.2.4.b. Interpréter le spectre RMN du composé **2**.

III.3.2.5 En utilisant des formules simplifiées, proposer un mécanisme pour la formation du composé **3**.

III.3.2.6. Le suivi en spectroscopie infra-rouge du passage du composé **2** au composé **3** montre la disparition de la bande d'absorption à 1660 cm<sup>-1</sup> et l'apparition d'une bande d'absorption à 3300 cm<sup>-1</sup>. Interpréter l'évolution du spectre infra-rouge.

### III.3.3. Seconde voie de synthèse.



III.3.3.1. Donner la formule semi-développée du composé **6**.

III.3.3.2. Proposer un autre réactif permettant d'effectuer la transformation de **5** en **6**.

III.3.3.3. Nommer, en nomenclature officielle, l'amine aromatique utilisée lors de la transformation de **6** en **7**. Préciser sa configuration absolue.

III.3.3.4. En utilisant des formules simplifiées, proposer un mécanisme expliquant la formation du composé **7**. Quel est le rôle de la triéthylamine ?

III.3.3.5. Donner la formule semi-développée du composé **7**.

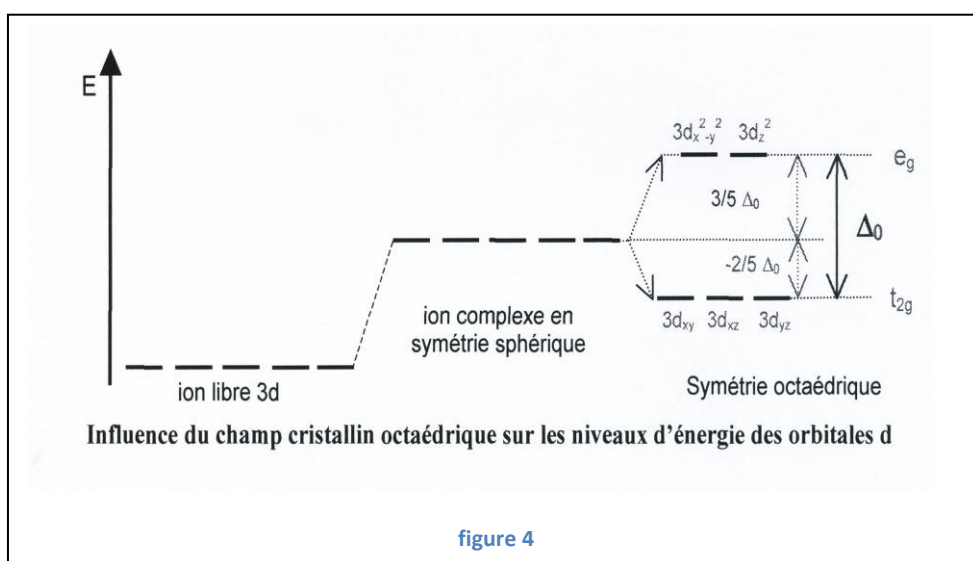
III.3.3.6. Donner la formule semi-développée du composé **8**, en précisant sa stéréochimie.

### III.3.4 Complexes et spin

Dans cette partie, on s'intéresse aux ions fer(II) et fer(III) qui forment des ions complexes susceptibles d'être utilisés dans les applications de la spintronique.

Les ions fer(II) et fer(III) s'entourent de 6 ligands dans un environnement octaédrique. Cet environnement conduit à une levée de dégénérescence des niveaux  $3d$  du fait d'interactions différentes entre les différents types d'orbitales  $3d$  et les ligands.  $\Delta_O$  représente l'éclatement du champ cristallin octaédrique, c'est-à-dire la différence énergétique entre le niveau  $e_g$  et le niveau  $t_{2g}$ .

Le schéma de la figure 4 représente le diagramme d'énergie des orbitales  $3d$  avant et après la levée de dégénérescence dans le champ cristallin.



III.3.4.1. Donner les nombres  $n$  d'électrons dans la couche  $3d$  des ions fer(II) et fer(III).

III.3.4.2. Deux états, dits « bas spin » ( $BS$ ) et « haut spin » ( $HS$ ) sont possibles. Pour chacun des deux ions, représenter les diagrammes d'énergie  $HS$  et  $BS$ , en déduire les valeurs  $s_1$  et  $s_2$  du nombre de spin total de chaque état et leur attribuer les qualificatifs diamagnétique ou paramagnétique.

III.3.4.3. La grandeur notée  $P$  représente l'énergie de répulsion de deux électrons placés dans une même orbitale  $3d$ .

III.3.4.3.a. Pour chacun des deux ions complexes, exprimer, en fonction de  $\Delta_O$  et de  $P$ , la différence d'énergie  $\Delta E = E(HS) - E(BS)$  entre les deux états  $HS$  et  $BS$ . Conclure.

III.3.4.3.b. A quelle condition sur  $P$  et  $\Delta_O$ , l'état électronique  $BS$  du complexe de fer(II) est-il le plus stable ?

III.3.4.4. En modifiant l'environnement chimique d'un ion  $Fe^{2+}$ , une transition entre les deux états électroniques  $BS$  et  $HS$  est susceptible d'intervenir. Dans la suite du problème, on considère des ions  $Fe^{2+}$  complexés chacun par 3 ligands bidentates.

III.3.4.4.a. Que signifie le qualificatif « bidentate » ? Illustrer le propos en prenant comme exemple l'éthylènediamine notée ( $en$ ).

III.3.4.4.b. Faire un schéma de l'ion complexe  $[Fe(en)_3]^{2+}$  et montrer qu'il existe sous la forme de deux énantiomères.

III.3.4.4.c. Citer une technique expérimentale qui permettrait de distinguer ces deux énantiomères.

III.3.4.5. A l'état solide, chaque ion complexe peut se trouver soit dans l'état  $BS$ , soit dans l'état  $HS$ . L'équation de la réaction de transition entre ces deux états s'écrit :  $BS = HS$ . Une solution solide comporte donc un mélange d'ions complexes  $BS$  et  $HS$  à l'équilibre.

III.3.4.5.a. On rappelle que  $s_1$  et  $s_2$  désignent les valeurs du nombre de spin total respectivement dans les états *BS* et *HS*. Par analogie avec la quantification du moment orbital dans l'atome, indiquer le nombre de projections possibles pour un spin total  $s_1$  ou  $s_2$ . On notera  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$  ces valeurs respectivement pour  $s_1$  et  $s_2$ .

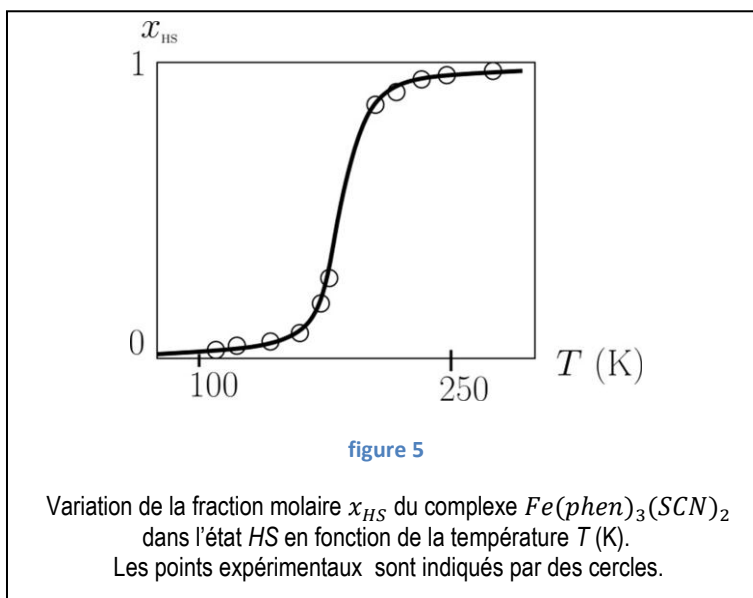
III.3.4.5.b. En thermodynamique statistique, on montre que l'entropie  $S$  s'écrit  $S = R \ln(\Omega)$ . Montrer que le changement de spin lors de la réaction de transition de l'état *BS* vers l'état *HS* s'accompagne d'une contribution à la variation d'entropie de réaction  $\Delta_r S^0 = R \ln(5)$  et déterminer numériquement sa valeur.

III.3.4.5.c. A pression constante, les fractions molaires des ions complexes dans l'état *BS* et dans l'état *HS* peuvent-elles être déterminées si on fixe la température ? Justifier.

III.3.4.5.d. Synthétisé au milieu des années 1960, le complexe  $Fe(phen)_3(SCN)_2$  est l'un des premiers complexes qui a permis d'étudier la transition  $HS = BS$ . La figure 5 donne la variation de la fraction molaire  $x_{HS}$  des ions complexes dans l'état *HS* en fonction de la température  $T$ .

Déterminer graphiquement la température  $T_{1/2}$  pour laquelle le nombre de complexes dans l'état *BS* est égal au nombre de complexes dans l'état *HS.*

III.3.4.5.e. L'enthalpie standard de la réaction de transition  $HS = BS$  à la température  $T_{1/2}$  vaut  $\Delta_r H^0 = 8,75$  kJ/mol. En utilisant le résultat de la question précédente, déterminer l'entropie standard  $\Delta_r S^0_{\text{expérimentale}}$  de la réaction de transition  $BS = HS$  à la température  $T_{1/2}$ .



III.3.4.6.f. On signale une augmentation des longueurs de liaison Fe-N lors de la transition de l'état *BS* vers l'état *HS*. A partir de cette observation, justifier le fait que  $\Delta_r S^0_{\text{expérimentale}}$  soit supérieure à  $\Delta_r S^0$ .

**Fin de l'énoncé**

## ANNEXE 1

(A rendre avec la copie)

Evolution des modèles de l'atome de la classe de 4<sup>ème</sup> à la classe en 1<sup>ère</sup> S

Niveaux d'enseignement	Expériences élèves ou expériences historiques	Modèle de l'atome	Schéma ou représentation symbolique associé
4 <sup>ème</sup>	Etats de la matière, diffusion des gaz, mélanges	Modèle particulaire Molécule	+ O x
4 <sup>ème</sup>		Sphère dure	

## ANNEXE 2

# La magnétorésistance géante GMR

### 1. Fonctionnement d'un disque dur.

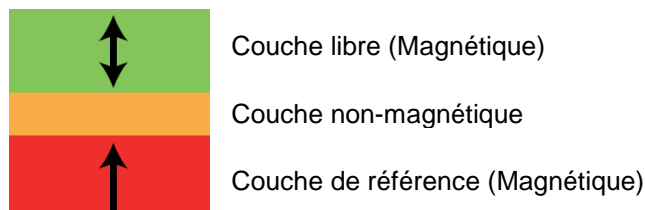
Un disque dur est composé de plusieurs parties, dont deux nous intéressent principalement ici : un disque recouvert d'un matériau magnétique et un bras capable de se déplacer au-dessus. Ce bras est équipé d'une tête d'écriture, servant à l'écriture des données sur le disque, et d'une tête de lecture, servant à la lecture des données inscrites sur le disque.

Dans un disque dur, les données sont stockées sous forme de bits binaires pouvant prendre la valeur 0 ou 1. Chaque bit correspond à une zone de quelques nanomètres de diamètre du matériau magnétique recouvrant le disque. La valeur d'un bit d'information est codée par la direction de l'aimantation dans cette zone. Une aimantation est similaire à l'aiguille d'une boussole avec, néanmoins, une différence majeure : le matériau magnétique est conçu pour que son aimantation ne puisse pointer que dans deux directions opposées, haut et bas par exemple. Ainsi, une aimantation pointant vers le haut codera, par exemple, pour un 1 et une aimantation pointant vers le bas codera pour un 0.

En 1988, le phénomène de magnétorésistance géante est découvert conjointement par deux laboratoires, un français et un allemand. A partir de 1997 et au bout de quelques années de développement seulement, toutes les têtes de lecture des disques durs vont fonctionner sur le principe de la magnétorésistance géante qui est beaucoup plus sensible aux champs magnétiques et qui permet donc de diminuer la taille des zones nécessaires au stockage des bits d'information.

### 2. La magnétorésistance géante (GMR)

La magnétorésistance géante peut s'observer en faisant circuler un courant électrique à travers une structure composée de deux couches magnétiques séparées par une couche non-magnétique. Les épaisseurs de ces couches ne peuvent pas dépasser la dizaine de nanomètres pour une raison qui sera évoquée à la toute fin de ce document.



Les deux couches magnétiques sont conçues pour avoir une aimantation ne pouvant pointer que dans deux directions opposées : haut et bas, par exemple. Une de ces deux couches est conçue pour pouvoir retourner son aimantation à champ magnétique faible alors que l'autre ne peut la retourner que pour des champs magnétiques plus élevés.

La couche non-magnétique est soit conductrice, on parle alors de vanes de spin, soit isolante, on parle alors de jonctions tunnels magnétiques. Le principe de la magnétorésistance géante est le même dans les deux cas. Seul diffère le mode de conduction du courant entre les deux systèmes : conduction « classique » dans les vanes de spin et conduction par effet tunnel dans les jonctions tunnels magnétiques.

Le phénomène de magnétorésistance géante peut se résumer ainsi : la résistance d'une telle structure dépend de l'orientation relative des aimantations des deux couches magnétiques. Si les deux aimantations pointent dans la même direction (configuration dite parallèle), alors la résistance de la structure est faible. Au contraire, si les deux aimantations pointent dans des directions opposées (configuration dite antiparallèle), alors la résistance de la structure est élevée.

L'application d'un champ magnétique permet de contrôler la direction de l'aimantation de ces couches et de passer d'une configuration parallèle à une configuration antiparallèle ou vice-versa. Ce changement de configuration s'accompagne d'une variation mesurable de la résistance électrique de la structure.

### 3. Un modèle simple de la magnétorésistance géante.

La magnétorésistance géante est liée à l'influence du spin des électrons sur la conduction du courant électrique dans un matériau magnétique. En électronique classique, la conduction est uniquement contrôlée par la charge de l'électron. L'électronique de spin, dont la magnétorésistance géante est la première application, utilise également les propriétés magnétiques des électrons.



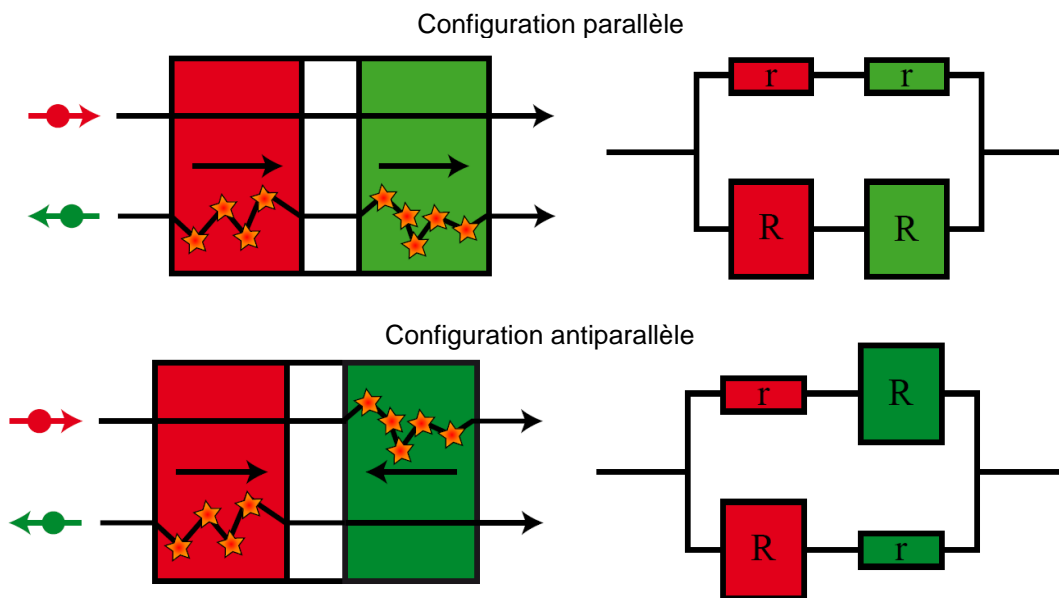
En première approximation, le courant électrique dans un matériau magnétique est conduit dans deux canaux parallèles : un pour les électrons dits de spin « up » et un pour ceux de spin « down ». Ces directions « up » et « down » sont définies par rapport à une direction de référence. Le plus simple ici est de choisir comme référence la direction de l'aimantation de la couche de référence qui ne varie pas. Un électron pointant dans la même direction sera dit « up » et un électron pointant dans la direction opposée sera dit « down ».

La résistance électrique qu'oppose un matériau magnétique à sa traversée par un électron dépend de l'orientation de son spin par rapport à l'aimantation du milieu. S'ils pointent dans la même direction, la résistance sera faible, notée  $r$  dans la suite. En revanche, s'ils pointent dans des directions inverses, la résistance sera forte, notée  $R$  dans la suite. Cette différence de résistance est liée au nombre de niveaux d'énergie disponibles pour les électrons qui n'est pas le même en fonction de la direction de leur spin dans un matériau magnétique.

Le courant électrique entrant dans la jonction contient autant de spin « up » que de spin « down ».

En configuration parallèle, les aimantations des deux couches magnétiques pointent ensemble dans la même direction. Dans ce cas, un électron de spin orienté dans la même direction que l'aimantation de la couche de référence (faible résistance  $r$ ) est également orienté dans la même direction que l'aimantation de la couche libre (faible résistance  $r$ ). Un électron de spin orienté dans la direction opposée à celle de l'aimantation de la couche de référence (forte résistance  $R$ ) est également orienté dans la direction opposée à celle de l'aimantation de la couche libre (forte résistance  $R$ ). Par conséquent, comme le montre le schéma ci-dessous, le canal de spin « up » traverse facilement la structure alors que celui de spin « down » est particulièrement résistif. Le schéma électrique équivalent de la structure en configuration parallèle permet de déduire la résistance  $R_P$  du système dans cette configuration :

$$R_P = \frac{2rR}{r+R}$$



En configuration antiparallèle, les aimantations des deux couches magnétiques de la jonction tunnel pointent dans des directions opposées. Dans ce cas, un électron de spin orienté dans la même direction que l'aimantation de la couche de référence (faible résistance  $r$ ) est orienté dans la direction opposée à celle de l'aimantation de la couche libre (forte résistance  $R$ ). En revanche, un électron de spin orienté dans la direction opposée à celle de l'aimantation de la couche de référence (forte résistance  $R$ ) est orienté dans la même direction que celle de l'aimantation de la couche libre (faible résistance  $r$ ). Par conséquent, comme le montre le schéma ci-dessous, les canaux de spin « up » et « down » sont aussi résistifs l'un que l'autre. Le schéma électrique équivalent de la structure en configuration antiparallèle permet de déduire la résistance  $R_{AP}$  du système dans cette configuration :

$$R_{AP} = \frac{r+R}{2}$$

**ANNEXE 3**

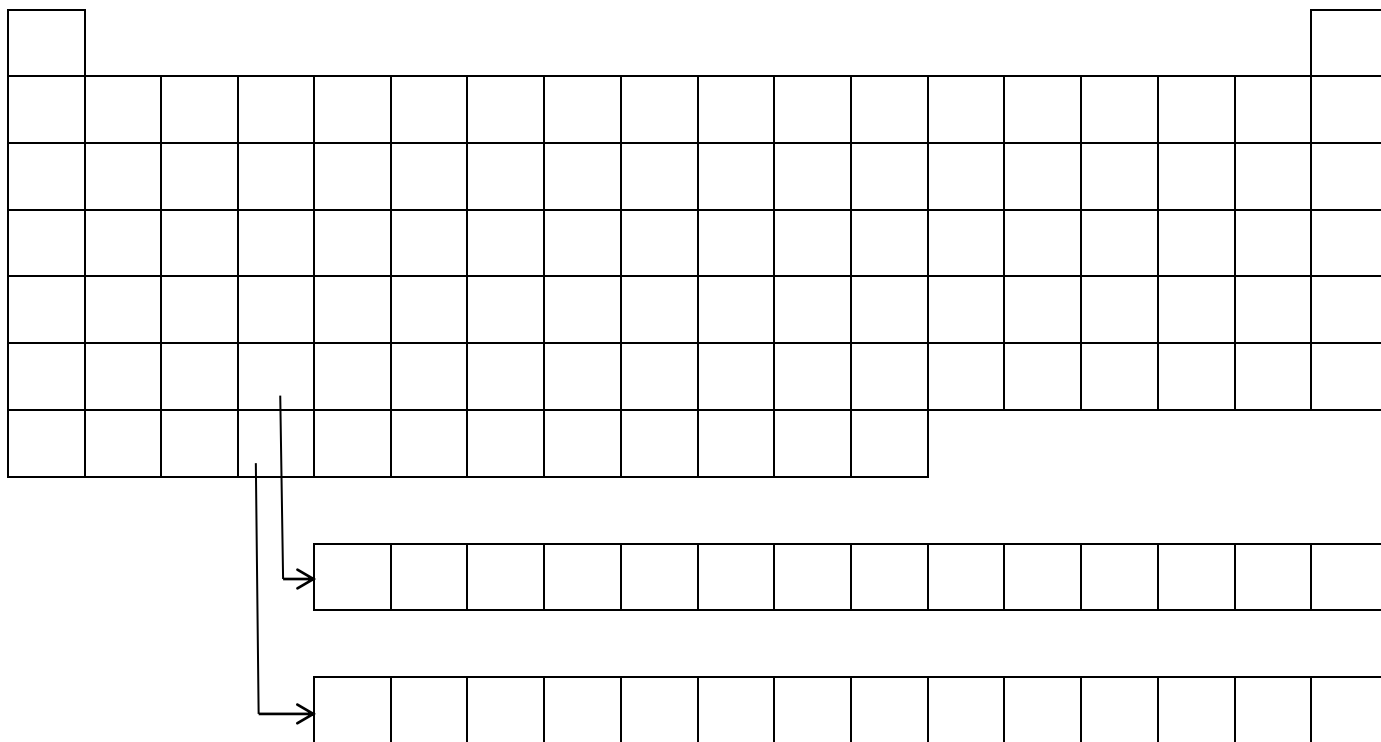
**Tableau périodique  
(à rendre avec la copie)**

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

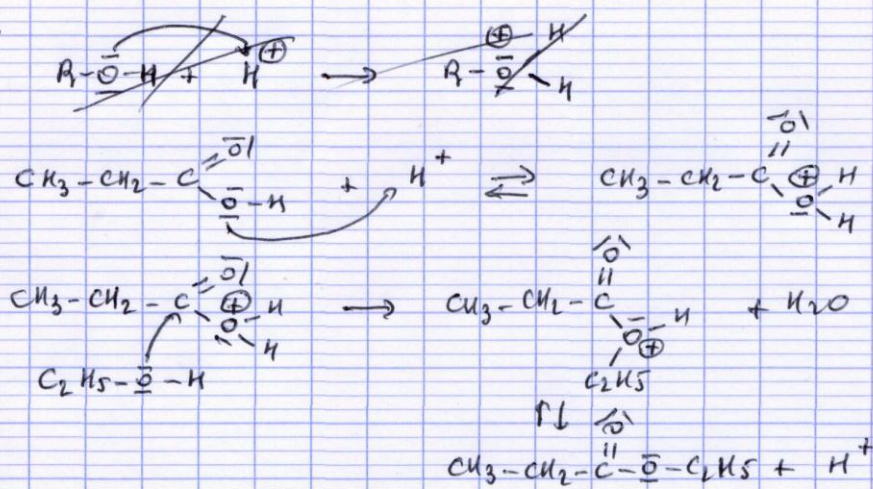
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



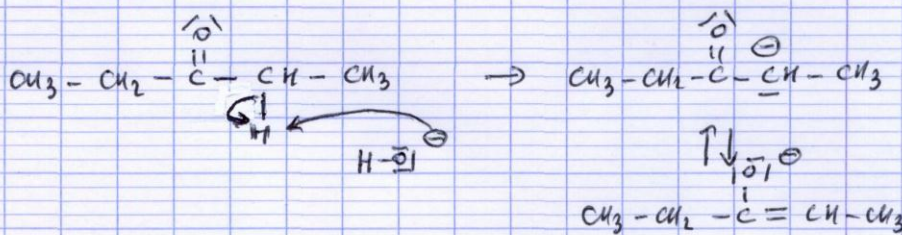
ANNEXE 4

Copie d'un élève avec deux mécanismes réactionnels  
(à rendre avec la copie)

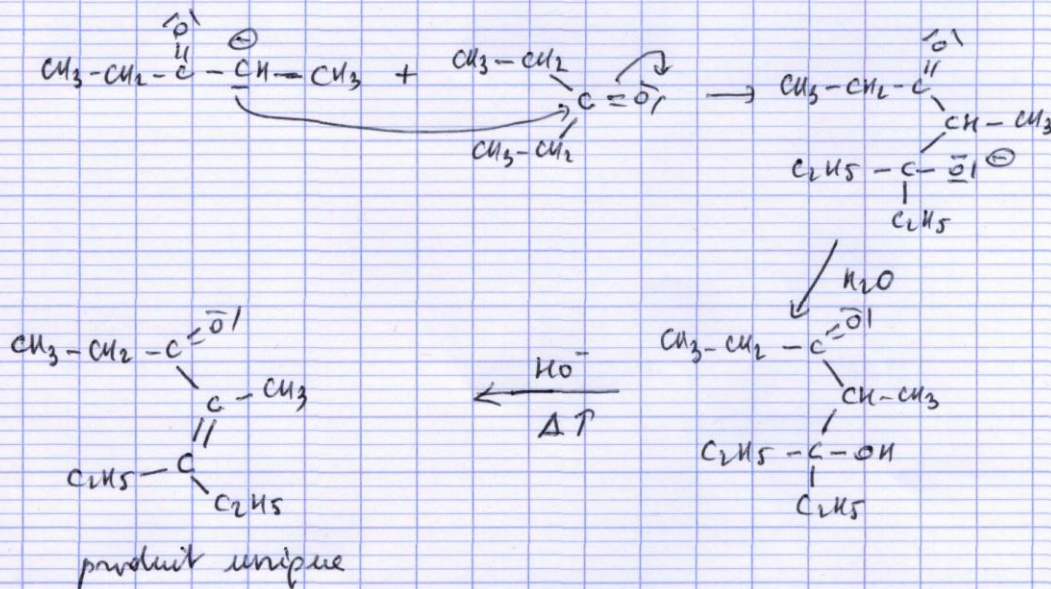
II.



III.  
a)



b)



Extraits des programmes de collège et de lycée

QUATRIEME

Connaissances	Capacités	Commentaires
<p>Les trois états de l'eau à travers la description moléculaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- l'état gazeux est dispersé et désordonné ;</li> <li>- l'état liquide est compact et désordonné ;</li> <li>- l'état solide est compact : les solides cristallins sont ordonnés.</li> </ul> <p>Les mélanges à travers la description moléculaire.</p>	<p>Argumenter en utilisant la notion de molécules pour interpréter :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- les différences entre les trois états physiques de l'eau ;</li> <li>- la conservation de la masse lors des changements d'état de l'eau ;</li> <li>- la non compressibilité de l'eau.</li> </ul> <p>Argumenter en utilisant la notion de molécules pour interpréter :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la diffusion d'un gaz dans l'air ;</li> <li>- la diffusion d'un soluté dans l'eau (sucre, colorant, dioxygène...).</li> </ul> <p>Percevoir la différence entre réalité et simulation.</p>	<p>On se limitera à des exemples de solutes moléculaires dans le cas de cette modélisation.</p>
<p><b>LES COMBUSTIONS : qu'est-ce que brûler ?</b></p> <p>La combustion du carbone nécessite du dioxygène et produit du dioxyde de carbone.</p> <p>La combustion du butane et du méthane dans l'air nécessite du dioxygène et produit du dioxyde de carbone et de l'eau.</p> <p>Tout du dioxyde de carbone se présente de dioxyde de carbone. L'eau de chaux donne un précipité blanc.</p> <p>Une combustion nécessite la présence de réactifs (combustible et comburant) qui sont consommés au cours de la combustion ; un (ou des) nouveau(x) produit(s) se forme(nt).</p> <p>Certains combustions peuvent être dangereuses (combustions incomplètes, combustions explosives).</p>	<p>Questionner, identifier un problème, formuler une hypothèse</p> <p>Mettre en œuvre un protocole expérimental.</p> <p>Observer, extraire les informations d'un fait observé.</p> <p>Exprimer à l'écrit ou à l'oral des étapes d'une démarche de résolution.</p> <p>Proposer une représentation adaptée.</p> <p>Suivre un protocole donné.</p> <p>Extraire d'un document (papier ou numérique) les informations relatives aux combustions.</p> <p>Extraire d'un document (papier ou numérique) les informations relatives aux dangers des combustions.</p>	<p>Thème de convergence : énergie</p>
<p><b>LES ATOMES POUR COMPRENDRE LA TRANSFORMATION CHIMIQUE</b></p> <p>Lors d'une combustion, des réactifs disparaissent et des produits apparaissent : une combustion est une transformation chimique.</p> <p>Lors des combustions, la disparition de tout ou partie des réactifs et la formation de produits correspondent à un réarrangement d'atomes au sein de nouvelles molécules.</p> <p>Les atomes sont représentés par des symboles, les molécules par des formules (<math>O_2</math>, <math>H_2O</math>, <math>CO_2</math>, <math>C_2H_6</math> et ou <math>CH_4</math>).</p> <p>L'équation de la réaction précise le sens de la transformation.</p> <p>Les atomes présents dans les produits (formés) sont de même nature et en même nombre que dans les réactifs.</p> <p>La masse totale est conservée au cours d'une transformation chimique.</p>	<p>Exprimer par une phrase le passage des réactifs en(x) produit(s).</p> <p>Proposer une représentation adaptée (modèles moléculaires).</p> <p>Communiquer à l'aide du langage scientifique.</p> <p>Utiliser une représentation adaptée : coder, décoder pour écrire les formules chimiques.</p> <p>Utiliser une représentation adaptée : coder, décoder pour écrire les équations de réaction.</p> <p>Présenter et expliquer l'écriture des étapes pour ajuster une équation chimique.</p> <p>Participer à la conception d'un protocole ou le mettre en œuvre.</p> <p>Valider ou invalider une hypothèse.</p>	<p>Le professeur limite la description à ce qui est nécessaire pour l'interprétation des phénomènes pris en compte.</p> <p>La manipulation des modèles moléculaires (d'assemblage, assemblage) ne doit pas laisser croire qu'elle représente le mécanisme réactionnel.</p> <p>L'écriture d'équations de réactions est strictement limitée aux deux ou trois combustions étudiées.</p> <p>La mole (concept, grandeur et unité de quantité de matière) est hors programme.</p>

**A - De l'air qui nous entoure à la molécule**

Cette partie a pour objet d'introduire dans un premier temps la molécule à partir de deux exemples : l'eau, déjà étudiée en classe de cinquième et l'air, abordé en classe de quatrième. Elle permet notamment de retrouver les notions sur l'eau vues en classe de cinquième concernant la distinction entre mélanges et corps purs, les changements d'état et la conservation de la masse lors de ces changements d'état. Dans un second temps, elle conduit, en s'appuyant sur les combustions, à l'étude des transformations chimiques et à leur interprétation atomique.

Connaissances	Capacités	Commentaires
<p><b>COMPOSITION DE L'AIR : de quoi est composé l'air que nous respirons ? Est-il un corps pur ?</b></p> <p>L'air est un mélange de dioxygène (environ 20 % en volume) et de diazote (environ 80 % en volume).</p> <p>Le dioxygène est nécessaire à la vie.</p> <p>Distinction entre un gaz et une fumée.</p>	<p>Extraire d'un document les informations relatives à la composition de l'air et au rôle du dioxygène.</p>	<p>Thème de convergence : développement durable, santé</p>
<p><b>VOLUME ET MASSE DE L'AIR : l'air a-t-il un volume propre ? A-t-il une masse ?</b></p> <p>L'air gazeux est un des états de la matière. Un gaz est compressible.</p> <p>La pression est une grandeur qui se mesure avec un manomètre.</p> <p>L'unité de pression SI est le pascal.</p> <p>Un volume de gaz possède une masse.</p> <p>Un litre d'air a une masse d'environ un gramme dans les conditions usuelles de température et de pression.</p>	<p>Proposer une expérience pour mettre en évidence le caractère compressible de l'air.</p> <p>Valider ou invalider une hypothèse.</p> <p>Mettre une pression.</p> <p>Mesurer des volumes ; mesurer des masses.</p> <p>Comprendre qu'à une mesure est associée une incertitude (non aux conditions expérimentales).</p>	<p>Thème de convergence : météorologie et climatologie</p>
<p><b>UNE DESCRIPTION MOLÉCULAIRE POUR COMPRENDRE</b></p> <p>Un gaz est composé de molécules.</p>	<p>Percevoir la différence entre réalité et simulation.</p> <p>Argumenter en utilisant la notion de molécules pour interpréter :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la compressibilité d'un gaz ;</li> <li>- les différences entre corps purs et mélanges.</li> </ul>	<p>Le professeur limite la description à ce qui est nécessaire pour l'interprétation des phénomènes pris en compte.</p>

Les citoyens doivent acquérir une culture scientifique de façon à procéder à des choix raisonnés en matière de santé. L'objectif de ce thème est de montrer et d'expliquer le rôle des sciences physiques et chimiques dans les domaines du diagnostic médical et des médicaments.

**LA SANTÉ**

NOTIONS ET CONTENUS	COMPÉTENCES ATTENDUES
<p>Espèces chimiques, corps purs et mélanges.</p> <p>Un modèle de l'atome.</p> <p>Noyau (protons et neutrons), électrons.</p> <p>Nombre de charges et numéro atomique Z.</p> <p>Nombre de nucléons A.</p> <p>Charge électrique élémentaire, charges des constituants de l'atome.</p> <p>Électroneutralité de l'atome.</p> <p>Éléments chimiques.</p> <p>Isotopes, ions monoatomiques.</p> <p>Caractérisation de l'élément par son numéro atomique et son symbole.</p> <p>Répartition des électrons en différentes couches, appelées K, L, M.</p> <p>Répartition des électrons pour les éléments de numéro atomique compris entre 1 et 18.</p>	<p>Extraire et exploiter des informations concernant la nature des espèces chimiques citées dans des contextes variés.</p> <p>Connaître la constitution d'un atome et de son noyau.</p> <p>Connaître et utiliser le symbole <math>{}^A_ZX</math>.</p> <p>Savoir que l'atome est électriquement neutre.</p> <p>Connaître le symbole de quelques éléments.</p> <p>Savoir que le numéro atomique caractérise l'élément.</p> <p>Mettre en œuvre un protocole pour identifier des ions.</p> <p>Dénombrer les électrons de la couche externe.</p>
<p>Les règles du « duet » et de l'octet.</p> <p>Application aux ions monoatomiques usuels.</p> <p>Formules et modèles moléculaires.</p> <p>Formules développées et semi-développées.</p> <p>Isoméris.</p> <p>Classification périodique des éléments.</p> <p>Démarche de Mendeleïev pour établir sa classification.</p> <p>Critères actuels de la classification : numéro atomique et nombre d'électrons de la couche externe.</p> <p>Familles chimiques.</p>	<p>Connaître et appliquer les règles du « duet » et de l'octet pour rendre compte des charges des ions monoatomiques usuels.</p> <p>Représenter des formules développées et semi-développées correspondant à des modèles moléculaires.</p> <p>Savoir qu'à une formule brute peuvent correspondre plusieurs formules semi-développées.</p> <p>Utiliser des modèles moléculaires et des logiciels de représentation.</p> <p>Localiser, dans la classification périodique, les familles des alcalins, des halogènes et des gaz nobles.</p> <p>Utiliser la classification périodique pour retrouver la charge des ions monoatomiques.</p>

**A - La chimie, science de la transformation de la matière**

**A1 - Conduction électrique**

**A1.1 - Conduction électrique et structure de la matière**

Après avoir étudié dans les classes antérieures les propriétés du courant électrique dans les circuits, l'élève aborde ici la nature de ce courant. C'est d'abord dans les métaux que la nature du courant électrique est abordée puisque l'élève n'a utilisé que de tels conducteurs dans les circuits qu'il a construits ; cette notion est ensuite étendue aux solutions aqueuses.

Connaissances	Capacités	Commentaires
<p><b>UTILISATION DES MÉTAUX DANS LA VIE QUOTIDIENNE : quels sont les métaux les plus couramment utilisés ?</b></p> <p>Les métaux les plus couramment utilisés sont le fer, le zinc, l'aluminium, le cuivre, l'argent et l'or.</p>	<p>Observer, recenser des informations pour distinguer quelques métaux usuels et pour repérer quelques-uns de leurs utilisations.</p>	
<p><b>L'ÉLECTRON ET LA CONDUCTION ÉLECTRIQUE DANS LES SOLIDES : tous les solides conduisent-ils le courant électrique ?</b></p> <p>Tous les métaux conduisent le courant électrique.</p> <p>Tous les solides ne conduisent pas le courant électrique.</p> <p>La conduction du courant électrique dans les métaux s'interprète par un déplacement d'électrons.</p>	<p>Pratiquer une démarche expérimentale afin de comparer le caractère conducteur de différents solides.</p> <p>Valider ou invalider une hypothèse sur le caractère conducteur ou isolant d'un solide.</p>	<p>comparer le caractère conducteur de différents solides.</p> <p>Valider ou invalider une hypothèse sur le caractère conducteur ou isolant d'un solide.</p>
<p><b>L'ION ET LA CONDUCTION ÉLECTRIQUE DANS LES SOLUTIONS AQUEUSES : toutes les solutions aqueuses conduisent-elles le courant électrique ?</b></p> <p>Toutes les solutions aqueuses ne conduisent pas le courant électrique.</p> <p>La conduction du courant électrique dans les solutions aqueuses s'interprète par un déplacement d'ions.</p>	<p>Pratiquer une démarche expérimentale afin de comparer (qualitativement) le caractère conducteur de l'eau et de diverses solutions aqueuses.</p> <p>Valider ou invalider une hypothèse sur le caractère conducteur ou isolant d'une solution aqueuse.</p>	<p>L'objectif des comparaisons de conduction électrique de l'eau et des solutions aqueuses n'est pas de constater la plus ou moins grande conduction en fonction des concentrations mais de permettre l'introduction de la notion d'ions en solution.</p> <p>Les risques d'électrocution ou d'électrisation dus à la conduction du courant électrique par l'eau du robinet (baignoire, fuites d'eau...) doivent être rappelés.</p>
<p>Constituants de l'atome : noyau et électrons.</p> <p>Structure lacunaire de la matière.</p> <p>Les atomes et les molécules sont électriquement neutres ; l'électron et les ions sont chargés électriquement.</p> <p>Le courant électrique est dû à : - un déplacement d'électrons dans le sens opposé au sens conventionnel du courant dans un métal ; - des déplacements d'ions dans une solution aqueuse.</p>	<p>Extraire d'un document (papier, multimédia) les informations relatives aux dimensions de l'atome et du noyau.</p> <p>Observer, recenser des informations, à partir d'une expérience de migration d'ions.</p>	<p>Il n'est pas demandé de donner la composition du noyau.</p> <p>La mémorisation des ordres de grandeur n'est pas exigible.</p>

## PREMIERE S

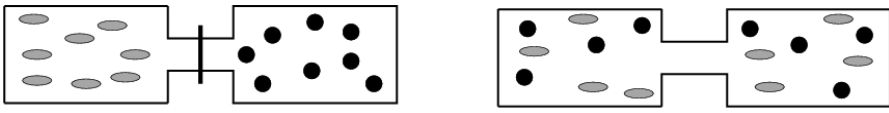
<b>OBSERVER</b> <b>Couleurs et images</b> <i>Comment l'œil fonctionne-t-il ? D'où vient la lumière colorée ? Comment créer de la couleur ?</i>	
Notions et contenus	Compétences attendues
<b>Couleur, vision et image</b>	
<b>Sources de lumière colorée</b>	
Différentes sources de lumière : étoiles, lampes variées, laser, DEL, etc. Domaines des ondes électromagnétiques.  Couleur des corps chauffés. Loi de Wien.  Interaction lumière-matière : émission et absorption. Quantification des niveaux d'énergie de la matière. Modèle corpusculaire de la lumière : le photon. Énergie d'un photon. Relation $\Delta E = h\nu$ dans les échanges d'énergie.  Spectre solaire.	Distinguer une source polychromatique d'une source monochromatique caractérisée par une longueur d'onde dans le vide. Connaître les limites en longueur d'onde dans le vide du domaine visible et situer les rayonnements infrarouges et ultraviolets.  Exploiter la loi de Wien, son expression étant donnée.  <i>Pratiquer une démarche expérimentale permettant d'illustrer et de comprendre la notion de lumière colorée.</i>  Interpréter les échanges d'énergie entre lumière et matière à l'aide du modèle corpusculaire de la lumière. Connaître les relations $\lambda = c/\nu$ et $\Delta E = h\nu$ et les utiliser pour exploiter un diagramme de niveaux d'énergie.  Expliquer les caractéristiques (forme, raies) du spectre solaire.

## TERMINALE S

<b>Transformation en chimie organique</b> Aspect macroscopique : - Modification de chaîne, modification de groupe caractéristique. - Grandes catégories de réactions en chimie organique : substitution, addition, élimination.  Aspect microscopique : - Liaison polarisée, site donneur et site accepteur de doublet d'électrons. - Interaction entre des sites donneurs et accepteurs de doublet d'électrons ; représentation du mouvement d'un doublet d'électrons à l'aide d'une flèche courbe lors d'une étape d'un mécanisme réactionnel.	Reconnaître les groupes caractéristiques dans les alcool, aldéhyde, cétone, acide carboxylique, ester, amine, amide. Utiliser le nom systématique d'une espèce chimique organique pour en déterminer les groupes caractéristiques et la chaîne carbonée. Distinguer une modification de chaîne d'une modification de groupe caractéristique. Déterminer la catégorie d'une réaction (substitution, addition, élimination) à partir de l'examen de la nature des réactifs et des produits.  Déterminer la polarisation des liaisons en lien avec l'électronégativité (table fournie). Identifier un site donneur, un site accepteur de doublet d'électrons. Pour une ou plusieurs étapes d'un mécanisme réactionnel donné, relier par une flèche courbe les sites donneur et accepteur en vue d'expliquer la formation ou la rupture de liaisons.
---	---

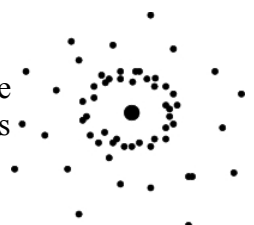
# A l'interface de la chimie avec la physique : la spintronique

## Un corrigé

<p>I.1 QP</p>	<p><u>Présentation de l'épreuve de l'activité expérimentale</u> aux élèves (expériences réalisées par le professeur ou vidéo-projetées)</p> <p>→ 2 flacons remplis de 2 gaz différents (un gaz incolore et un gaz coloré) sont mis en contact.</p> <p>→ 3 possibilités pour les positions relatives des flacons : questionnement des élèves sur l'intérêt de ces 3 positions (y-a-t-il un gaz "plus lourd" ? Les élèves connaissent que l'air possède une masse).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Réponse du professeur : le gaz roux est le plus "lourd".</li> <li>● Quelle situation expérimentale est la meilleure ? → la troisième.</li> <li>● Intérêt de faire les 3 expériences : l'état final des 2 flacons sera le même mais cet état final peut être atteint plus ou moins rapidement.</li> </ul> <p><u>Connaissances mobilisées :</u></p> <p>- celles déjà acquises antérieurement :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>→ distinction entre corps pur et mélange (5ième)</li> <li>→ un gaz est composé de molécules (4ième)</li> <li>interprétation de la compressibilité d'un gaz et des différences entre corps purs et mélanges</li> <li>→ percevoir les différences entre réalité et simulation</li> <li>→ l'état gazeux est dispersé et désordonné</li> </ul> <p>- celles qui vont être découvertes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>→ mélange de 2 gaz dû au phénomène de diffusion. On attend que la couleur orange s'éclaircisse dans le 1er flacon, et apparaisse dans le 2ième. Dans l'état final, les 2 flacons ont le même aspect.</li> </ul> <p><u>Productions attendues des élèves :</u> faire représenter aux élèves les 2 flacons avant et après en représentant différemment les 2 types de molécules initialement présentes dans les flacons.</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>Etat initial</p> <p>Etat final</p> <p>Vérification de la conservation du nombre des 2 types de molécules.</p> <p>Vérification de l'équipartition des molécules dans les 2 flacons dans l'état final.</p> <p>Le professeur peut ensuite présenter une simulation informatique dynamique en précisant bien que les molécules du gaz sont "toute petites" et qu'on en représente beaucoup moins → retour sur la capacité "percevoir les différences entre réalité et simulation".</p>
<p>I.2 QP</p>	<p>Voir l'annexe 1</p>
<p>I.3</p>	<p>Frise de l'évolution du modèle de l'atome      Démocrite (450 av. JC) → Aristote → Dalton (1808) → Faraday (1832) → Thomson</p>

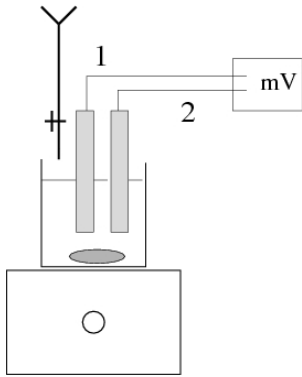
QP	<p>(1898) → Rutherford (1910) → Bohr (1913) → Schrödinger (1920)</p> <p>Démocrite : la matière est constituée de 4 éléments : eau, terre, air feu.</p> <p>Aristote : la matière est constituée de particules invisibles à l'oeil nu et insécables (atomes).</p> <p>Dalton : l'existence de l'atome est prouvée.</p> <p>Faraday : la force qui lie les atomes en place est de nature électronique.</p> <p>Thomson : mise en évidence de l'électron de charge négative. Premier modèle de l'atome, celui du pudding.</p> <p>Rutherford : l'existence du noyau est prouvée. Modèle planétaire de l'atome : au centre un noyau chargé positivement et des électrons négatifs qui gravitent.</p> <p>Bohr : les électrons occupent des orbites bien précises.</p> <p>Schrödinger : les électrons occupent des orbitales atomiques.</p>
I.4.1 QP	<p><u>Question 1</u> : (en accord avec le programme)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• connaître et utiliser le symbole du noyau <math>{}^A_Z X</math>, <math>Z</math> = nombre de protons et <math>A</math> = nombre de masse = nombre de protons + neutrons.</li> <li>• L'atome est électriquement neutre, le nombre d'électrons est égal à <math>Z</math> donc 11 électrons pour l'atome de Na et 17 pour l'atome de Cl.</li> </ul> <p><u>Question 2</u> : (en accord avec le programme)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Répartir les électrons dans les différentes couches : K(2), L(8), M(18). Donc Na : <math>K^2 L^8 M^1</math> et Cl : <math>K^2 L^8 M^7</math></li> <li>• Appliquer les règles du duet et de l'octet</li> </ul>
I.4.2 QP	<p>Compétences attendues :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Connaître et utiliser le symbole <math>{}^A_Z X</math></li> <li>• Savoir que l'atome est électriquement neutre</li> <li>• Dénombrer les électrons de la couche externe</li> <li>• Connaître et appliquer les règles du duet et de l'octet pour rendre compte des charges des ions monoatomiques usuels.</li> </ul>
I.5.1	$\frac{1}{\lambda} = G \cdot \frac{n^2 - 4}{n^2} \text{ avec } n > 2 \rightarrow \frac{1}{\lambda} = G \cdot \left(1 - \frac{4}{n^2}\right)$ <p>Si <math>\lambda</math> augmente, <math>1/\lambda</math> diminue, donc <math>n</math> diminue.</p> <p>On a donc :</p> <p><math>\lambda = 656,2 \text{ nm} \rightarrow n=3</math></p> <p><math>\lambda = 486,1 \text{ nm} \rightarrow n=4</math></p> <p><math>\lambda = 434,0 \text{ nm} \rightarrow n=5</math></p> <p><math>\lambda = 410,1 \text{ nm} \rightarrow n=6</math></p>
I.5.2	$\frac{1}{\lambda} = R_H \cdot \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2}\right) \text{ et } \frac{1}{\lambda} = G \cdot \left(\frac{n^2 - 4}{n^2}\right)$ <p>Pour <math>p=2</math>, après identification il vient <math>R_H = 4G</math>.</p> <p>On prend par exemple la transition <math>3 \rightarrow 2</math> et on trouve <math>\lambda_{3,2} = 656,2 \text{ nm}</math>.</p> <p>D'où l'on déduit la valeur de <math>R_H = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}</math>.</p>



I.5.3	$\Delta E_H = hcR_H \left( \frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right) = E_n - E_p, \text{ donc } E_n = -\frac{hcR_H}{n^2}.$ <p>Numériquement, il vient <math>E_n = -\frac{13,6}{n^2} (eV)</math>.</p>
I.5.4	<p>L'énergie d'ionisation <math>E_i</math> d'un atome est l'énergie interne standard à <math>T=0 K</math> de la réaction suivante : <math>X_{(g)} = X_{(g)}^+ + e_{(g)}^-</math>.</p> <p>C'est aussi l'énergie minimale à fournir à l'atome gazeux pour arracher l'électron, celui-ci ayant alors une énergie cinétique nulle.</p> $E_i = E(\infty) - E(1) = 13,6 eV.$
I.5.5 QP	<p>Le spectre est discontinu. Quand de l'énergie a été apportée aux atomes H, ils se déséxcitent en n'émettant que certaines radiations. Les discontinuités du spectre montre que les électrons passent d'une énergie à une autre mais que seules certaines différences d'énergies sont observées.</p> <p>Les électrons occupent donc des niveaux d'énergie bien définis dans l'atome. On ne peut pas imaginer des électrons qui pourraient tourner autour du noyau avec n'importe quelle énergie possible.</p>
II.1	<p>Les indices <math>n, l</math> et <math>m</math> sont les trois nombres quantiques qui permettent de définir un type d'orbitale atomique.</p> <p><math>n</math> : nombre quantique principal ; <math>l</math> : nombre quantique secondaire ou azimuthal ; <math>m</math> : nombre quantique magnétique.</p>
II.2	<p><math>E_{1,0}</math>, <math>n=1</math> et <math>l=0</math> : orbitale de type 1s.</p> <p><math>E_{2,0}</math>, <math>n=2</math> et <math>l=0</math> : orbitale de type 2s.</p>
II.3.1 QP	<p>Pour le modèle de Bohr, l'électron est localisé sur une orbite.</p> <p>Pour le modèle quantique, on parle de probabilité de présence de l'électron. La probabilité de trouver l'électron est maximale à la distance <math>r = a_0</math> du centre de l'atome. La probabilité de trouver l'électron pour <math>0 &lt; r &lt; a_0</math> et pour <math>r &gt; a_0</math> est plus faible mais reste différente de zéro.</p> <p><math>P_{n,0} \rightarrow 0</math> lorsque <math>r \rightarrow \infty</math> : plus on s'éloigne du noyau au delà de <math>r = a_0</math>, plus la probabilité de trouver l'électron est faible.</p> <p>Représentation de l'atome d'hydrogène dans le modèle quantique. On associe une densité de points d'autant plus grande que la probabilité de trouver l'électron est grande.</p> 
II.3.2	<p>Maxima : distance du centre de l'atome pour laquelle la probabilité de trouver l'électron est maximale.</p> <p>Plus <math>n</math> est grand, plus ce maximum a une grand abscisse. On peut dire qu'il correspond au "rayon" de la fonction d'onde. Plus <math>n</math> est grand, plus la probabilité de trouver l'électron loin du noyau est grande.</p>

II.4.1	Le nombre quantique magnétique de spin $m_s$ peut prendre les valeurs suivantes $+\frac{1}{2}$ , $-\frac{1}{2}$
II.4.2	up $\uparrow$ et down $\downarrow$ . $\uparrow \vec{B}$
II.5.1	Albert FERT
II.5.2	$E_{up} = -\vec{\mu}_B \cdot \vec{B} = -\mu_B \cdot B$ et $E_{down} = -(-\vec{\mu}_B) \cdot \vec{B} = \mu_B \cdot B$ . Par conséquent, $E_{flip} = E_{down} - E_{up} = 2\mu_B \cdot B$ . Numériquement, $E_{flip} = 1,854 \cdot 10^{-23} J = 1,16 \cdot 10^{-4} eV$ .
II.5.3 QP	Voir le document détaillant la correction.
III.1.1.1 QP	<p>Cette activité doit permettre aux élèves d'observer, de distinguer quelques métaux (le fer, le zinc, le cuivre, l'argent, l'or). En utilisant des informations (documents professeur, recherche sur internet), les élèves doivent savoir identifier les métaux demandés dans le programme.</p> <p>Ils doivent distinguer les métaux par leur aspect, leur couleur, leur densité (masse volumique), leur conductivité électrique, thermique...</p> <p>L'activité proposée "chez le ferrailleur" est une activité contextualisée permettant au professeur de faire travailler (ou d'évaluer) les compétences (ou capacités) suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- rechercher, extraire et organiser l'information utile</li> <li>- mesure d'un volume par déplacement d'eau</li> <li>- déterminer une masse avec une balance</li> <li>- estimer la précision d'une mesure</li> <li>- calculer, utiliser une formule</li> <li>- connaître les unités de longueur, aire, volume et masse et les changements d'unités (réinvestissement des notions vues en mathématiques)</li> <li>- réaliser une mesure avec un instrument connu (comme un palmer par exemple)</li> </ul> <p><u>Au niveau B2i :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- s'approprier un environnement numérique de travail</li> <li>- adopter une attitude responsable</li> <li>- utiliser un traitement de texte, un tableur pour représenter les données</li> </ul> <p><u>Environnement et développement durable :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- repérer les principaux impacts de la production, de la transformation et du recyclage d'un objet technique.</li> </ul>
III.1.1.2 QP	<p>Pour les élèves éprouvant des difficultés, le professeur peut leur proposer</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- des coups de pouce</li> <li>- des fiches de méthodes (mesurer un volume, une masse...)</li> <li>- des rappels ciblés sur les différentes unités, les calculs élémentaires, les changements d'unités...</li> <li>- faire un travail concerté avec le professeur de mathématiques</li> </ul>

	<p>- faire travailler les élèves par groupes de 3 ou 4 et les répartir de façon à ce que certains élèves puissent être aidés par d'autres.</p> <p>-...</p>
III.1.2	<p>Les différentes familles de métaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- les métaux alcalins</li> <li>- les métaux alcalino-terreux</li> <li>- les métaux de transition</li> <li>- les métaux du bloc p</li> <li>- les lanthanides</li> <li>- les actinides</li> </ul> <p>→ classification périodique (annexe 3 du sujet)</p>
III.1.3	$[_{26} Fe] = 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$ ou $[Ar] 3p^6 3d^6 4s^2$ $[_{27} Co] = 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^7 4s^2$ ou $[Ar] 3p^6 3d^7 4s^2$
III.1.4.1	<p>Il y a contact des sphères dures selon la grande diagonale (schéma)</p> $a_c \cdot \sqrt{3} = 4 \cdot R \rightarrow a_c = \frac{4 \cdot R}{\sqrt{3}}$
III.1.4.2	<p>On a 2 atomes par maille. La compacité est donc :</p> $C = \frac{2 \cdot \frac{4}{3} \pi R^3}{a_c^3} = \frac{\sqrt{3}}{8} \pi = 0,68$ <p>Seul 63% du volume est réellement occupé. Il reste donc 32% de vide dans lequel peuvent se placer des petites entités.  68% &lt; 74% qui est la compacité maximale (cfc ou hc).  Il reste plus de place que dans une structure compacte. La structure cc est une structure <u>pseudo-compacte</u>.</p>
III.2.1	$Fe^{2+}$ , $Fe^{3+}$ ; $Co^{2+}$ et $Co^{3+}$ ; $Bi^{3+}$ ; $O^{2-}$ $[Bi] = [Xe] 6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^3$
III.2.2	$BiFeO_3 \rightarrow Bi^{+III}$ donc $Fe^{+III}$ .
III.2.3	$CoFe_2O_4$ Deux situations possibles : <ul style="list-style-type: none"> <li>- si <math>Co^{+II}</math> alors <math>Fe^{+III}</math></li> <li>- si <math>Co^{+III}</math> alors 1 <math>Fe^{+II}</math> et 1 <math>Fe^{+III}</math></li> </ul>
III.2.4.1a	<p><u>étape 1</u> : on a une réaction acide/base</p> $Fe_2O_{3(s)} + 6H_{(aq)}^+ = 2Fe_{(aq)}^{3+} + 3H_2O_{(l)} \quad (1)$ <p><u>étape 2</u> : réduction des ions <math>Fe^{3+}</math> par le zinc métal en ions <math>Fe^{2+}</math></p> $2Fe_{(aq)}^{3+} + Zn_{(s)} = 2Fe_{(aq)}^{2+} + Zn_{(aq)}^{2+} \quad (2)$

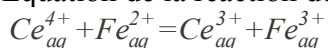
	$E^0(Fe^{3+}/Fe^{2+}) \gg E^0(Zn^{2+}/Zn) \text{ donc réaction quasi-totale}$ <p>étape 3 : oxydation des ions <math>Fe^{2+}</math> par les ions <math>Cr_2O_7^{2-}</math></p> $Cr_2O_7^{2-}(aq) + 6Fe^{2+}(aq) + 14H^+(aq) = 2Cr^{3+}(aq) + 6Fe^{3+}(aq) + 7H_2O(l) \quad (3)$ $E^0(Cr_2O_7^{2-}/Cr^{3+}) \gg E^0(Fe^{3+}/Fe^{2+}) \text{ donc réaction quasi-totale}$
III.2.4.1b	<p>D'après l'équation (3) :</p> $(n_{Fe^{2+}})_E = 6 \cdot (n_{Cr_2O_7^{2-}})_E = 6 \cdot [Cr_2O_7^{2-}] \cdot V_E$ <p>donc <math>(n_{Fe^{2+}})_E = 6 \cdot \frac{1}{120} \cdot 17,5 \cdot 10^{-3} = 8,75 \cdot 10^{-4} \text{ mol}</math> .</p> <p>D'après les équations (1) et (2), <math>n_{Fe}</math> dans l'échantillon est <math>(n_{Fe^{2+}})_E</math> . Par conséquent, la masse dans fer dans l'échantillon est :</p> $(m_{Fe})_E = (n_{Fe^{2+}})_E \cdot M_{Fe} = 8,75 \cdot 10^{-4} \cdot 55,8 = 4,88 \cdot 10^{-2} \text{ g}$ <p>La teneur massique en fer du minerai lorrain <math>\tau</math> :</p> $\tau = \frac{m_{Fe}}{m_{\text{échantillon}}} = \frac{4,88 \cdot 10^{-2}}{0,122} = 0,40 = 40 \%$ . Le minerai est pauvre en fer d'où son appellation "minette".
III.2.4.2a	<p>burette : solution titrante de <math>Ce^{4+}</math></p> <p>bécher : solution à doser <math>Fe^{2+}</math></p> <p>1 : électrode au calomel saturé (ECS)</p> <p>2 : électrode indicatrice. Comme on a le couple <math>Fe^{3+}/Fe^{2+}</math> , on choisit un métal inerte comme le platine. Cette électrode prend le potentiel du couple présent dans la solution.</p> 
III.2.4.2b	<p>La résistance interne du millivoltmètre est très grande (<math>\sim 10 \text{ M}\Omega</math>) donc <math>i \sim 0</math>. Aucun courant ne circule dans le circuit.</p> <p>On mesure donc la ddp entre l'électrode de mesure et l'ECS.</p>
III.2.4.2c	<p>Les ions <math>Ce^{4+}_{aq}</math> réagissent avec les ions <math>HO^-</math> pour donner <math>Ce(OH)_{4,(s)}</math> .</p> <p>Le précipité existe si <math>\frac{[Ce^{4+}]_i \cdot [HO^-]_i^4}{c_0^5} &gt; K_s [Ce(OH)_4]</math> .</p> <p>Ici <math>[Ce^{4+}]_i = 0,0050 \text{ mol} \cdot L^{-1}</math> et <math>c_0 = 1,0 \text{ mol} \cdot L^{-1}</math> . Par conséquent, la condition s'écrit :</p>

$$pH > pK_e - \frac{1}{4} (\log c_{ox} + pK_s) .$$

Numériquement,  $pH > 1,98$  , donc  $Ce(OH)_{4,(s)}$  précipite avec  $pH > 2$  .

Conclusion : il faut donc être en milieu fortement acide pour avoir des ions  $Ce^{4+}$  .

III.2.4.2d Equation de la réaction de dosage :



A l'équivalence,  $(nFe^{2+})_i = (nCe^{4+})_{versés} = c_{ox} \cdot [V_{ox}]_E$  d'où  $c_{reduc} = \frac{c_{ox} [V_{ox}]_E}{V}$  .

Détermination du volume équivalent  $[V_{ox}]_E = 17,8 mL$  et il vient immédiatement  $c_{reduc} = 8,9 \cdot 10^{-3} mol \cdot L^{-1}$  .

On a titré 1/10 de la quantité initiale d'ions  $Fe_{aq}^{2+}$  . Donc  $(nFe^{2+})_{minerai} = c_{ox} \cdot [V_{ox}]_E \cdot 10 = 8,9 \cdot 10^{-4} mol$  . La teneur massique en fer du minerai

lorrain est :  $\frac{(nFe^{2+})_{minerai} \times M_{Fe}}{m} = \frac{8,9 \cdot 10^{-4} \times 55,8}{0,122} = 0,407$  .

$\tau = 40,7 \%$  : le résultat est cohérent avec le premier titrage.

III.2.4.2e

$$E^0_{Fe(phen)_3^{3+}/Fe(phen)_3^{2+}} = 1,04 V \text{ et } E^0_{ECS} = 0,244 V \text{ donc}$$

$$E' = 1,04 - 0,244 = 796 mV .$$

Les points  $E$  et  $E'$  sont proches et appartiennent à la partie verticale de la courbe. Ils ont pratiquement la même abscisse.

Si  $\Delta E < 796 mV$  , la coloration de la solution est rose.

Si  $\Delta E > 796 mV$  , la coloration de la solution est bleue (en réalité légèrement verte).

L'équivalence a lieu lorsque la coloration rose disparaît.

III.2.4.2f

$$\Delta E = E_{Pt} - E_{ECS}$$

Tableau bilan de matière :

$V_{ox}$	$Fe_{aq}^{2+}$	+	$Ce_{aq}^{4+}$	=	$Fe_{aq}^{3+}$	+	$Ce_{aq}^{3+}$
$V_{ox} < V_E$	$\frac{c_{reduc} V - c_{ox} V_{ox}}{V_t}$		$\varepsilon$		$\frac{c_{ox} V_{ox}}{V_t}$		$\frac{c_{ox} V_{ox}}{V_t}$
$V_{ox} > V_E$	$\varepsilon$		$\frac{c_{ox} V_{ox} - c_{reduc} V}{V_t}$		$\frac{c_{reduc} V}{V_t}$		$\frac{c_{reduc} V}{V_t}$

• Pour  $0 < V_{ox} < V_E$  , le potentiel de l'électrode de platine est celui du couple  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$

$$\Delta E = E_{Pt} - E_{ECS} = E_{Fe^{3+}/Fe^{2+}} - E_{ECS}$$

$$\Delta E = E_{Fe^{3+}/Fe^{2+}} - E_{ECS} + 0,06 \cdot \log \frac{c_{ox} V_{ox}}{c_{reduc} V - c_{ox} V_{ox}}$$

$E_1^0$  représente donc  $E^0_{Fe^{3+}/Fe^{2+}}$  .

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pour <math>V_{ox} &gt; V_E</math>, le potentiel de l'électrode de platine est celui du couple <math>Ce^{4+}/Ce^{3+}</math> :  <math display="block">\Delta E = E_{Ce^{4+}/Ce^{3+}} - E_{ECS} + 0,06 \cdot \log \frac{c_{ox} V_{ox} - c_{reduc} V}{c_{reduc} V}</math> <math>E_2^0</math> représente donc <math>E_{Ce^{4+}/Ce^{3+}}^0</math>.</li> </ul>
III.2.4.2g	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A la demi-équivalence <math>V_{ox} = \frac{[V_{ox}]_E}{2} = 8,9 \text{ mL}</math>  et <math>(n_{Ce^{4+}})_{versés} = \frac{n_{Fe^{2+}}}{2} = \frac{c_{reduc} V}{2}</math>.</li> <li>On a donc <math>[Fe^{3+}]_{E/2} = [Fe^{2+}]_{E/2}</math> et <math>(\Delta E)_{E/2} = E_{Fe^{3+}/Fe^{2+}}^0 - E_{ECS}</math> d'où  <math>E_{Fe^{3+}/Fe^{2+}}^0 = (\Delta E)_{E/2} + E_{ECS} = 375 + 244 = 619 \text{ mV}</math>.</li> <li>• A la double-équivalence <math>V_{ox} = 2[V_{ox}]_E = 35,6 \text{ mL}</math>.  On a donc <math>(\Delta E)_{2E} = E_{Ce^{4+}/Ce^{3+}}^0 - E_{ECS}</math> d'où  <math>E_{Ce^{4+}/Ce^{3+}}^0 = (\Delta E)_{2E} + E_{ECS} = 1050 + 244 = 1294 \text{ mV}</math></li> </ul> <p>Les potentiels standards trouvés sont inférieurs aux potentiels donnés (0,77 V et 1,71 V).  Les ions <math>Fe^{2+}</math> et les ions <math>Ce^{4+}</math> sont complexés par les ions sulfates <math>SO_4^{2-}</math>.</p>
III.3.1.1 QP	<p>La compétence attendue pour un élève de TS est qu'il sache déterminer la catégorie d'une réaction (substitution, addition, élimination) à partir de l'examen de la nature des réactifs et des produits.</p> <p><u>Exemple d'une réaction de substitution</u></p> $\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C}-\text{CH}-\text{CH}_3 \\   \\ \text{Br} \end{array} + \text{NaOH} \xrightarrow{20^\circ \text{C}} \begin{array}{c} \text{H}_3\text{C}-\text{CH}-\text{CH}_3 \\   \\ \text{OH} \end{array} + \text{NaBr}$ <p>On a une substitution d'un atome de brome par un groupe hydroxyle.</p> <p><u>Exemple d'une réaction d'élimination</u></p> $\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C}-\text{CH}-\text{CH}_3 \\   \\ \text{Br} \end{array} + \text{NaOH} \xrightarrow{70^\circ \text{C}} \text{H}_3\text{C}-\underset{\text{H}}{\text{C}}=\text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NaBr}$ <p>On a une élimination d'un H et Br et création d'une double liaison.</p> <p><u>Exemple d'une réaction d'addition</u></p> $\text{H}_3\text{C}-\underset{\text{H}}{\text{C}}=\text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow[\text{2) H}_2\text{O}]{\text{a chaud, 1) H}_2\text{SO}_4} \begin{array}{c} \text{H}_3\text{C}-\text{CH}-\text{CH}_3 \\   \\ \text{OH} \end{array}$ <p>On a une addition d'une molécule d'eau sur le propène et disparition de la double liaison.</p>

III.3.1.2  
QP

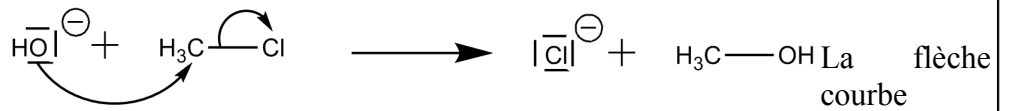
La compétence attendue pour un élève de TS est qu'il sache déterminer la polarisation des liaisons en lien avec l'électronégativité (table fournie).

En repartant de la théorie de Lewis de la liaison covalente, il est relativement facile de leur faire identifier les sites donneurs d'électrons qui doivent posséder des doublets non liants (exemple : ion hydroxyde).

Pour identifier les sites accepteurs d'électrons, il faut leur expliquer la notion de liaison polarisée en partant de la notion d'électronégativité (exemple : si B est plus électronégatif que A, il attire les électrons de la liaison vers lui et porte une charge partielle négative notée  $\delta^-$ ).

exemple de liaison polarisée :  $H_3C-Cl$ . Le chlore est plus électronégatif que le carbone : il attire donc les électrons de la liaison de son côté,  $H_3C^{\delta+}-Cl^{\delta-}$ . L'atome de carbone portant une charge partielle  $\delta^+$  est un site accepteur d'électrons.

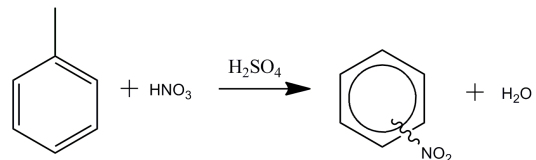
Conclusion : explication de la réaction de substitution nucléophile du chlorométhane par l'ion hydroxyde.



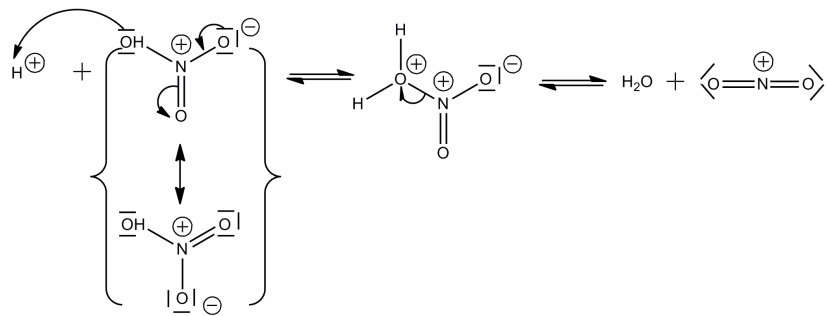
représente le mouvement de 2 électrons et va du site donneur vers le site accepteur.

III.3.1.3

Réaction de nitration du toluène :

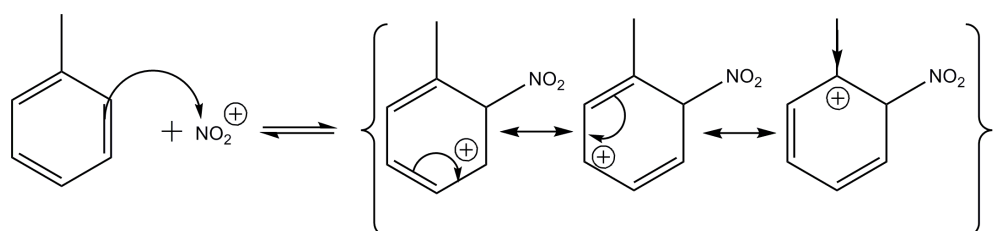


• Obtention de l'électrophile : on utilise le mélange sulfonitrique pour former l'ion nitronium  $NO_2^+$  : il y a protonation de la molécule d'acide nitrique puis départ d'une molécule d'eau.



• Mécanisme de la mono-nitration : le groupe méthyle  $-CH_3$  est un groupe mésomère donneur +M et inductif donneur +I. Il oriente en positions ortho et para (règles de Hollemann).

Mécanisme :



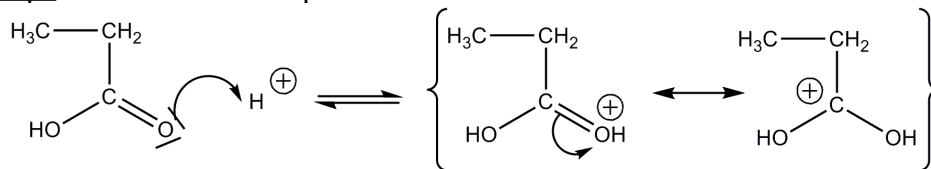
La stabilisation est possible en position para, alors qu'elle ne l'est pas en position méta.

III.3.1.4  
QP

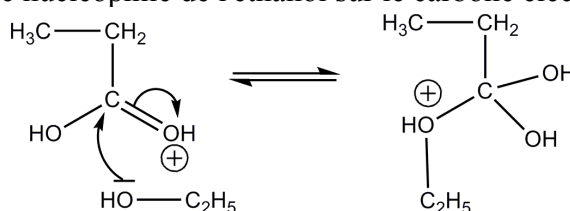
- Premier mécanisme abordé par l'élève : mécanisme de l'estérification

→ Correction de la copie avec commentaires (à rendre par le candidat)

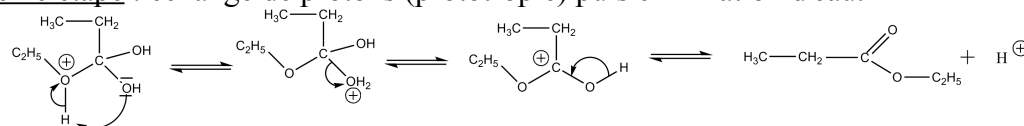
• 1ère étape : activation électrophile



• 2ième étape : attaque nucléophile de l'éthanol sur le carbone électrophile de l'acide.



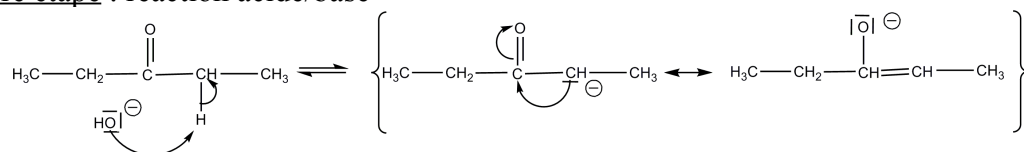
• 3ième étape : échange de protons (prototropie) puis élimination d'eau.



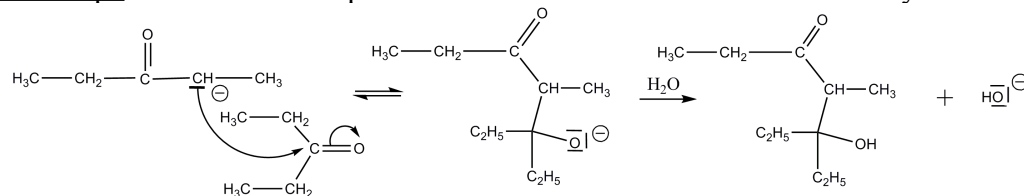
- Deuxième mécanisme : cétonisation puis crotonisation

Mécanisme basé sur l'acidité des H en  $\alpha$  de la fonction carbonyle.

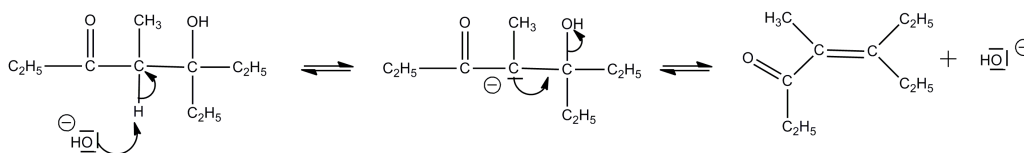
• 1ère étape : réaction acide/base



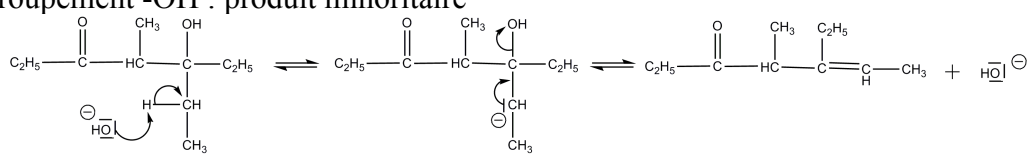
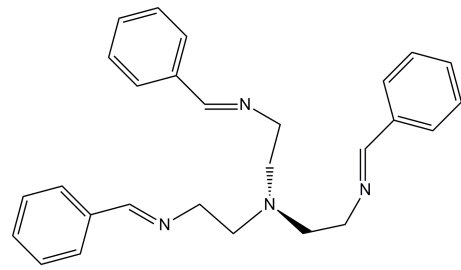
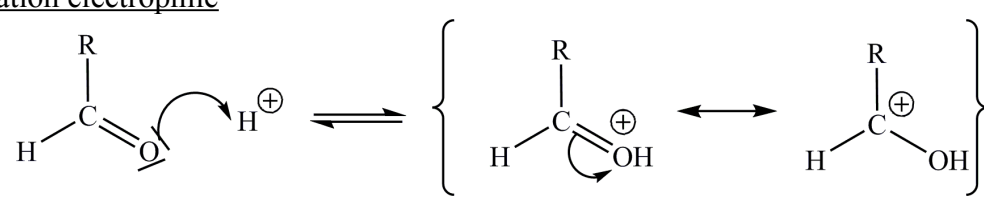
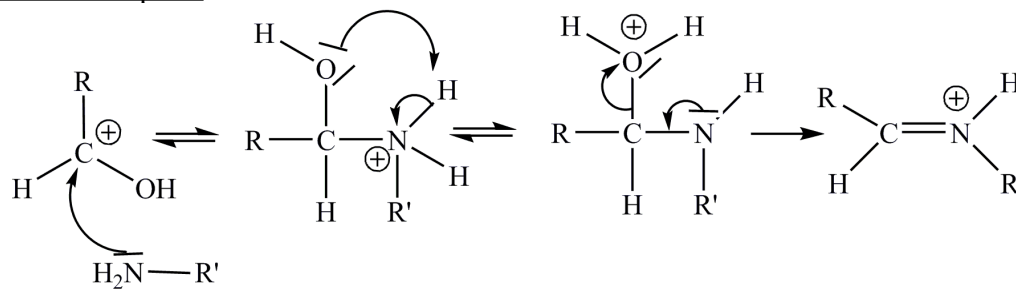
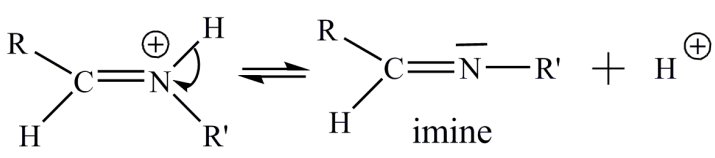
• 2ième étape : addition nucléophile de l'ion énolate sur la fonction carbonyle



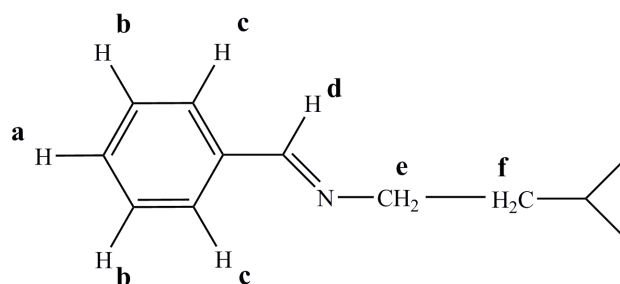
• 3ième étape : réaction de crotonisation. Mécanisme E1CB : élimination d'une molécule d'eau pour former une  $\alpha$ -énone (plus stable, liaison conjuguée)





	<p>Le produit obtenu n'est pas unique car l'élimination E1CB peut se faire sur l'autre H en <math>\alpha</math> du groupement -OH : produit minoritaire</p> 
III.3.2.1	<p>Formule du composé <b>2</b> :</p> 
III.3.2.2	<p>Groupe caractéristique : imine</p>
III.3.2.3	<p>La réaction se fait sous catalyse acide. <u>activation électrophile</u></p>  <p><u>addition nucléophile</u></p>  <p><u>déprotonation</u></p>  <p style="text-align: center;">imine</p>
III.3.2.4a	<p><math>CDCl_3</math> ne possède pas de H qui résonneraient en RMN et des part son intensité (solvant en excès) rendrait les signaux du composé <b>2</b> invisibles.</p>

III.3.2.4b

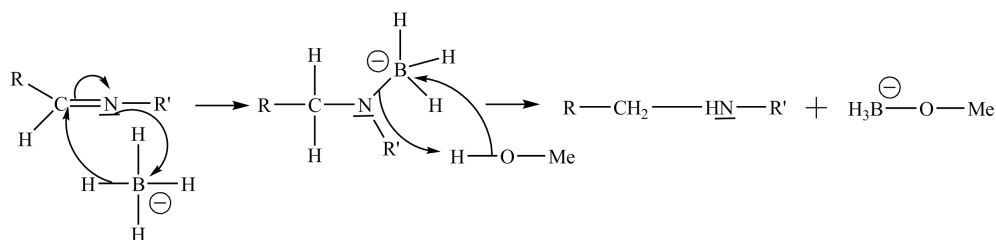


$\delta$ (ppm)	$H$ concernés	multiplicité du signal
8,1	$H_d$	non couplé donc singulet
7,52	$H_c$	couplé avec $H_b$ donc doublet
7,38	$H_b$ et $H_a$	2 multiplets : $H_a$ et $H_b$ couplés entre eux et $H_b$ couplé avec $H_c$
3,7	$H_e$	couplé avec 2 $H_f$ donc triplet
2,94	$H_f$	couplé avec 2 $H_e$ donc triplet

On peut penser à un déblindage plus important par  $C=N$  .

III.3.2.5

On a réduction de la fonction imine en fonction amine.



Théoriquement, la réaction se fait 4 fois et conduit au tétraméthoxyborate  $B(OCH_3)_4^-$  . Il y a en suite hydrolyse de ce composé.

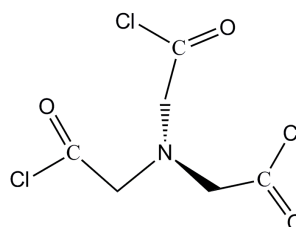
III.3.2.6

La disparition de la bande d'absorption à  $1660\text{ cm}^{-1}$  correspond à la disparition de la fonction imine.

L'apparition d'une bande d'absorption à  $3300\text{ cm}^{-1}$  correspond à l'apparition de la fonction amine secondaire, élongation de la liaison  $N-H$  .

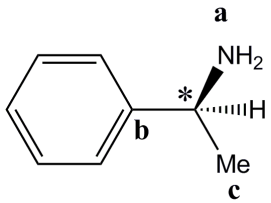
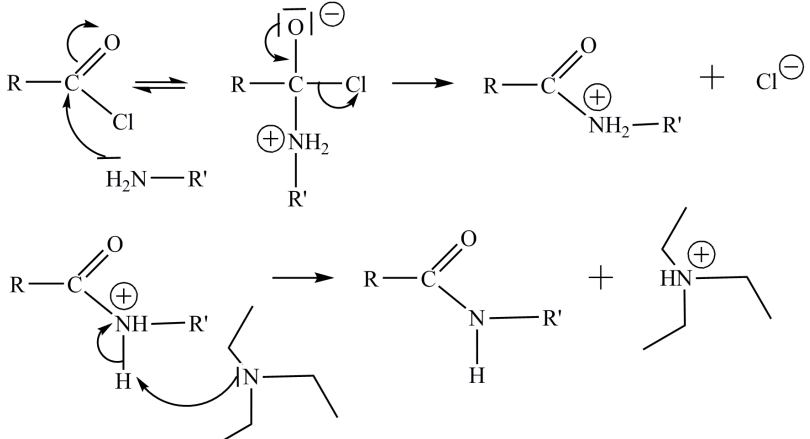
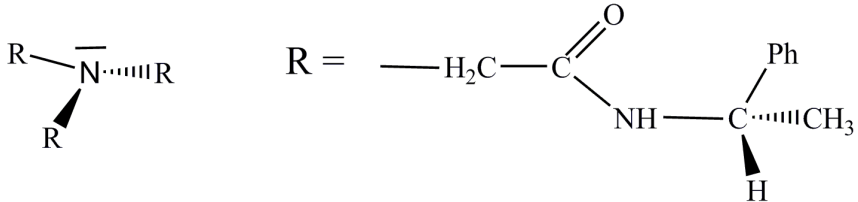
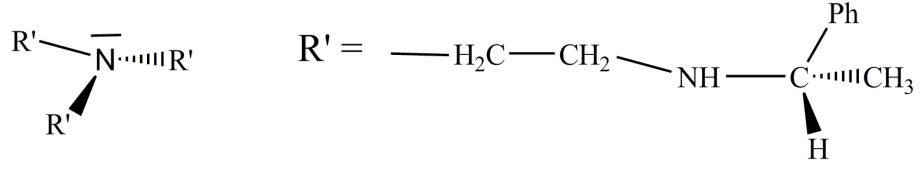
III.3.3.1

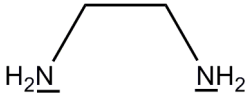
**6** est un chlorure d'acyle :

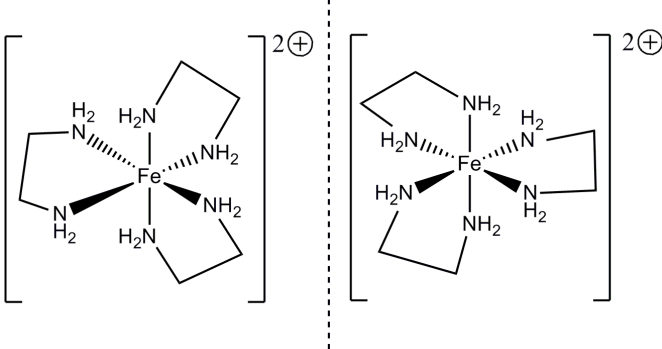


III.3.3.2

On peut utiliser  $PCl_3$  ou  $PCl_5$  .

III.3.3.3	<p>Nom de l'amine : 1-amino-1-phényléthane ou 1-phénylétylamine</p>  <p>ordre de préséance <math>a &gt; b &gt; c &gt; H</math> , donc configuration S.</p>
III.3.3.4	<p>La triéthylamine joue le rôle de base et sert à déprotoner.</p> 
III.3.3.5	<p>composé <u>7</u> :</p> 
III.3.3.6	<p>composé <u>8</u> :</p> 
III.3.4.1	<p>Pour l'ion <math>Fe^{2+}</math> : <math>3d^6</math> donc <math>n=6</math> .          Pour l'ion <math>Fe^{3+}</math> : <math>3d^5</math> donc <math>n=5</math> .</p>

III.3.4.2	<p>• ion <math>Fe^{2+}</math> :</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>eg <math>\uparrow \uparrow</math></p> <p>t2g <math>\uparrow\downarrow \uparrow \uparrow</math></p> <p>HS <math>s_2 = 2</math></p> <p>paramagnétique</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>— — eg</p> <p><math>\uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow</math> t2g</p> <p>BS <math>s_1 = 0</math></p> <p>diamagnétique</p> </div> </div> <p>• ion <math>Fe^{3+}</math> :</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>eg <math>\uparrow \uparrow</math></p> <p>t2g <math>\uparrow \uparrow \uparrow</math></p> <p>HS <math>s_2 = 5/2</math></p> <p>paramagnétique</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>— — eg</p> <p><math>\uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow</math> t2g</p> <p>BS <math>s_1 = 1/2</math></p> <p>diamagnétique</p> </div> </div>
III.3.4.3a	<p>• ion <math>Fe^{2+}</math> :</p> $E(HS) = 2 \times \frac{3}{5} \Delta_0 - 4 \times \frac{2}{5} \Delta_0 + P = -\frac{2}{5} \Delta_0 + P$ $E(BS) = -6 \times \frac{3}{5} \Delta_0 + 3P = -\frac{12}{5} \Delta_0 + 3P$ <p>d'où la différence <math>\Delta E = E(HS) - E(BS) = 2\Delta_0 - 2P</math></p> <p>• ion <math>Fe^{3+}</math> :</p> $E(HS) = 2 \times \frac{3}{5} \Delta_0 - 3 \times \frac{2}{5} \Delta_0 = 0$ $E(BS) = -5 \times \frac{2}{5} \Delta_0 + 2P = -2\Delta_0 + 2P$ <p>d'où la différence <math>\Delta E = E(HS) - E(BS) = 2\Delta_0 - 2P</math></p>
III.3.4.3b	L'état électronique BS est le plus stable si $E(BS) < E(HS)$ donc si $\Delta_0 > P$ .
III.3.4.4a	<p>"Bidentate" signifie que le ligand possède 2 sites de coordination.</p> <div style="text-align: center;">  <p>Exemple : éthylènediamine</p> </div>
III.3.4.4b	$[Fe(en)_3]^{2+}$ : ion complexe octaédrique

	<p>couple d'énantiomères : images l'un de l'autre dans un miroir et non superposables.</p> 
III.3.4.4c	<p>La polarimétrie permet de distinguer ces deux énantiomères. Des solutions de chacun des deux énantiomères, à la même concentration, font tourner le plan de polarisation de la lumière polarisée du même angle mais dans des sens opposés.</p>
III.3.4.5a	<p>Nombre de projections possibles : <math>2S_{tot} + 1</math> .  <math>\Omega_1 = 2s_1 + 1 = 5</math> pour l'état HS.  <math>\Omega_2 = 2s_2 + 1 = 1</math> pour l'état BS.</p>
III.3.4.5b	<p><math>S = R \ln(\Omega)</math>  L'équilibre <math>BS \rightleftharpoons HS</math> s'accompagne d'une variation d'entropie <math>\Delta_r S^0 = S_1^0 - S_2^0 = R \cdot \ln 5</math> .</p>
III.3.4.5c	<p>En supposant le mélange idéal, <math>a_i = x_i</math> .  <math>K^0(T) = \frac{x_{HS}}{x_{BS}}</math> . Avec <math>x_{HS} + x_{BS} = 1</math> , on en déduit :  <math>x_{HS} = \frac{K^0(T)}{1 + K^0(T)}</math> et <math>x_{BS} = \frac{1}{1 + K^0(T)}</math> .</p>
III.3.4.5d	<p>Pour <math>T_{1/2}</math> , <math>x_{HS} = x_{BS} = 0,5</math> et on trouve graphiquement <math>T_{1/2} = 186 K</math> .</p>
III.3.4.5e	<p><math>x_{HS} = x_{BS} = 0,5</math> .  <math>K^0(T) = 1</math> , <math>\Delta_r G^0 = 0 = \Delta_r H^0 - T_{1/2} \Delta_r S_{exp}^0</math> .  Numériquement, il vient :  <math>\Delta_r S_{exp}^0 = \frac{\Delta_r H^0}{T_{1/2}} = \frac{8,75 \cdot 10^{-3}}{186} = 47 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}</math> .</p>
III.3.4.5f	<p>L'augmentation des longueurs de liaison <math>Fe-N</math> lors de la transition <math>BS \rightarrow HS</math> entraîne une augmentation du désordre donc <math>\Delta_r S_{exp}^0 &gt; \Delta_r S^0</math> .</p>
	<p>*** FIN DE L'EPREUVE ***</p>

## ANNEXE 1

(A rendre avec la copie)

### Evolution des modèles de l'atome de la classe de 4<sup>ème</sup> à la classe 1<sup>ère</sup> S

Niveaux d'enseignement	Expériences élèves ou expériences historiques	Modèle de l'atome	Schéma ou représentation symbolique associé
4 <sup>ème</sup>	Etats de la matière, diffusion des gaz, mélanges	Modèle particulaire Molécule	+ O x
4 <sup>ème</sup>		Sphère dure	
4 <sup>ème</sup>	combustion : test CO <sub>2</sub> mise en évidence de l'eau	association des atomes en molécules	modèles moléculaires compacts et éclatés
3 <sup>ème</sup>	conduction du courant dans un conducteur électrique	noyaux (+) et électrons (-)	
	conduction du courant dans une solution aqueuse	cations et anions	Na <sup>+</sup> et Cl <sup>-</sup>
2 <sup>nde</sup>		noyau : protons + neutrons	${}^A_Z X$
2 <sup>nde</sup>		règles du duet et de l'octet	application aux ions monoatomiques
1 <sup>ère</sup> S		règles du duet et de l'octet Lewis	application aux molécules simples HCl, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>
1 <sup>ère</sup> S		présence de doublets non liants	géométrie de quelques molécules
1 <sup>ère</sup> S	observation et analyse de spectres d'émission	niveaux d'énergies pour les électrons	

## II.5.3 QP

<b>Argumentaire satisfaisant</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Problématique respectée ;</li> <li>• Bonne mise en relation des arguments avec la problématique</li> <li>• Argumentaire correctement rédigé</li> </ul>		<b>Argumentaire non satisfaisant</b> Problématique non prise en compte OU Une mise en relation maladroite OU Une rédaction maladroite		<b>Aucun argumentaire</b>  Uniquement des idées juxtaposées sans lien entre elles ni lien avec la problématique posée
Les éléments scientifiques (connaissances issues des différents champs disciplinaires) sont solides (complets et pertinents).	Des éléments scientifiques (connaissances issues des différents champs disciplinaires) incomplets	Des éléments scientifiques solides (connaissances issues des différents champs disciplinaires) bien choisis	Des éléments scientifiques (connaissances issues des différents champs disciplinaires) incomplets ou mal choisis	Des éléments scientifiques (connaissances issues des différents champs disciplinaires) corrects

### Les éléments de correction :

Descripteurs (génériques)	Indicateurs (éléments de correction spécifiques à chaque sujet)
<b>Rédaction de l'argumentaire</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Qualité de l'argumentaire :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>Problématique</b> énoncée et respectée</li> <li>○ <b>Nombre suffisant d'argument s'appuyant sur des éléments scientifiques</b> solides (suffisants, pertinents), utilisés à bon escient en accord avec le sujet...               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Issus des documents</li> <li>- Issus des connaissances (qui intègrent les connaissances acquises dans d'autres champs disciplinaires) <i>(le candidat doit saisir des informations des documents et en faire des arguments sans qu'il soit exigé qu'il cite chaque document source de façon explicite)</i></li> </ul> </li> <li>○ <b>Texte personnel</b> sans paraphrase ni citations intégrales des textes des documents</li> <li>○ <b>Enchaînement cohérent des idées scientifiques</b> avec utilisation rigoureuse des connecteurs logiques (« donc » et/ou de « parce que » ...) exprimant une relation de causalité.</li> <li>○ <b>Réponse à la problématique</b> présente et correcte</li> </ul> </li> <li>• <b>Qualité de l'expression écrite :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ respect de la forme d'expression attendue</li> <li>○ qualité de l'orthographe et la grammaire</li> <li>...</li> </ul> </li> </ul>	<b>Problématique(s) possible(s) attendue(s) :</b> <b>1. Comment fonctionne une vanne de spin ?</b> <b>2. Qu'est-ce que la spintronique ?</b>  <b>Les arguments scientifiques sont suffisants si le candidat utilise les éléments incontournables suivants :</b>  <b>Issus des documents :</b> <b>1.- description sommaire avec schéma de la GMR dans le cas d'une conduction classique pour la couche intermédiaire (couche non-magnétique) (cas de la vanne de spin)</b> <b>- l'orientation des champs magnétiques dans la couche de référence et dans la couche libre permet de différencier les électrons ayant des spins « up » et « down ».</b> <b>Quand les champs magnétiques sont orientés dans le même sens, le canal de spin « up » traverse la structure facilement (faible résistance) tandis que le canal de spin « down » traverse la structure difficilement « forte résistance ».</b> <b>Quand les champs magnétiques sont orientés en sens opposés, les deux canaux de spin « up » et « down » rencontrent la même résistance et ne sont donc pas différenciés.</b> <b>Pour discriminer les spins « up » et « down », il faut donc que les champs magnétiques dans les couches de référence et libre soient de même sens.</b>  <b>2. La spintronique ou électronique de spin utilise les propriétés magnétiques des électrons (ou leurs spins) pour stocker des informations sous forme binaire (codage 0 ou 1)</b> <b>Issus des connaissances :</b> <b>- comparaison du stockage d'informations avec des matériaux magnétiques ou par la spintronique</b> - ..... <b>- ...dont des connaissances issues d'autres champs disciplinaires (si cela est possible au regard du sujet) ; au moins un élément parmi ces possibilités (liste non exhaustive : le candidat peut proposer d'autres éléments recevables) :</b> - ... - ...

## Rapport sur l'épreuve écrite de Chimie

L'épreuve de chimie 2013 portait sur l'étude d'un phénomène important relevant de la physique appliquée et dans lequel la synthèse et la caractérisation des espèces chimiques jouent un rôle central. Le thème conducteur de l'épreuve était **la spintronique**. Les candidats étaient donc amenés à travers trois parties distinctes à examiner différents aspects de la relation entre chimie et spintronique, partant de la structure de l'atome et de sa description quantique, pour aborder l'élaboration de différents matériaux organiques et inorganiques utilisables dans ce domaine.

### Remarques générales

De manière explicite, en préambule et tout au long du sujet, il a été proposé aux candidats de répondre à des questions pédagogiques. Ces questions invitaient les candidats à se placer dans la posture d'un professeur en fonction, sollicitant ses compétences à préparer ou à dispenser son enseignement face à une classe. L'ensemble de ces questions représentait un tiers du total des points accordés à cette épreuve, suggérant aux candidats de consacrer du temps dans les réponses apportées qui nécessitaient du temps de réflexion et de rédaction.

Par rapport aux années antérieures, le nombre total de questions a été volontairement réduit de façon significative afin que les candidats puissent consacrer un temps suffisant aux questions pédagogiques. Plusieurs candidats ont pu ainsi traiter l'ensemble de l'épreuve.

Par ailleurs, en chimie, comme en physique, environ 10 % de la note était consacrée à la qualité de la copie : présentation, orthographe et rigueur rédactionnelle, de façon à valoriser les candidats qui en faisant cet effort de communication, attestent par là-même de clarté d'expression et de présentation essentielles pour un enseignant.

### I. Du collège au lycée : l'évolution du modèle de l'atome

**La première partie** du problème était consacrée à l'étude de l'atome, à travers des présentations d'expériences et des questions portant sur l'évolution du modèle de l'atome à travers l'histoire et à travers son enseignement. Cette partie a en général été relativement bien traitée.

La question I.1 permettait aux candidats d'introduire le phénomène de diffusion de deux gaz et d'interpréter au niveau d'une classe de quatrième le fait que deux gaz se mélangent spontanément car les molécules de gaz, outre leur dispersion, sont en mouvement. Les professeurs devaient donner les connaissances déjà acquises antérieurement par les élèves (distinction entre corps pur et mélange, mélanges homogène et hétérogène, un gaz est composé de molécules, l'état gazeux est un état dispersé et désordonné, l'importance de percevoir les différences entre réalité et simulation, ...). Pour réaliser cette activité, le professeur pouvait partir de la troisième situation (flacons horizontaux) et demander aux élèves d'expliquer pourquoi les deux flacons prenaient une coloration orange plus claire que la coloration initiale du flacon de gauche. Le professeur devait demander à ses élèves de schématiser les deux flacons avant et après en représentant schématiquement les molécules du gaz orange et de l'air. Il devait être très attentif au fait que les molécules se répartissent de façon équitable dans les deux flacons et que leurs nombres restent identiques. Le professeur peut alors montrer aux élèves une simulation de cette expérience et revenir sur la capacité « percevoir les différences entre réalité et simulation ». Enfin, les situations 1 et 2 pouvaient amener les élèves à se poser la question du gaz « le plus lourd », s'ils avaient déjà vu à ce niveau qu'un gaz comme l'air possède une masse. Comme l'état final est le même dans les trois situations, cela signifie que le phénomène de diffusion entre deux gaz se produit même si ces gaz sont constitués de molécules ayant des masses différentes.

La question I.2 a été correctement traitée, les candidats connaissent généralement bien la



progression de la construction du modèle de l'atome du collège au lycée.

La question I.3 a permis de montrer que de nombreux professeurs étaient sensibilisés à l'histoire des sciences. De très belles frises historiques de l'évolution du modèle de l'atome ont été réalisées à la grande satisfaction des membres du jury.

Les questions 1.4.1 et 1.4.2 ont été bien traitées dans l'ensemble. Les candidats ont signalé l'erreur qui existait dans l'énoncé du livre et l'ont corrigée. Il fallait que les candidats utilisent les compétences attendues du programme de seconde pour justifier la formule ionique du chlorure de sodium.

Les réponses aux questions 1.5.1 et 1.5.2 pouvaient être faites très simplement. Des candidats se sont lancés dans des développements mathématiques compliqués et stériles. La détermination de la constante de Rydberg et de son unité a posé quelques soucis à certains d'entre eux.

La question I.5.3 permettait aux candidats de retrouver l'expression de l'énergie du niveau  $n$  en partant de la relation établie par Ritz et Rydberg. Le jury attendait à ce niveau un développement rigoureux et a été surpris de voir que certains candidats ont trouvé la relation demandée en prenant  $p = 0$  !

Question 1.5.4 la définition de l'énergie d'ionisation a posé quelques difficultés aux candidats alors qu'elle relève normalement des notions de base, utiles à la construction de différentes grandeurs.

Pour la question I.5.5, il était demandé aux candidats d'expliquer que, si un atome excité émettait un spectre continu, cela signifiait que les électrons pouvaient se situer à n'importe quelle distance du noyau et que son énergie pouvait prendre n'importe quelle valeur. Les spectres de raies montrent au contraire, que seules certaines énergies étaient permises pour les différents états des atomes (valeurs discrètes), que l'énergie d'un atome était donc quantifiée et que le modèle de l'atome devait faire intervenir la notion de quantification.

## **II. De la chimie quantique à la spintronique**

**La deuxième partie** abordait la description quantique de l'atome, et un certain nombre de questions portaient sur des notions élémentaires. L'objectif était de montrer qu'il existait une forme de continuité entre la description classique et l'approche quantique.

Les questions II.1 à II.4 ont été assez bien réussies : la majorité des candidats ayant abordé cette partie connaissent les nombres quantiques et ont bien expliqué la différence entre les modèles classique et quantique.

La signification du maximum des densités de probabilité radiales a posé davantage de difficultés.

En revanche, peu de candidats connaissent Albert Fert et ont réussi à déterminer l'énergie de retournement  $E_{\text{rip}}$ .

Dans la question II.5.4, le sujet demandait aux candidats d'analyser un document traitant de l'effet de magnétorésistance géante. Il s'agissait d'extraire et d'exploiter des informations pour justifier la terminologie "vanne de spin" et "spintronique". Les candidats étaient guidés dans cette démarche par les questions précédentes qui relevaient pour certains d'entre elles de connaissances de magnéto-statique.

## **III. Des matériaux pour la spintronique**

**La troisième partie**, la plus longue, portait finalement sur la préparation et la caractérisation de matériaux pour la spintronique. À nouveau, le sujet proposait une analyse de document, exercice dans lequel les candidats devaient se placer en tant qu'enseignant en proposant des protocoles possibles pour guider leurs élèves. Cette partie s'appuyait principalement sur l'élément Fe et son degré II. Le jury a noté d'excellentes réponses apportées aux questions de cristallographie et de potentiométrie. Pour ces dernières, les candidats étaient invités à retrouver des relations, en général bien connues, et ainsi à utiliser et à réagir sur des données disponibles.

L'activité « Chez le ferrailleur » devait amener les candidats à préciser les connaissances et les

capacités du socle commun et du programme de troisième concernées ; il ne s'agissait nullement, comme certains l'ont compris à tort, d'expliquer comment identifier les métaux et de comparer les coûts des différents métaux. Parmi les compétences du socle commun, les capacités liées aux TICE ou au B2i et celles qui concernent le domaine du développement durable pouvaient être également envisagées. Les aides attendues devaient permettre aux élèves de surmonter les difficultés rencontrées lors de la résolution de cette tâche complexe : rappels sur les unités, fiche technique sur la mesure d'une masse ou d'un volume...

La question III.1.2 s'intéressait aux familles des métaux. Le jury signale qu'aucun point n'a été accordé aux quelques candidats qui ont rempli presque entièrement la classification périodique sans indiquer la moindre famille.

La question III.1.3 demandait la configuration électronique de 2 éléments. Le numéro atomique du cobalt ayant disparu des données, le jury n'a pas pénalisé les candidats qui ne connaissaient pas le numéro atomique du cobalt  $Z=27$ .

La question III.1.4 de cristallographie a rapporté des points : seule l'absence de conclusion (structure pseudo-compacte) est à signaler et à regretter. Le sujet parlait de maille élémentaire alors qu'il s'agissait de maille conventionnelle.

La compacité de la maille du fer  $\alpha$  a souvent été calculée correctement. En revanche, peu de candidats ont su conclure que la structure cubique centrée n'est pas compacte, car sa compacité est inférieure à celle de la structure cubique faces centrées.

Dans la question III.2, la formule de l'ion bismuth  $\text{Bi}^{3+}$  a rarement été justifiée par sa structure électronique.

Les équations des réactions mises en jeu pour l'analyse de la minette de Lorraine, question III.2.4.1, ont en général été correctement écrites : quelques candidats ont toutefois fait des erreurs dans l'ajustement des nombres stœchiométriques. La détermination de la teneur massique en fer du minerai lorrain a été également plutôt bien réussie.

Le schéma du montage utilisé pour le titrage potentiométrique à courant nul a été dans l'ensemble bien réalisé. Peu de candidats en revanche savent justifier l'absence de courant dans le circuit par la grande valeur de la résistance interne du millivoltmètre. Le pH de précipitation de l'hydroxyde de cérium a été souvent correctement déterminé pour justifier la nécessité de réaliser ce titrage en milieu sulfurique concentré. De même, le principe d'un titrage potentiométrique a été bien maîtrisé par de nombreux candidats qui ont retrouvé la valeur précédente de la teneur en fer dans le minerai de Lorraine et qui ont su justifier les expressions de la différence de potentiel avant et après l'équivalence et retrouver sur la courbe fournie les valeurs des potentiels standard des deux couples  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  et  $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ .

Il est dommage de ne pas toujours avoir obtenu de conclusion relative à l'adéquation des 2 méthodes pour le calcul du pourcentage en fer.

Une synthèse organique mettant en œuvre des réactions courantes était proposée pour conduire à la préparation d'un complexe de Fe(II). La plus grande difficulté venait de la formation d'une imine intermédiaire que peu de candidats ont identifiée. Ce groupe fonctionnel est très souvent confondu avec l'amide. L'écriture des mécanismes réactionnels n'est pas toujours maîtrisée : rappelons que les flèches représentent le mouvement d'un doublet, elles partent donc obligatoirement d'un doublet liant ou non liant, et non d'une charge. La réversibilité éventuelle et le respect du nombre d'étapes manquent aussi de rigueur.

Le jury attend également une meilleure connaissance de la nomenclature et des règles de Cahn, Ingold et Prelog.

En revanche, on note de bonnes connaissances en spectroscopie RMN et de capacités à utiliser les spectres.

Enfin la mise en pratique de tels objets était abordée, avec les notions de bas-spin et haut-spin. La figure 5 permettait de raisonner sur les notions de "champ fort" et "champ faible". La fin du problème, question III.3.3, abordait les complexes de Fe(II) et du spin.

La réponse à la question 3.3.1 (5 et 6 électrons pour les ions Fe(III) et Fe(II)) permettait aux candidats de poursuivre sans difficulté, aidés de la figure 5. Beaucoup de bonnes réponses ont été

apportées sur un raisonnement courant confrontant l'éclatement octaédrique et l'énergie de répulsion électron-électron.

La question 3.3.5.a a posé quelques difficultés alors que la notion de dégénérescence  $2S+1$  est normalement un résultat bien connu. Du reste, la question suivante permettait de retrouver ce résultat puisque la variation d'entropie électronique était fournie dans l'énoncé.

Une étude thermodynamique suivait et permettait de déterminer la température critique, question 3.3.5.d.

Finalement, la question 3.3.6.f amenait à tenir compte des vibrations dans la modulation de la variation d'entropie. Les candidats qui effectuaient les applications numériques répondaient en général très correctement à cette question.

L'épreuve 2013 marque un changement voulu dans le format des épreuves du concours. Le jury souhaite attribuer davantage d'importance aux parties pédagogiques, tout en invitant les candidats à réagir sur des documents, données ou résultats plutôt qu'à les engager dans des dérivations qui ne permettent pas de les placer dans leur fonction d'enseignant devant une classe.

## A propos des épreuves orales

La session 2013 comportait des épreuves orales d'admission différentes de celles de la session 2012. En effet, la traditionnelle « leçon » y était remplacée par un « exposé consistant en une présentation d'un concept et son exploitation pédagogique » et le « montage » conservait sa forme antérieure mais s'appuyait sur une nouvelle liste de sujets.

Pour la chimie et en grande partie pour la physique (22 sujets sur 29), les sujets étaient communs aux épreuves d'exposé et de montage ; ils ont été publiés au BOEN le 23 mars 2012 et sont accessibles en section 3 de ce rapport, ainsi que sur le site du Ministère de l'éducation nationale. Ce recouvrement permettait aux candidats, lors de leur préparation, d'aborder simultanément, pour un domaine donné, les fondements théoriques, les modèles, les illustrations expérimentales et de coupler les approches scientifiques et pédagogiques. De plus, souvent énoncés sous la forme d'un mot-clé, ces sujets portent sur un domaine, une notion ou un concept de la physique ou de la chimie et offrent aux candidats une part d'initiative importante.

L'objectif du changement était de donner aux enseignants en activité, la possibilité de valoriser davantage, dans le cadre de l'épreuve d'exposé, leurs compétences professionnelles acquises par l'expérience et une pratique éprouvée.

Les structures des deux épreuves, les attentes en termes de contenus et de présentation, ainsi que les capacités et compétences évaluées au sein de chacune de ces deux épreuves avaient été décrites à la fin du rapport de la session 2012 (*Session 2013 : Quelques précisions à propos des épreuves orales d'admission*) afin de guider les candidats dans leur préparation.

Pour la session 2014, le programme des épreuves orales sera identique à celui de la session 2013. A l'issue de cette première session, quelques compléments généraux figurant ci-après sur la préparation et la présentation, ainsi que la lecture des rapports des épreuves orales de physique et de chimie constituent des conseils précieux pour s'y préparer de manière efficace ; il est donc vivement conseillé aux futurs candidats d'en faire une lecture attentive.

### Conditions matérielles de préparation et de présentation des épreuves

Pendant les 4 heures de préparation des épreuves et lors de la présentation devant le jury, chaque candidat dispose d'un ordinateur et de dispositifs de projection (vidéoprojecteur, flexcam, rétroprojecteur) et même d'un tableau blanc interactif pour l'épreuve d'exposé. Par ailleurs, le candidat a accès à un grand nombre d'ouvrages scientifiques, de manuels scolaires, de livres de données à la bibliothèque et à des documents numériques sur l'ordinateur mis à sa disposition ; chaque poste informatique comporte un dossier numérique constitué de :

- textes officiels : programmes, documents ressources pour la classe (des sites Eduscol et réseau national STL (rnstl)), rapports du jury ;
- logiciels de présentation (diaporama, cartes mentales, ...) d'acquisition ou de traitement de données, de simulation ;
- animations numériques et vidéos scientifiques.

Les listes de l'ensemble de ces documents sont publiées sur le site de l'agrégation interne. Chaque candidat peut, au début de la session orale, amener des documents (si ceux-ci sont référencés et peuvent être accessibles à tous les autres candidats, des productions personnelles ou tout document annoté est interdit) ; il doit alors les laisser pendant toute la durée de la session.

## **1. Epreuve d' « Exposé consistant en une présentation d'un concept et son exploitation Pédagogique »**

### **Sujet de l'épreuve**

L'épreuve porte sur un des sujets de physique ou de chimie figurant dans la liste publiée pour la session 2013 et figurant en section 3.

### **Structure de l'épreuve**

L'épreuve est constituée d'un exposé effectué par le candidat, d'une durée maximale de 50 minutes, suivi d'un entretien avec le jury, d'une durée maximale de 30 minutes. L'exposé du candidat comporte deux parties successives, d'importance équivalente, qui lui permettent de mettre en valeur ses compétences professionnelles :

- une partie relative au concept scientifique associé au sujet, développée au moins en partie à un niveau post-baccalauréat ;
- une partie relative à un aspect pédagogique de l'enseignement, au collège ou au lycée, de notions relatives à ce concept.

L'ordre de présentation de ces deux parties est laissé au choix du candidat qui doit en informer le jury en début d'épreuve. Une grande liberté est également laissée concernant la forme de la présentation et les points particuliers mis en exergue. Pour autant, le concept reste à aborder de la manière la plus exhaustive possible.

L'illustration expérimentale est naturellement possible dans chacune des parties de cette épreuve ; néanmoins, le montage reste l'épreuve durant laquelle le candidat est évalué sur ses qualités d'expérimentateur, et dans cette épreuve c'est plutôt le critère de pertinence des expériences pour accompagner les propos qui sera jugé.

#### ***Partie relative au concept scientifique (durée : 25 minutes)***

Dans cette partie, le candidat met en valeur ses compétences scientifiques, sa maîtrise de la discipline et sa culture en physique-chimie ainsi que dans les disciplines connexes. Il présente d'une part une vision d'ensemble du concept et développe d'autre part un point particulier, de son choix, évoqué dans la vision d'ensemble.

La présentation d'ensemble du concept, dont la durée n'excède pas 15 minutes, peut prendre différentes formes : plan séquencé, schéma conceptuel, carte mentale, etc. Cette présentation permet de cerner le concept scientifique et d'en aborder les différents aspects, du fondamental aux applications, les liens avec les différents domaines. Le candidat montre sa capacité à construire un exposé scientifique structuré et rigoureux, en mettant en oeuvre des outils de communication adaptés.

Le candidat doit être en mesure d'approfondir, à la demande du jury lors de l'entretien, l'ensemble des points abordés dans cette présentation.

Le développement d'un point particulier revêt une forme plus classique, typiquement celle d'un exposé magistral, d'une durée comprise entre 10 et 15 minutes. Le candidat y approfondit un des aspects du concept à un niveau post-baccalauréat, en mettant en valeur sa capacité à explorer et à manipuler lois, modèles et formalismes. Pour autant ce travail ne se résume pas à la résolution formelle d'équations sans qu'elle ne vienne en réponse à une problématique bien identifiée ; cette étude doit rester fidèle à la manière dont un scientifique aborde un problème et doit s'inscrire dans une démarche authentique au cours de laquelle, la résolution analytique est reliée à un modèle choisi pour rendre compte d'un phénomène et le résultat analytique obtenu confronté au réel.

#### ***Partie relative à un aspect pédagogique de l'enseignement du concept (durée : 25 minutes)***

Dans cette partie, le candidat présente une ou plusieurs activités pédagogiques, discute ses choix de manière explicite en fonction des objectifs d'apprentissage ou de remédiation visés pour les élèves.

Le candidat peut par exemple choisir de décrire et d'analyser :

- une séquence d'enseignement ;
- une activité expérimentale ;
- une activité documentaire ;
- une activité d'évaluation (diagnostique, formative, sommative, certificative) ;
- une activité visant à travailler sur un obstacle didactique ;
- des activités illustrant la progressivité d'enseignement du concept du collège au lycée ;
- ...

Limiter le nombre d'activités permet de consacrer davantage de temps pour mener une étude approfondie sur leur intérêt et pour les mettre en perspectives des enjeux assignés à l'enseignement en collège et en lycée qui s'appuient notamment des compétences à faire acquérir aux élèves dans le cadre du socle commun, des enseignements d'exploration, des enseignements de tronc commun, et des enseignements de spécialité ; une bonne connaissance du vocabulaire et des problématiques inhérentes à la mise en œuvre des programmes est attendue.

Les supports choisis peuvent être des productions personnelles ou des extraits de livres ou de manuels scolaires ; dans tous les cas, une justification des choix et une analyse critique doit être effectuée, comme le candidat est habitué à le faire dans le cadre de sa mission d'enseignant.

Cette partie permet au candidat de mettre en valeur ses compétences pédagogiques et didactiques.

### ***L'entretien***

L'entretien porte sur les deux parties ; il vise à compléter l'évaluation de la maîtrise des connaissances scientifiques du candidat, de sa culture scientifique et technologique, et de ses compétences pédagogiques et didactiques.

## **B. Epreuve de « Montage et traitement automatisé de l'information »**

### **Sujet de l'épreuve**

L'épreuve porte sur un des sujets de physique ou de chimie figurant dans la liste publiée pour la session 2013 du concours et figurant en section 3. Les sujets de cette liste sont différents de ceux proposés antérieurement pour l'épreuve de montage.

Le candidat choisit un sujet parmi les deux sujets qui lui sont proposés.

### **Structure de l'épreuve**

L'épreuve est constituée d'un montage effectué par le candidat devant le jury, d'une durée maximale 1h20 minutes égale à la durée de l'épreuve, tout ou partie de l'entretien prenant place tout au long de la présentation du montage, sans pour autant que la part dévolue à la présentation du candidat ne soit diminuée (50 minutes).

Au cours de l'épreuve les candidats présentent, réalisent et exploitent qualitativement et quantitativement quelques expériences qui illustrent le sujet retenu. Une attention toute particulière doit être portée à la mesure et aux incertitudes associées. A cet égard, il est recommandé de prendre connaissance de l'annexe « mesures et incertitudes » du rapport de l'Inspection générale de l'éducation nationale : « activités expérimentales en physique-chimie : enjeux de formation ».

## **Rapport sur les épreuves orales de physique**

### **Généralités**

Le présent rapport a pour objet de rendre compte du déroulement des deux épreuves orales de physique en soulignant tout aussi bien les points positifs à suivre que les points négatifs à éviter. Il est également recommandé aux futurs candidats de prendre connaissance des rapports des sessions antérieures.

Les candidats présents à l'oral ont bien sûr passé le cap de l'écrit et ont, par conséquent, déjà fait preuve de certains savoir-faire et de certaines qualités. Les épreuves orales visent à évaluer d'autres capacités, aussi ne faut-il pas s'étonner si les notes de l'écrit et de l'oral peuvent être très différentes.

Le jury a eu le plaisir d'interroger des candidats parfois très brillants, à l'aise aussi bien lors de l'exposé que lors de l'entretien avec le jury. Ces candidats, bien préparés, ont su valoriser leurs pratiques pédagogiques, leurs connaissances académiques et leurs capacités expérimentales, en les restituant avec profit au niveau exigé par les épreuves. Cependant, beaucoup de candidats ont semblé moins à l'aise et souvent très stressés. Le jury souhaite rassurer les futurs candidats, en rappelant qu'il a conscience de la fatigue due à la préparation de l'exposé ainsi qu'à la tension qu'impose l'enjeu de l'épreuve. Le jury sait aussi que le concours s'adresse non pas à des étudiants classiques mais à des professeurs déjà fortement investis dans leur activité professionnelle.

Si l'originalité et la prise d'initiative sont toujours appréciées, le jury recommande néanmoins de ne pas s'aventurer dans des domaines non maîtrisés. Mieux vaut exposer des notions apparemment simples, mais comprises et exposées avec intelligence, que de s'engluer dans un verbiage confus assorti d'illustrations peu convaincantes.

D'une manière générale, il ne faut pas oublier que, lors des épreuves orales, la qualité de la communication joue un rôle essentiel. Cet aspect ne doit pas être négligé, s'agissant de professeurs en exercice. Ainsi, le candidat doit vérifier que les projections qu'il envisage sont lisibles de loin. Par ailleurs, même si l'assistance ne comporte que quelques personnes, la voix doit être placée de manière à produire un discours audible, et le ton adopté doit être convaincant. Au delà de l'aspect technique, le jury apprécie que les candidats fassent preuve de présence, de curiosité, d'enthousiasme.

L'exposé du candidat est suivi d'un échange avec les membres du jury qui vise à lever le doute sur des points qui auraient paru flous, voire ambigus, à évaluer le niveau de maîtrise des notions abordées et pourquoi pas, à élargir ou à approfondir le sujet. Rappelons si nécessaire que le jury n'est nullement hostile au candidat interrogé et cherche, dans la mesure du possible, à l'aider à révéler le meilleur de lui-même.

### **Rapport sur l'exposé de physique**

La nature de cette épreuve a été profondément modifiée par rapport aux années précédentes et le jury a constaté que la majorité des candidats ont bien compris et respecté le nouveau format.

Beaucoup ont pu ainsi mieux mettre en valeur leurs compétences et certaines prestations ont été d'un excellent niveau, témoignant à la fois d'une réelle maîtrise du sujet étudié et des impératifs associés à son enseignement dans le secondaire.

Pour autant, il est utile de préciser autant ce qui est attendu que les écueils que les candidats devraient éviter. L'exposé s'articule en deux parties de durées égales. Dans la première, il s'agit à la fois de présenter une vision d'ensemble du sujet et de développer un point particulier à un niveau post-baccalauréat. L'intitulé des sujets est très court si bien que chaque sujet est généralement très vaste. Il est donc vain de vouloir à tout prix présenter le maximum d'aspects possibles, la vision d'ensemble se réduisant alors à une longue liste de mots clés non hiérarchisés et dont la signification n'est même pas toujours bien connue. Les candidats sont encouragés à identifier des aspects qui leur paraissent importants, à expliquer ce choix et enfin à dégager quelques idées fortes. Soulignons que l'utilisation d'une carte mentale n'est nullement une obligation et qu'elle ne doit pas être un moyen d'éviter de structurer un exposé. Après avoir présenté cette vision d'ensemble, il est souhaitable que le candidat signale au jury le moment où il commence à détailler le point particulier choisi. On a pu regretter que ce développement se perde parfois parmi les différents aspects du sujet.

Dans l'esprit de beaucoup de candidats, ce développement d'un point particulier à un niveau post-baccalauréat consiste souvent à mener un calcul techniquement compliqué, sans que la structure du développement n'apparaisse. Ils en oublient le plus souvent de préciser en quoi le point choisi présente de l'intérêt dans le cadre de l'exposé. De même, à la fin du calcul, manifestement soulagés, ils oublient de discuter la portée physique du résultat obtenu. Rappelons donc que l'enseignement post-baccalauréat ne signifie pas uniquement savoir effectuer un calcul de plusieurs lignes qui solliciterait les outils mathématiques usuels dans l'enseignement supérieur. Ce qui est attendu par le jury, c'est aussi et surtout la capacité du candidat à s'appuyer sur des phénomènes bien choisis pour donner du sens aux écrits et de savoir expliquer avec un vocabulaire adapté la teneur d'un développement clairement structuré. La maîtrise des calculs est certes importante mais elle est déjà mobilisée pour une bonne part lors de l'épreuve écrite. L'épreuve orale doit permettre au candidat de montrer comment il s'est approprié la discipline au plus haut niveau et comment il fabrique les objets de connaissance à destination de ses élèves.

Dans son ensemble, cette première partie, dont le jury reconnaît la difficulté, a été parfois décevante à cause du manque de recul et de maîtrise des candidats. En revanche, la seconde partie de l'exposé a permis à beaucoup de candidats de mettre en valeur leurs compétences pédagogiques et didactiques. Le jury a pu ainsi apprécier indirectement la motivation et l'engagement des candidats dans leurs activités professionnelles. Il paraît cependant utile de préciser certains points. Le but essentiel de cette partie est de juger des capacités du candidat à porter un regard lucide sur l'enseignement d'un concept dans l'enseignement secondaire sous différents aspects : évolution de l'enseignement de ce concept entre le collège et le lycée, élaboration d'une séquence d'enseignement, etc. Pour éviter un discours trop superficiel, il est préférable que le candidat se limite à un de ces aspects et l'expose en détail : en 25 minutes, il paraît illusoire que de vouloir à la fois passer en revue l'ensemble du programme du secondaire, présenter un plan de cours, une liste d'exercices...

Beaucoup de candidats ont choisi de présenter une séquence d'enseignement. Ils doivent alors



montrer de manière très concrète comment introduire les concepts les plus délicats aux élèves, anticiper les points de blocage, les moyens d'y remédier. Se contenter de traiter un exercice ou une activité trouvés dans un manuel est insuffisant : il faut justifier le choix et la pertinence de l'exercice et éventuellement améliorer ou modifier la rédaction de l'exercice suivant le but pédagogique visé. De la même façon, dans le cas d'une activité documentaire, le jury souhaite une description contextualisée de ce que le candidat attend du texte proposé aux élèves plutôt qu'une projection de la photocopie d'une page d'un manuel.

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

L'épreuve de montage n'a pas été modifiée par rapport aux sessions précédentes. Elle consiste à présenter au jury des expériences démonstratives et quantitatives destinées à illustrer un sujet donné. Le montage vise principalement à mettre en valeur les qualités d'expérimentateur du candidat, ainsi que sa capacité à réaliser des mesures et à en dégager des résultats quantitatifs exploitables. Si les expériences quantitatives doivent donc être privilégiées, quelques expériences qualitatives permettant de mettre en évidence les phénomènes étudiés et de préciser les ordres de grandeurs sont les bienvenues. Elles ne peuvent toutefois constituer l'essentiel du montage. La présentation dure 50 minutes et il est fréquent que le jury intervienne pour demander des éclaircissements sur une expérience avant la fin de la présentation. Dans ce cas, le temps de discussion final est réduit pour que le temps de parole du candidat reste de 50 minutes.

Même si le montage n'est pas une leçon, il est utile de faire émerger une certaine logique dans la succession des expériences, et surtout, pour chaque expérience, il est nécessaire d'expliquer le but recherché (que vise à montrer ou à établir l'expérience proposée ?) ainsi que les paramètres ajustables (que se passe-t-il si ?). Il est également préférable que la présentation garde un certain caractère pédagogique : il vaut mieux montrer l'effet qualitatif d'un paramètre avant de remplir un tableau de mesure ou encore essayer de garder un certain suspense en n'exposant pas le résultat avant de faire la manipulation.

Le jury apprécie les prestations qui allient la qualité des expériences présentées à une exploitation pertinente et soignée. L'originalité – quand elle est maîtrisée – est un bonus certain, cependant le jury recommande aux candidats de présenter des manipulations qu'ils comprennent et surtout en nombre raisonnable. Multiplier les expériences est parfois inutile et même nuisible car d'une part les candidats n'ont pas le temps de les présenter, de les réaliser (ce qui reste essentiel et attendu par le jury) et d'en analyser les résultats durant l'exposé, et d'autre part ils n'ont pas le temps d'y réfléchir suffisamment pendant la préparation ce qui conduit à un manque de regard critique sur le dispositif et sur protocole suivi, ainsi que sur l'analyse des sources d'erreurs.

Beaucoup de candidats veillent à accompagner les mesures quantitatives d'incertitudes. On ne peut que s'en féliciter. Cependant, cette évaluation des incertitudes se résume souvent à deux étapes : déterminer les précisions des appareils utilisés puis injecter ces imprécisions dans des « formules » plus ou moins compliquées, dont le sérieux et la pertinence semblent attestés par l'usage de racines carrées de 12. Il apparaît nécessaire de rappeler que, lorsque l'on effectue une mesure, sa précision dépend à la fois de celle de l'appareil et de l'appréciation de

l'expérimentateur. Pour prendre un exemple particulièrement prisé des candidats, la détermination de la fréquence d'un mode de résonance de la corde de Melde dépend moins de la précision du fréquencemètre que de la difficulté à apprécier si l'on se trouve bien au maximum d'amplitude. De même, la fréquence d'échantillonnage d'un oscilloscope est rarement le paramètre limitant lorsque l'on mesure le retard d'une salve ultrasonore. Beaucoup de candidats ont aussi du mal à envisager que l'écart entre la valeur attendue et la valeur mesurée puisse ne pas être de nature aléatoire, et que le protocole choisi puisse entraîner un biais systématique. Par exemple, lorsque l'on mesure la période d'un pendule et que l'on constate un écart avec la valeur attendue donnée par le modèle du pendule simple, effectuer toute une série de mesures pour déterminer un écart type risque d'être inutile si le pendule n'a pas les caractéristiques d'un pendule simple.

Déterminer une incertitude est donc d'abord une affaire de bon sens, et le jury attend surtout que le candidat analyse son expérience pour en déterminer les faiblesses éventuelles, identifier les différences entre le dispositif et la modélisation utilisée, les paramètres qui sont déterminés avec le moins de précision... Enfin, calculer systématiquement des incertitudes sur toutes les expériences présentées est fastidieux et prend du temps. Il importe donc de faire des choix pertinents.

# Rapport sur les épreuves orales de chimie

## L'exposé

Pour cette session 2013, l'exposé remplaçait la traditionnelle « leçon ». Les thèmes retenus, communs avec l'épreuve de montage, proviennent de la liste publiée le 23 mars 2012 et disponible sur le site du Ministère [www.education.gouv.fr](http://www.education.gouv.fr). Par ailleurs, des indications permettant de préparer cette nouvelle forme d'épreuve accompagnaient cette liste dans le rapport du jury de la session 2012. L'objectif du changement était de donner aux enseignants en poste, la possibilité d'utiliser au mieux des compétences professionnelles fortifiées par une pratique éprouvée et de les mettre en valeur dans le cadre de l'épreuve.

Les candidats sont responsables des documents ou des expériences qu'ils choisissent de présenter. Tous les textes, séquences pédagogiques, expériences proposés dans les ouvrages scolaires ou autres ne sont pas d'égale qualité, ni nécessairement adaptés à toutes les situations pédagogiques. Les choix des candidats sont pour le jury l'expression de leur jugement scientifique et pédagogique.

Outre le tableau « noir » et les craies, la salle comporte plusieurs autres outils de communication : vidéoprojecteur, tableau numérique interactif, caméra numérique (flexcam), et éventuellement rétroprojecteur. Le jury a constaté avec satisfaction que la majorité des candidats a su utiliser ces outils avec aisance. Rappelons qu'un bon enseignant doit être capable d'user avec discernement des différents outils : il est souhaitable durant l'exposé de montrer sa capacité à écrire (proprement) au tableau, à utiliser l'outil informatique et cela sans exclusive. Quel que soit l'outil utilisé, la clarté est la première des qualités de l'enseignant et des transparents illisibles parce qu'écrits à la main trop rapidement ou des documents informatiques en « Times corps 10 » projetés sur un écran constituent plus un obstacle qu'une aide à la compréhension et desservent les candidats.

Les candidats étaient avertis en début d'épreuve que l'exposé devait comporter deux parties d'égale importance :

- une première partie de présentation générale du thème de l'exposé assortie d'une présentation d'un point particulier de ce thème relevant du niveau post-baccalauréat ;
- une deuxième partie sur une question pédagogique s'inscrivant dans le cadre du thème de l'exposé.

**La première partie de l'exposé** a donné lieu à un traitement très contrasté par les candidats : de l'absence quasi-complète de présentation générale du thème ou alors en un temps trop bref (quelques minutes) à l'interminable lecture d'une carte mentale illisible (parce qu'exhaustive et pas toujours suffisamment concise) devant le jury. Un cas fréquemment rencontré a été une forme de « recyclage » de l'ancienne épreuve de leçon compactée d'un facteur deux dans le temps, ce qui rendait cette première partie particulièrement peu adaptée aux attendus et difficile à suivre.

La première partie de l'exposé suppose de la part des candidats d'être attentif à deux points : a) l'*effort de synthèse* sur le thème ; tout n'a en effet pas la même importance, quel que soit le sujet abordé, mais il est essentiel de chercher à dégager quelques messages précis, limités et clairs et de les exposer de façon cohérente. Cet effort de synthèse est incompatible avec la seule énumération de toutes les occurrences du thème.

b) la *nécessité d'un choix* dans le point particulier à traiter au niveau post-baccalauréat. Ici encore, les meilleurs exposés ont été réalisés par des candidats qui ont limité leur ambition et maîtrisaient correctement les concepts développés. La partie développée au niveau post bac n'a été parfois qu'une suite de calculs non commentée, non problématisée et dans ce cas relativement inintéressante ; que la modélisation soit davantage développée au niveau post bac que dans le secondaire est indéniable, pour autant toute modélisation doit s'inscrire dans toute ou partie d'une démarche scientifique et pouvoir trouver son intérêt dans sa confrontation avec le réel. Le jury attend du candidat qu'il fasse preuve de réflexion également à ce niveau, ce qui nécessite un certain recul sur les notions présentées.

Un lien entre cet exposé et la partie pédagogique est bienvenu mais ne constitue nullement une obligation.

La carte mentale est un outil utile mais son utilisation suppose une réflexion préalable sur le thème exposé.

Ajoutons que la marque du bon enseignant est sa capacité à explorer au-delà de frontières disciplinaires consacrées par l'usage. Il ne manque pas en chimie d'interfaces avec la biologie ou la géologie par exemple pour donner aux candidats l'occasion de manifester l'importance de la discipline dans d'autres domaines scientifiques, mais également dans les différents secteurs d'activité économique. Des exemples peuvent être pris dans ces domaines et servir aussi bien d'accroche en début d'exposé qu'à différents moments de la première ou de la deuxième partie et rendre ainsi concrets des exposés parfois un peu trop formels. Des expériences peuvent aussi être réalisées, si le sujet s'y prête, sans transformer l'exposé en montage, bien évidemment.

**La deuxième partie de l'exposé** constituait la principale nouveauté de l'épreuve mais n'a pas toujours été utilisée à bon escient par les candidats pour manifester leurs qualités pédagogiques. Quelques conseils, issus de l'observation des écueils les plus fréquemment rencontrés, devraient permettre aux candidats de se préparer plus efficacement à cette épreuve pour la prochaine session du concours.

D'une part, il est nécessaire de bien qualifier l'activité pédagogique présentée : par exemple ne pas qualifier d'expérimentale une activité au cours de laquelle les élèves manipulent très peu mais réfléchissent beaucoup à la « mise en équation ». L'exposé des tâches effectuées durant la séance est le point qui a été le mieux traité ; pour autant, l'objectif des séquences ou séances n'a pas toujours été précisé, or il devrait être systématiquement fourni afin que la pertinence des activités choisies puisse être évaluée. Pratiquement tous les candidats ont su décrire le contenu des séquences, même si certains ont été trop ambitieux, présentant par exemple trois séances de travaux pratiques au détriment de l'analyse qu'ils auraient dû faire de chacune d'elles.

D'autre part, la deuxième partie de l'épreuve ne se réduit pas à la présentation des objectifs, des contenus et des aides éventuelles (documents, matériels) que l'enseignant peut apporter, des interactions élèves/professeur et de leur dynamique durant la séance. Un travail d'analyse est attendu du candidat, analyse qui peut par exemple le conduire à une explicitation sur le travail ou l'évaluation sur les compétences des élèves au travers des activités évoquées. Les candidats, qui sont professeurs, doivent faire intervenir leur vécu, leur expérience et montrer comment ils gèrent les difficultés des élèves sur des points bien précis et quelles sont les remédiations qu'ils peuvent alors leur apporter.

Le jury déplore tout particulièrement l'utilisation, sans valeur pédagogique ajoutée, d'extraits de manuel, le manque de recul et d'esprit critique vis-à-vis d'ouvrages scolaires qui ne constituent nullement des références officielles. Le jury apprécie les productions personnelles

des candidats comme support à cette seconde partie. Un candidat qui ne sait pas situer la séance présentée dans le programme, énoncer les connaissances et les prérequis, préciser les compétences, domaines et items du socle commun au collège ou les compétences de la démarche expérimentale au lycée, est nécessairement pénalisé par rapport à d'autres candidats qui ont, lors de leur préparation, réalisé ce travail d'analyse qui leur permet ensuite au cours de l'exposé d'argumenter leurs choix pédagogiques.

Le vocabulaire de la didactique peut rester limité ; le candidat doit montrer que ses analyses et ses choix proviennent d'une véritable habitude dans ses pratiques en classe. Enfin, une conclusion sur les compétences mobilisées et évaluées, les prolongements éventuels (exercice, activité documentaire, séance expérimentale) permet de revenir pour terminer sur le thème général de l'exposé.

Ajoutons pour finir que les qualités pédagogiques des candidats n'ont pas été masquées par la nouveauté de l'épreuve et la difficulté liée à cette nouveauté. Le jury n'a pas hésité à valoriser des candidats qui ont montré une bonne maîtrise des savoirs scientifiques et une bonne mise à oeuvre de leurs compétences professionnelles.

### **L'épreuve de montage**

Lors de cette épreuve, le candidat a le choix entre deux sujets figurant dans la liste publiée au Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale. Le jury regrette que très peu de candidats aient choisi un montage de chimie organique, alors que cette partie de la chimie tient une place importante dans le programme du secondaire.

La cohérence des manipulations retenues doit être mise en évidence grâce à un fil conducteur : le montage est l'occasion de présenter différents aspects d'une question par le biais d'expériences et de leurs exploitations. Ainsi, le jury apprécie les montages présentant des expériences de chimie minérale et organique, ce que permettent la majorité des thèmes proposés ; dans les montages tels que « oxydo-réduction » ou « acidité » par exemple, le jury aurait souhaité voir aussi des exemples pris en chimie organique.

Durant cette session, le jury a regretté d'assister à de nombreux montages dans lesquels les expériences étaient présentées sans relation clairement explicitée entre elles. Dans la même ligne, il est utile d'avoir réfléchi à l'avance à la conclusion générale du montage, trop souvent improvisée lorsque le jury indique qu'il est temps de conclure. L'épreuve dure 70 minutes et le jury laisse le candidat commencer son exposé pendant 5 à 10 minutes sans l'interrompre ; les questions sont ensuite posées au fil de la séance. Les candidats doivent savoir que les questions ne sont pas destinées à les déstabiliser, mais à leur faire préciser un point, ou à vérifier que les techniques utilisées sont maîtrisées.

Le temps de préparation du montage est de quatre heures. Dans la salle où le candidat prépare ses expériences, une équipe technique est présente ; son rôle est d'apporter le matériel, les produits et les solutions demandés, de réaliser une partie d'une expérience, sous la responsabilité du candidat en suivant ses préconisations, et enfin d'acquérir certains spectres (absorption infra-rouge par exemple). Le jury a constaté que certains candidats se contentaient de présenter des manipulations bien préparées par le personnel technique et oubliaient qu'ils devaient manipuler devant le jury et montrer leur talent à utiliser le matériel.

Tout au long de la préparation et de la présentation, le candidat doit respecter les règles de sécurité en vigueur dans un laboratoire de chimie : port d'une blouse et de lunettes de sécurité systématiquement, de gants si nécessaire, manipulation sous hotte aspirante en fonctionnement lors de l'utilisation de produits toxiques volatils. Plusieurs candidats ont

indiqué au jury, lorsque la question leur a été posée, que le port des lunettes ou des gants dans les laboratoires dépendait de la dangerosité des produits manipulés alors que le port des lunettes est obligatoire dans les laboratoires de chimie, pour toute réaction chimique, même si les produits ou solutions manipulés ne présentent aucun danger immédiat pour le candidat.

Le candidat doit s'interroger sur la pertinence des différentes opérations indiquées dans le protocole qu'il trouve en général dans des ouvrages ; il devra être capable de justifier les différentes étapes réalisées. Le jury s'assure également, par ses questions, que les instruments utilisés (conductimètres, pH-mètres, banc Kofler, spectrophotomètres...) ne constituent pas des « *boîtes noires* » pour les candidats mais que leur principe de fonctionnement est connu et compris.

Durant la phase préparatoire, le candidat doit lancer et faire avancer autant que possible les manipulations afin de pouvoir effectuer l'exploitation et l'analyse de ses résultats devant le jury : relevé d'une température de fusion, exploitation des spectres, calcul d'un rendement, détermination d'une concentration ou encore détermination d'une grandeur caractéristique telle que constante d'équilibre, produit de solubilité, constante de dissociation d'un complexe, potentiel d'électrode... Pour éviter une situation déstabilisante devant le jury, toute manipulation doit être testée durant la préparation. Dans le cas d'une expérience requérant beaucoup de temps, le candidat peut faire le choix de ne présenter devant le jury que la fin de la manipulation.

Certains résultats numériques gagnent à être accompagnés d'un calcul d'incertitudes. Le jury conseille aux candidats de bien maîtriser l'évaluation de type A ou de type B des incertitudes. Le calcul de l'incertitude type et de l'incertitude élargie doit se faire de façon simple, en y apportant une plus-value pédagogique. Rappelons que le logiciel « GUM » permet de donner simplement le résultat des calculs pour des expériences faisant intervenir des incertitudes types composées.

Les manipulations plus courtes seront refaites, au moins en partie, devant le jury. Si les candidats se doivent de présenter suffisamment de gestes expérimentaux pour montrer plusieurs facettes de leur savoir-faire expérimental, il n'est pas nécessaire de montrer plusieurs fois les mêmes capacités ; l'épreuve de montage ne doit pas être l'occasion de faire quatre titrages acide fort/base forte (légèrement) différents en 70 minutes de présentation. Le jury attend que les candidats manifestent une maîtrise raisonnable des techniques et instruments fréquemment rencontrés dans les lycées et collèges.

Avant l'arrivée du jury, le plan du montage doit être écrit au tableau ou projeté sur écran, ainsi que les équations des réactions chimiques présentées et les éventuelles relations utilisées pour l'analyse des résultats, le candidat s'y référera durant la présentation. L'utilisation du vidéoprojecteur qui facilite la lecture des résultats est maintenant généralisée et favorise la discussion avec le jury. Le jury constate aussi que les candidats maîtrisent correctement les principaux outils informatiques d'acquisition et de traitement des données (Regressi par exemple).

Les questions du jury portent sur des justifications de gestes expérimentaux, sur les interprétations de manipulations, sur les incertitudes de mesure, mais aussi sur les situations d'enseignement au lycée ou au collège en lien avec le sujet du montage. Il n'est pas nécessaire de présenter des expériences originales, même si cet aspect du montage est apprécié du jury ; cependant les candidats doivent impérativement :

- a) limiter la présentation d'expériences trop élémentaires (une seule expérience

- qualitative pour mettre en évidence un phénomène peut suffire en début de montage) ;
- b) présenter des expériences donnant lieu à des mesures (ce qui suppose d'avoir réfléchi à ce qui est mesuré, avec quel instrument et quelle précision) ;
  - c) être capable d'interpréter les phénomènes observés, à un niveau post-baccalauréat, surtout si ceux-ci sont en apparence très courants (piles, chromatographie, estérification...).

Rappelons enfin que les mécanismes réactionnels des réactions présentées doivent pouvoir être écrits avec aisance et rigueur par le candidat. C'est une des occasions permettant de rattacher les manipulations effectuées au thème du montage.

### **Conclusion**

Le jury a eu le plaisir d'assister à de remarquables exposés et des montages qui manifestaient une excellente maîtrise expérimentale, une bonne réflexion pédagogique et grande rigueur dans la communication orale. Les qualités que sont la curiosité intellectuelle, le dynamisme, la conviction, l'écoute, durant un exposé ou un montage sont fortement appréciées par le jury et constituent une part non négligeable de la note des candidats.

# Le programme de la session 2013 est reconduit en 2014



## Concours interne de l'agrégation du second degré

### Concours interne d'accès à l'échelle de rémunération des professeurs agrégés dans les établissements d'enseignement privés sous contrat du second degré (CAER)

#### Section physique - chimie

#### Programme de la session 2013

### I Épreuves écrites d'admissibilité

Ces épreuves sont envisagées au niveau le plus élevé et au sens le plus large du programme défini ci-dessous.

#### **1. Composition sur la physique et le traitement automatisé de l'information (5 heures)**

Elle porte sur les enseignements de physique des programmes de physique-chimie appliqués à la rentrée scolaire de l'année d'inscription au concours :

##### **1. des classes :**

- de collège ;
- de seconde générale et technologique ;
- de première S ;
- de terminale S, y compris l'enseignement de spécialité ;  
de première et de terminale Sciences et Technologies de l'Industrie et du Développement Durable (STI2D) ;
- de première et de terminale Sciences et Technologies de Laboratoire (STL), spécialité Sciences Physiques et Chimiques en Laboratoire (SPCL) ;
- de première et de terminale Sciences et Technologies de la Santé et du Social (ST2S).

**2. des classes préparatoires scientifiques aux grandes écoles :** PCSI, MPSI, MP, PC, PSI, BCPST 1ère et 2ème année.

#### **2. Composition sur la chimie et le traitement automatisé de l'information (5 heures)**

Elle porte sur les enseignements de chimie des programmes de physique-chimie appliqués à la rentrée scolaire de l'année d'inscription au concours :

##### **1. des classes :**

- de collège ;
- de seconde générale et technologique ;
- de première S ;
- de terminale S, y compris l'enseignement de spécialité ;  
de première et de terminale Sciences et Technologies de l'Industrie et du Développement Durable (STI2D) ;
- de première et de terminale Sciences et Technologies de Laboratoire (STL), spécialité Sciences Physiques et Chimiques en Laboratoire (SPCL) ;
- de première et de terminale Sciences et Technologies de la Santé et du Social (ST2S).

**2. des classes préparatoires scientifiques aux grandes écoles :** PCSI, MPSI, MP, PC, PSI, BCPST 1ère et 2ème année.



## II Épreuves orales d'admission

Chacune des deux épreuves orales d'admission, l'une d'exposé et l'autre de montage, a lieu après quatre heures de préparation surveillée.

Le tirage au sort conduit le candidat à traiter :

- soit un exposé de physique et un montage de chimie
- soit un exposé de chimie et un montage de physique.

### **1. Exposé consistant en une présentation d'un concept et son exploitation pédagogique (1h20)**

Dans le cas d'un exposé de physique, le programme est celui de la première épreuve écrite d'admissibilité (composition sur la physique et le traitement automatisé de l'information). Dans le cas d'un exposé de chimie, le programme est celui de la seconde épreuve écrite d'admissibilité (composition sur la chimie et le traitement automatisé de l'information).

**Structure de l'épreuve** : l'épreuve est constituée d'un exposé par le candidat, d'une durée maximum de 50 minutes, suivi d'un entretien avec le jury, d'une durée maximum de 30 minutes. L'exposé du candidat comporte deux parties successives, d'importance équivalente, qui lui permettent de mettre en valeur ses compétences professionnelles :

- une partie relative au concept scientifique, développée au moins en partie à un niveau post-baccalauréat ;
- une partie relative à un aspect pédagogique de l'enseignement, au collège ou au lycée, de notions relatives à ce concept.

#### **Partie relative au concept scientifique**

Dans cette partie, le candidat met en valeur ses compétences disciplinaires en présentant à la fois sa vision d'ensemble du sujet et en développant un point particulier, de son choix, à un niveau post-baccalauréat.

Cette présentation synthétique peut prendre la forme d'un plan séquencé, d'un schéma conceptuel, d'une carte mentale, etc. permettant de situer la thématique scientifique et d'en aborder divers aspects, du fondamental aux applications. Le candidat doit être en mesure d'apporter des éclaircissements sur l'ensemble des points abordés dans son exposé.

#### **Partie relative à un aspect pédagogique de l'enseignement du concept**

Dans cette partie, le candidat met en valeur ses compétences pédagogiques et didactiques. Il peut par exemple choisir :

- de proposer et d'analyser une séquence d'enseignement ;
- d'étudier l'évolution de la présentation du concept du collège au lycée ;
- d'aborder la problématique de l'évaluation ;
- etc.

L'ordre de présentation des ces deux parties est laissé au choix du candidat.

L'illustration expérimentale est naturellement possible dans chacune des parties.

**L'entretien** porte sur les deux parties ; il vise à la fois à compléter l'évaluation des qualités pédagogiques et didactiques, de la maîtrise des connaissances scientifiques et de la culture scientifique et technologique du candidat.

### **2. Montage et traitement automatisé de l'information (1h20)**

Le niveau est celui des classes post-baccalauréat des lycées. Deux sujets sont proposés au choix des candidats. Au cours de l'épreuve, les candidats présentent, réalisent et exploitent qualitativement et quantitativement quelques expériences qui illustrent le sujet retenu.

#### **Liste des sujets des exposés et des montages de physique et de chimie tirés au sort lors des épreuves orales**

##### **a) Physique**

Aux sujets communs aux épreuves d'exposé et de montage s'ajoutent des sujets spécifiques à chacune de ces épreuves.

##### Sujets communs aux épreuves d'exposé et de montage

1. Dynamique newtonienne
2. Ondes acoustiques
3. Spectrométrie optique, couleur
4. Vision et image

5. Propagation libre et guidée
6. Interférences
7. Diffraction
8. Oscillateurs
9. Champs magnétiques
10. Capteurs
11. Transferts thermiques
12. États de la matière
13. Grandeurs électriques
14. Fluides
15. Résonance
16. Polarisation de la lumière
17. Induction
18. Temps – fréquence
19. Transferts quantiques d'énergie
20. Frottements
21. Transmission de l'information
22. Ondes stationnaires

#### Sujets d'exposé spécifiques

- 23e. Gravitation
- 24e. Cohésion du noyau, stabilité, réactions nucléaires
- 25e. Mouvements képlériens
- 26e. Énergie interne
- 27e. Rayonnement d'équilibre et corps noir
- 28e. Dualité onde – corpuscule
- 29e. Référentiels géocentrique et terrestre

#### Sujets de montage spécifiques

- 23m. Filtrage et analyse spectrale
- 24m. Amplification
- 25m. Oscillations spontanées
- 26m. Couplages
- 27m. Régimes transitoires
- 28m. Conversion de puissance
- 29m. Signal analogique et signal numérique

#### **b) Chimie**

Les sujets sont communs aux épreuves d'exposé et de montage.

1. Séparation
2. Liaisons
3. Caractérisations
4. Stéréoisomérisation
5. Solvants
6. Solutions
7. Solubilité
8. Conductivité
9. Mélanges binaires
10. Proportions et stœchiométrie
11. Équilibre chimique
12. Évolution d'un système chimique
13. Conversion d'énergie lors des transformations chimiques
14. Oxydo-réduction
15. Dispositifs électrochimiques
16. Potentiels d'électrode
17. Périodicité des propriétés
18. Solides
19. Métaux
20. Acidité
21. Complexes
22. Polymères

23. Cinétique chimique
24. Catalyse
25. Mécanismes réactionnels
26. Electrophilie et nucléophilie
27. Couleur
28. Modification de groupes fonctionnels
29. Modification de chaîne carbonée