 <p>ministère Éducation nationale</p>	<p>Secrétariat Général Direction générale des ressources humaines Sous-direction du recrutement</p>	<p>MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE</p>
--	---	---

## **Concours du second degré – Rapport de jury**

**Session 2009**

**AGREGATION**

**SCIENCES PHYSIQUES**

**Option Physique Chimie**

**Concours interne**

**Rapport de jury présenté par Gilbert PIETRYK  
Inspecteur général de l'éducation nationale  
Président de jury**

**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 2009

0. Sommaire
1. Composition du jury
2. Avant-propos du président
3. Réglementation du concours et informations statistiques
  - Réglementation
  - Informations statistiques
    - Epreuves écrites
    - Epreuves orales
    - Répartition des candidats par académie
    - Répartition des candidats par sexe
    - Répartition des candidats par âge
4. Enoncé de la composition de physique
5. Solution de la composition de physique
6. Rapport relatif à la composition de physique
7. Enoncé de la composition de chimie
8. Solution de la composition de chimie
9. Rapport relatif à la composition de chimie
10. Déroulement des épreuves orales
11. Enoncé des sujets des épreuves orales de la session 2009
12. Rapport sur les épreuves orales de physique
13. Rapport sur les épreuves orales de chimie
14. Enoncé des sujets des épreuves orales de la session 2010

# 1. COMPOSITION DU JURY

PIETRYK Gilbert	Inspecteur Général de l'Éducation Nationale, Président
BILLY Nicolas	Inspecteur Général de l'Éducation Nationale, Vice Président
VIGNERON Michel	IA-IPR, académie de Versailles, Vice Président, Secrétaire Général
BERROIR Jean-Marc	Professeur des Universités, Paris
CAMÉLIO Béatrice	Professeure de Chaire Supérieure, Nantes
DAVID Anne	Professeure de Chaire Supérieure, Paris
EDARD Florence	Professeure de Chaire Supérieure, Poitiers
FRERE Pierre	Professeur des Universités, Nantes
JACQUIER Philippe	Professeur des Universités, Paris
LAFOND Alain	Professeur des Universités, Nantes
KIOUS Malek	Professeur agrégé, Paris
LAJOIE Caroline	Professeure de Chaire Supérieure, Nice
LEDOUX Odile	IA-IPR, académie de Lille
MARCHOU Patrice	IA-IPR, académie de Toulouse
OBERT Dominique	Professeur de Chaire Supérieure, Besançon
PLAIDY Olivier	Professeur agrégé, Bordeaux
RÉHEL Christophe	IA-IPR, académie de Nantes
SZYMCZAK Anne	Professeure agrégée, Valenciennes
TERKI Fériat	Maître de Conférences, Montpellier

## 2. AVANT-PROPOS

*Le rapport du jury des concours de l'agrégation interne et du CAERPA de sciences physiques, option physique et chimie, de la session 2009 est mis en ligne sur le serveur du Ministère : <http://www.education.gouv.fr/siac/siac2> ainsi que sur le site <http://www.agregation-interne-physique-chimie.org>. Il est donc rapidement accessible par tous ceux, candidats et formateurs, concernés par ces concours de promotion interne.*

La session 2009 est toujours marquée par une forte sélectivité des deux concours, le ratio « nombre de candidats présents à au moins une épreuve » sur « nombre de postes » étant respectivement de 20,8 et 18,4 ; au total, ce sont 1085 candidats qui ont composé à l'écrit sur l'ensemble des deux concours. Ce résultat, qui confirme les observations faites durant les sessions antérieures, 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.

Le nombre des postes offerts est inchangé par rapport à l'an dernier pour le concours public (45 postes) et en légère augmentation pour le CAERPA (8 postes au lieu de 7). Ce sont au total 108 candidats qui ont été déclarés admissibles (94 pour le public et 14 pour le CAERPA). La barre d'admissibilité, identique pour les deux concours, est cette année de 25,7 / 40 (donc quasiment identique à celle de l'an dernier où elle était de 25,6). La barre d'admission est de 50,3 / 80 (très proche de celle de l'an dernier, égale à 50,0). Le bon niveau de l'ensemble des candidats a permis au jury de pourvoir tous les postes dans le public comme dans le privé ; à noter que c'est la première fois dans le privé que tous les postes sont pourvus depuis la session 2000.

**Le rajeunissement des candidats** semble stabilisé puisque la moyenne d'âge globale des candidats admis est voisine de 35 ans (identique à celle de l'an dernier). Il demeure cependant que seulement 8% des admis ont plus de 40 ans. Ces résultats ne s'expliquent que pour partie par l'évolution démographique du corps des professeurs de sciences physiques ; ils traduisent le fait que de nombreux candidats, qui ont fait le choix d'une 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.

Afin de prendre davantage en compte les **compétences professionnelles** acquises par les candidats au fil des années d'exercice de leur métier d'enseignant, le jury a introduit, de manière explicite et ce depuis plusieurs années, une composante pédagogique dans les épreuves écrites. L'attention des candidats est attirée par le fait que cette composante pédagogique représente une fraction significative de la note et qu'il convient de ne pas la négliger. A travers cette disposition, le jury montre clairement son intention d'évaluer tant à l'écrit qu'à l'oral les compétences acquises par la pratique réflexive du métier. Car si le concours repose sur la maîtrise d'un socle solide de connaissances garantissant la capacité à assurer un enseignement au niveau du premier cycle post-baccalauréat - et à l'évidence, ces connaissances doivent être testées lors des épreuves -, d'autres valeurs, telles l'expérience professionnelle acquise, les compétences expérimentales (capacités expérimentales, protocoles, ...) se doivent aussi d'être prises en compte dans le cadre d'un concours interne. Cette analyse est confortée par les **compétences attendues des professeurs** stagiaires en formation IUFM, et déclinées dans le cahier des charges de la formation des maîtres en vigueur à la rentrée scolaire 2007. Ces

compétences constituent les nouvelles références de l'examen de qualification professionnelle des professeurs stagiaires et il paraît tout à fait légitime que ces compétences attendues des nouveaux professeurs recrutés le soient également de la part des professeurs en exercice. Les candidats ne doivent donc pas être surpris si à l'occasion des épreuves écrites ou orales des questions portent sur la conception et la mise en œuvre de l'enseignement, l'organisation du travail de la classe, la prise en compte de la diversité des élèves, l'évaluation des acquis des élèves, la maîtrise des TIC...

Force est aussi de constater que le déséquilibre des genres est toujours aussi présent et les répartitions entre hommes et femmes au sein des admis (74% d'hommes et 26% de femmes sur l'ensemble des deux concours), ne reflètent absolument pas les proportions constatées dans la profession.

Comme à l'accoutumée, **le rapport du jury est avant tout un outil d'information, de travail et de conseil** pour les futurs candidats ainsi que pour les centres de préparation. Les épreuves écrites font ainsi l'objet d'une correction détaillée, certaines questions faisant l'objet de recommandations ou commentaires plus précis. De même, les attendus du jury concernant les épreuves orales sont détaillés de manière détaillée pour chacun des types d'épreuves, en physique et en chimie, dans les rubriques 12 et 13. Mais il convient dès à présent de reformuler les remarques générales suivantes :

- **En leçon**, il est prioritaire de définir avant tout l'objectif à atteindre à travers le thème étudié. Ce n'est qu'à ce prix que l'on peut identifier le fil conducteur de la construction de la leçon et faire passer avec clarté et cohérence un message fort. Certes la construction scientifique de la leçon constitue la colonne vertébrale de l'exposé, mais de réelles compétences pédagogiques sont attendues : le candidat se doit, en véritable « acteur », de convaincre le jury de l'intérêt des explications qu'il donne. La « mise en scène » de l'exposé n'est pas à négliger : chaque fois que cela est possible, les exposés doivent être illustrés par des expériences bien choisies et bien réussies ; celles-ci font partie intégrante de l'argumentation scientifique et sont toujours très appréciées du jury. De même, la présentation des leçons doit intégrer l'utilisation des moyens de projection modernes qui sont devenus aujourd'hui des outils de communication incontournables pour tout enseignant. A cet égard, vidéo projecteurs, flexcams et webcams sont mis à la disposition des candidats. Des **tableaux numériques interactifs** ont également été mis à la disposition des candidats à la session 2009 ; cette initiative sera reconduite en 2010.
- **En montage**, un choix cohérent et personnel des expériences réalisées est attendu. Les thématiques des montages sont très larges, permettant à chacun de proposer un choix d'expériences variées. Le jury attire toutefois l'attention des candidats sur le fait qu'ils doivent éviter de se disperser. Il leur conseille de ne proposer qu'un nombre limité d'expériences judicieusement choisies, illustrant de manière convaincante le sujet proposé, correspondant à une progression pédagogique raisonnée et autorisant de plus des mesures qui doivent être précises, exploitées et interprétées. Il rappelle enfin que l'outil informatique est désormais intégré dans la pratique pédagogique quotidienne ; les logiciels standard sont disponibles lors des épreuves orales. Tout comme pour les leçons, l'utilisation du vidéo projecteur est vivement recommandée, tant pour visualiser les résultats d'une expérience portée sur un tableau ou sur un graphe, que pour projeter en grand écran, à l'aide d'une flexcam, une expérience réalisée sur la table de travail du candidat.

Par ailleurs, 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 après les épreuves orales, et que d'autre part, ne pas briller à l'une des épreuves orales, n'empêche pas d'être admis.

Comme l'an dernier, les **documents photocopiés** élaborés par les centres de préparation et présentant pour chaque titre de montage un choix d'expériences adaptées, n'ont pas été autorisés (cf. rapport du jury de la session 2008).

Depuis deux ans, conformément aux informations communiquées dans le rapport de la session 2007, **les leçons de physique et de chimie** ne font plus référence individuellement à un programme précis de classe ou à niveau spécifique. Prises dans leur ensemble, ces leçons sont à traiter au niveau des classes préparatoires scientifiques ou :

- aux niveaux des deux premières années (niveaux L1 et L2) de la licence de physique ou de la licence de physique chimie pour les leçons de physique
- aux niveaux des deux premières années (niveaux L1 et L2) de la licence de chimie ou de la licence de physique chimie pour les leçons de chimie.

Cette mesure est la conséquence de l'organisation des études universitaires selon le schéma LMD ; elle répond par ailleurs à la volonté du jury de laisser davantage de liberté au candidat, qui n'est donc plus astreint à suivre le programme d'une classe donnée pour construire le contenu de sa leçon de physique ou de chimie. Cette liberté pédagogique a été mise à profit par une partie des candidats qui ont su ainsi présenter des leçons originales et particulièrement intéressantes, conséquence d'une préparation au concours ayant intégré cette nouvelle donnée.

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

Le jury invite les candidats à mener de front la préparation aux épreuves écrites d'admissibilité et la préparation aux épreuves orales d'admission. Les sciences physiques et chimiques sont avant tout des sciences expérimentales et les deux épreuves se nourrissent l'une de l'autre. 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 et/ou universitaires assurant cette préparation. Le lecteur trouvera dans ce rapport un ensemble très détaillé de commentaires et conseils sur les épreuves orales qu'il conviendra de lire avec attention.

Le jury tient enfin à rappeler que le niveau des épreuves étant celui des classes préparatoires, de faibles résultats à celles-ci, pour un candidat donné, ne sauraient en aucun cas remettre en question la qualité de l'enseignement qu'il dispense dans les classes du second degré dont il a la charge.

Le jury a corrigé d'excellentes copies et a assisté, lors des épreuves d'admission, aussi bien pour les leçons 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 et quinquagénaires qui, ayant relevé le défi, ont réussi le concours ; l'un des lauréats est âgé de 56 ans, ce qui montre bien que l'on peut réussir le concours, même lorsque la formation initiale est bien loin derrière soi. Il encourage ceux qui n'en ont pas été récompensés lors de cette session à les renouveler, tout en mesurant les sacrifices que cela représente et les difficultés qu'ils peuvent rencontrer à mener de front l'exercice normal du métier et la préparation au concours. 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.

Le Président du jury

# 3. RÉGLEMENTATION DU CONCOURS ET INFORMATIONS STATISTIQUES

## RÉGLEMENTATION

### Epreuves :

Les épreuves écrites comportent :

- Une composition sur la physique de durée 5 h (coefficient 1)
- Une composition sur la chimie de durée 5 h (coefficient 1)

Les épreuves orales comportent :

- Une leçon (coefficient 1)
- Un montage (coefficient 1)

Le tirage au sort conduit le candidat à traiter :

soit une leçon de physique et un montage de chimie,  
soit une leçon de chimie et un montage de physique.

### Programme :

Le programme des épreuves écrites et orales de la session 2009 est décrit dans le BO spécial n°4 du 29 mai 2008.

#### *Epreuves de physique :*

Le programme se compose des programmes de physique des classes suivantes :

- seconde générale et technologique (B.O. hors série n°6 du 12 août 1999),
- première S (B.O. hors série n°7 du 31 août 2000),
- terminale S, y compris l'enseignement de spécialité (B.O. hors série n°4 du 30 août 2001),
- classes préparatoires scientifiques aux grandes écoles : classes PCSI, MPSI, MP, MP\*, PC, PC\*, PSI, BCPST, (B.O. hors-série n°3 du 26 juin 2003, B.O. hors-série n°5 du 28 août 2003, B.O. hors-série n°3 du 29 avril 2004 et B.O. hors-série n°6 du 16 septembre 2004).

#### *Epreuves de chimie :*

Cette épreuve porte sur les programmes de chimie des classes suivantes :

- seconde générale et technologique (B.O. hors série n°6 du 12 août 1999),
- première S (B.O. hors série n°7 du 31 août 2000),
- terminale S, y compris l'enseignement de spécialité (B.O. hors série n°4 du 30 août 2001) ;
- première et terminale de la série Sciences et technologies de laboratoire spécialités Physique de laboratoire et de procédés industriels et Chimie de laboratoire et de procédés industriels, (B.O. hors série du 24 septembre 1992 et du 30 décembre 1993),
- classes préparatoires scientifiques aux grandes écoles : classes PCSI, MPSI, MP, MP\*, PC, PC\*, PSI, BCPST, (B.O. hors-série n°3 du 26 juin 2003, B.O. hors-série n°5 du 28 août 2003, B.O. hors-série n°3 du 29 avril 2004 et B.O. hors-série n°6 du 16 septembre 2004).



# INFORMATIONS STATISTIQUES

45 places ont été mises au concours de l'agrégation interne, et 8 au CAERPA.

Les tableaux ci-dessous donnent les informations générales relatives aux candidats du concours 2009, et les comparent aux données correspondantes des dix dernières sessions.

## Agrégation interne

Année	Postes	Inscrits	Présents*	Taux de présence	Admissibles	Admis
1999	74	762	504	66,1%	128	46
2000	50	838	545	65%	127	50
2001	50	882	626	71%	101	50
2002	51	809	619	76,5%	102	51
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%	94	45

## CAERPA

Année	Postes	Inscrits	Présents*	Taux de présence	Admissibles	Admis
1999	7	159	102	64,2%	24	7
2000	8	169	120	71%	24	8
2001	9	167	117	70,%	13	7
2002	10	184	137	74,4%	13	7
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

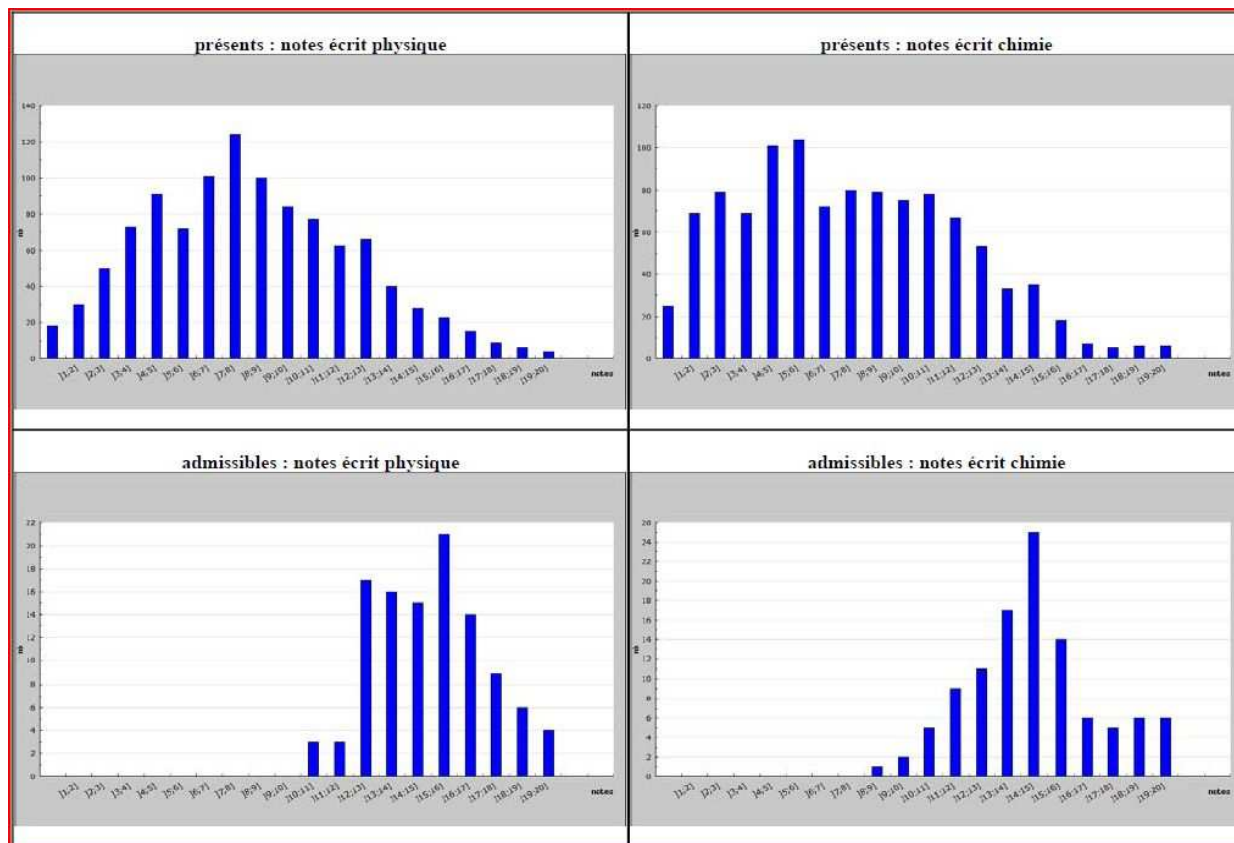
\* Présents à au moins une épreuve

## EPREUVES ECRITES

Les épreuves écrites se sont déroulées les 29 et 30 janvier 2009.

	Agrégation interne	CAERPA
Composition sur la physique :		
Moyenne	8,24	7,73
Meilleure note	20	20
Ecart-type	3,9	3,74
Moyenne des candidats admissibles	14,89	15,48
Composition sur la chimie :		
Moyenne	7,58	7,27
Meilleure note	20	19
Ecart-type	4,19	3,74
Moyenne des candidats admissibles	14,73	13,14
Barre d'admissibilité	25,7	25,7
Nombre d'admissibles	94	14

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



## EPREUVES ORALES

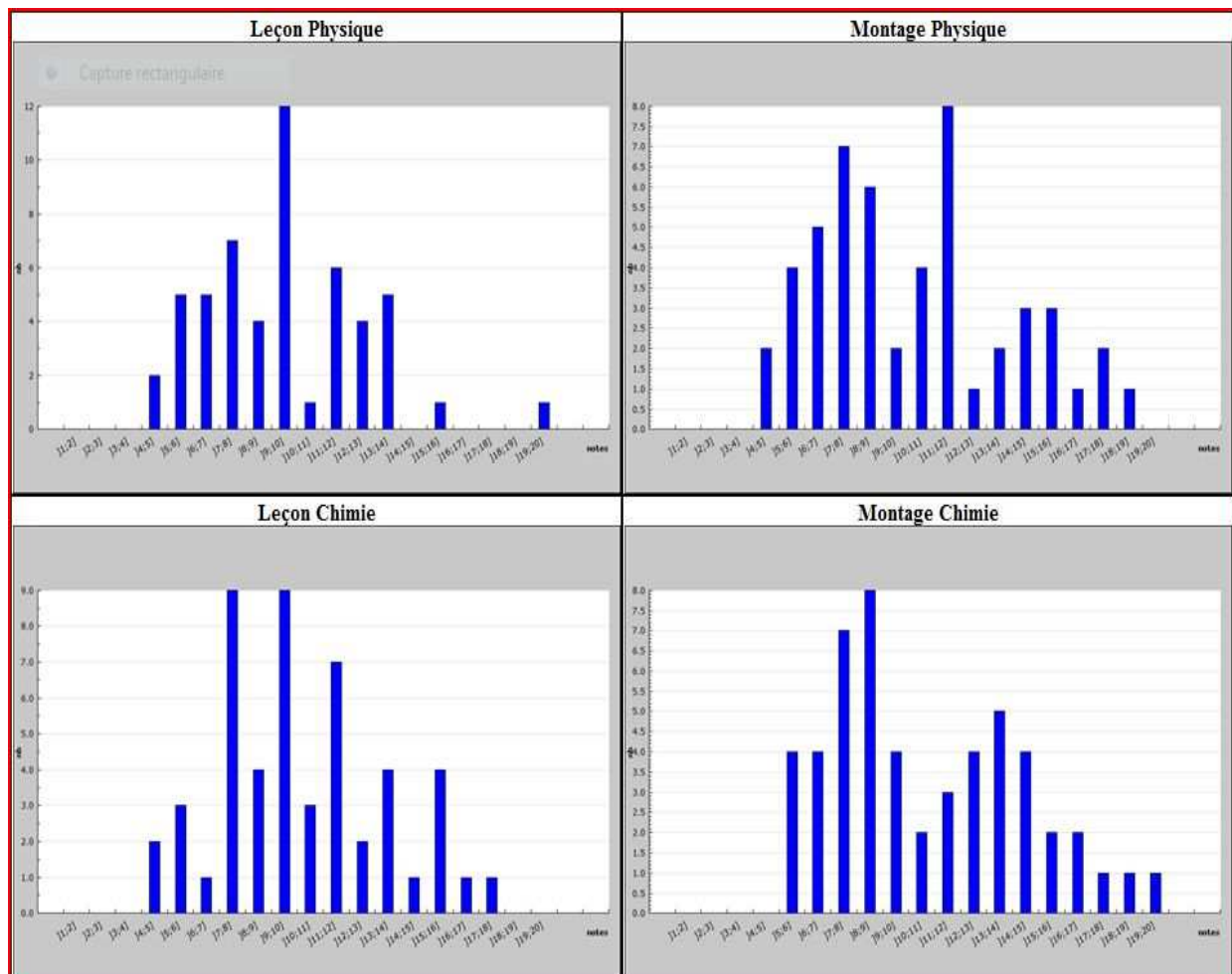
Les épreuves orales se sont déroulées du 17 au 25 avril 2009.

### Résultats des candidats aux épreuves orales :

Nature de l'épreuve	Moyenne des candidats présents aux épreuves orales	Ecart-type
Leçon de physique	9,96	3,02
Leçon de chimie	10,71	3,18
Montage de physique	10,69	3,67
Montage de chimie	11,21	3,68

	Agrégation interne	CAERPA
Barre d'admission	50,3	50,3
Nombre d'admis	45	8

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



## REPARTITION DES CANDIDATS PAR ACADEMIE

### AGRÉGATION INTERNE

Académie	Inscrits	Présents à une épreuve au moins	Admissibles	Admis
AIX-MARSEILLE	66	46	4	2
AMIENS	42	28	2	1
BESANCON	24	18	2	1
BORDEAUX	41	29	3	1
CAEN	23	19	3	1
CLERMONT-FERRAND	10	7	1	0
CORSE	9	5	0	0
CRETEIL-PARIS-VERSAIL.	262	181	22	10
DIJON	36	26	3	2
GRENOBLE	50	32	4	2
GUADELOUPE	22	13	0	0
GUYANE	8	6	1	0
LA REUNION	50	43	2	2
LILLE	105	80	9	5
LIMOGES	8	7	2	1
LYON	60	37	5	4
MARTINIQUE	20	14	0	0
MAYOTTE	6	6	0	0
MONTPELLIER	58	43	2	1
NANCY-METZ	47	35	2	1
NANTES	45	34	7	3
NICE	41	29	2	0
NOUVELLE-CALEDONIE	3	3	0	0
ORLEANS-TOURS	49	32	3	1
POITIERS	29	20	2	1
POLYNESIE FRANCAISE	11	9	1	1
REIMS	20	17	2	1
RENNES	31	18	2	0
ROUEN	38	28	3	1
STRASBOURG	50	28	3	2
TOULOUSE	57	45	2	1
<b>TOTAL</b>	<b>1321</b>	<b>938</b>	<b>94</b>	<b>45</b>

Candidats ayant composé aux deux épreuves écrites : 908

**CAERPA**

Académie	Inscrits	Présents à une épreuve au moins	Admissibles	Admis
AIX-MARSEILLE	11	7	1	1
AMIENS	1	1	0	0
BESANCON	6	2	0	0
BORDEAUX	5	4	0	0
CAEN	11	7	0	0
CLERMONT-FERRAND	1	1	0	0
CORSE	1	1	0	0
CRETEIL-PARIS-VERSAIL.	42	26	3	1
DIJON	5	4	0	0
GRENOBLE	7	4	0	0
GUADELOUPE	5	2	1	0
GUYANE	0	0	0	0
LA REUNION	3	2	0	0
LILLE	29	21	2	2
LIMOGES	4	4	0	0
LYON	13	7	2	1
MARTINIQUE	1	1	0	0
MAYOTTE	0	0	0	0
MONTPELLIER	12	8	1	1
NANCY-METZ	6	3	0	0
NANTES	20	14	1	0
NICE	5	4	1	0
NOUVELLE-CALEDONIE	1	1	0	0
ORLEANS-TOURS	6	3	0	0
POITIERS	3	2	0	0
POLYNESIE FRANCAISE	2	1	0	0
REIMS	3	2	0	0
RENNES	11	5	1	1
ROUEN	4	2	0	0
STRASBOURG	4	3	0	0
TOULOUSE	5	5	1	1
<b>TOTAL</b>	<b>227</b>	<b>147</b>	<b>14</b>	<b>8</b>

Candidats ayant composé aux deux épreuves écrites : 141

## REPARTITION DES CANDIDATS PAR SEXE

2009	AGREGATION INTERNE			CAERPA		
	présents	admissibles	admis	présents	admissibles	Admis
HOMMES	640	69	32	89	12	7
	68%	73%	71%	61%	86%	87,5%
FEMMES	298	25	25	58	2	1
	32%	27%	29%	39%	14%	12,5%

Rappel des trois années précédentes

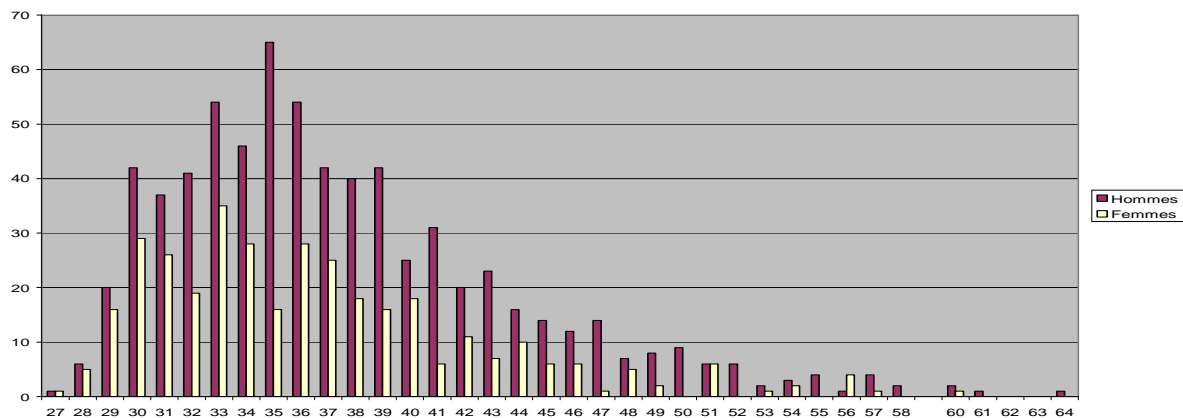
2008	AGREGATION INTERNE			CAERPA		
	présents	admissibles	admis	présents	admissibles	Admis
HOMMES	654	72	33	99	6	3
	68%	72%	73%	64%	75%	75%
FEMMES	308	28	12	56	2	1
	32%	28%	27%	36%	25%	25%

2007	AGREGATION INTERNE			CAERPA		
	présents	admissibles	admis	présents	admissibles	Admis
HOMMES	655	68	30	95	3	3
	69%	67%	67%	60%	43%	75%
FEMMES	298	33	15	64	4	1
	31%	33%	33%	40%	57%	25%

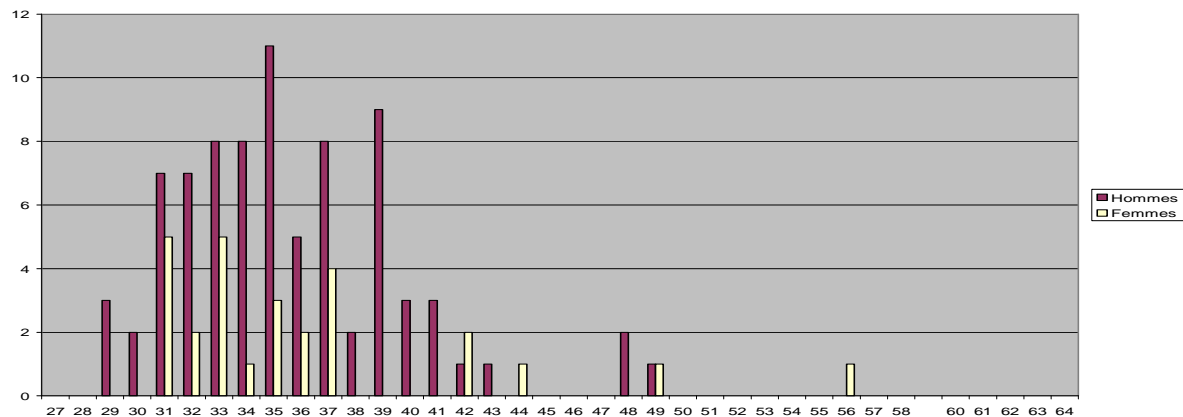
2006	AGREGATION INTERNE			CAERPA		
	présents	admissibles	admis	présents	admissibles	Admis
HOMMES	666	72	25	106	2	0
	70%	71%	56%	63%	33%	0%
FEMMES	291	30	20	61	4	2
	30%	29%	44%	37%	67%	100%

# REPARTITION DES CANDIDATS PAR AGE ET PAR SEXE AUX DEUX CONCOURS

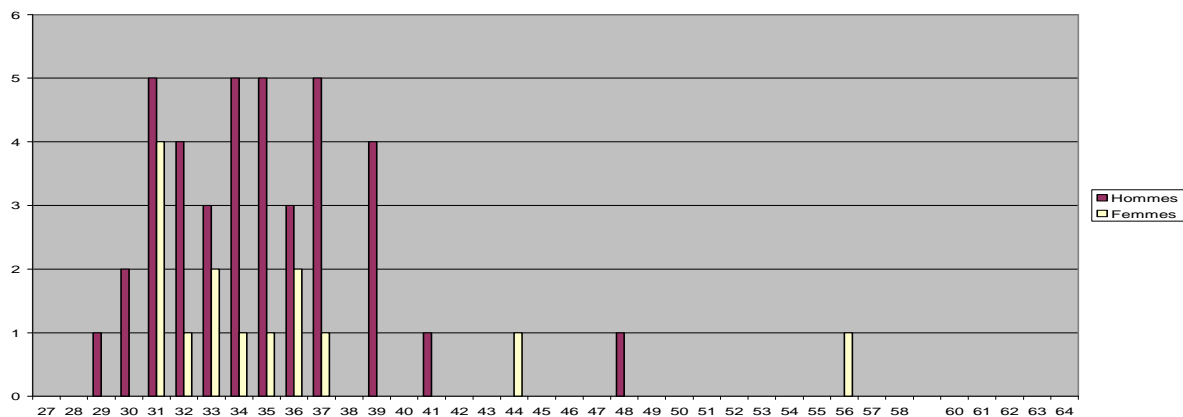
## PRESENTS



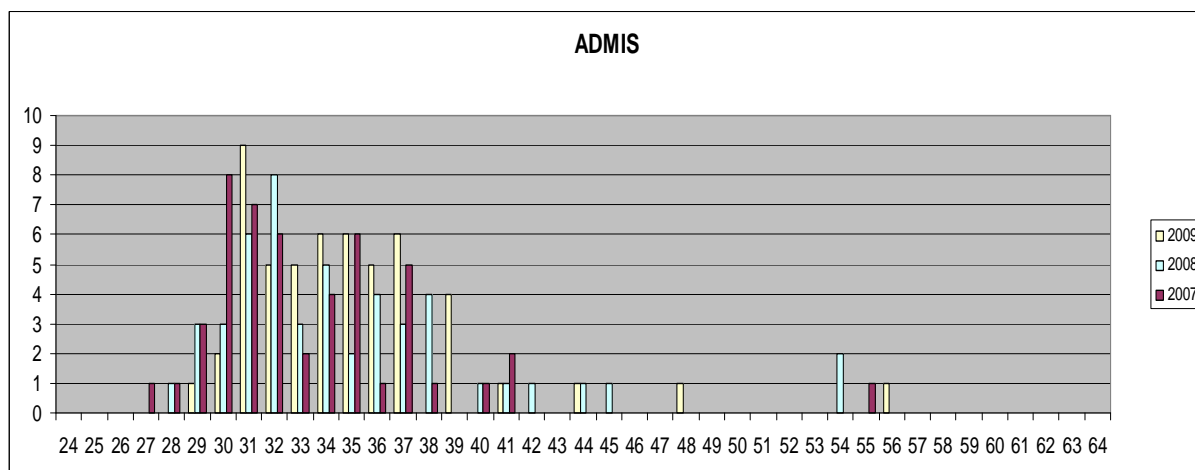
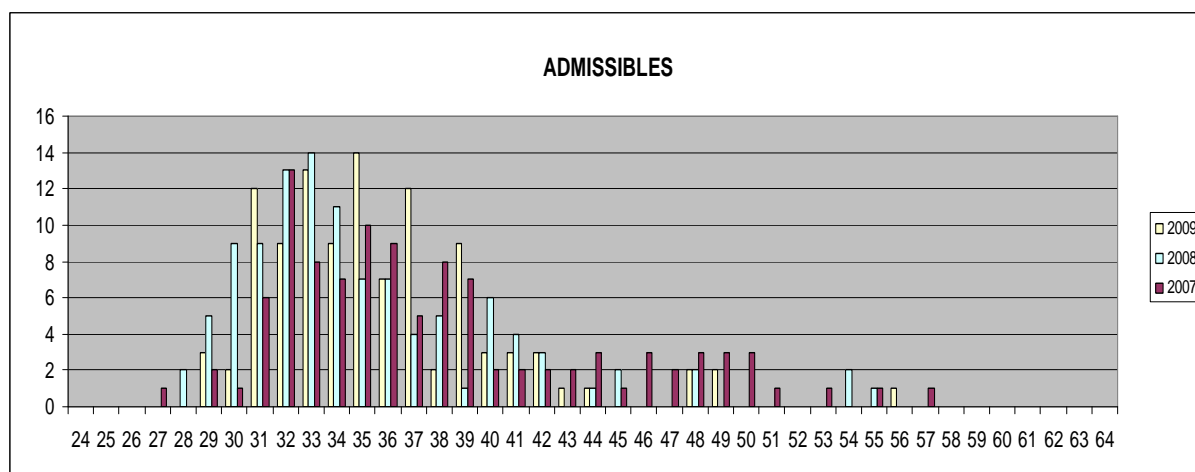
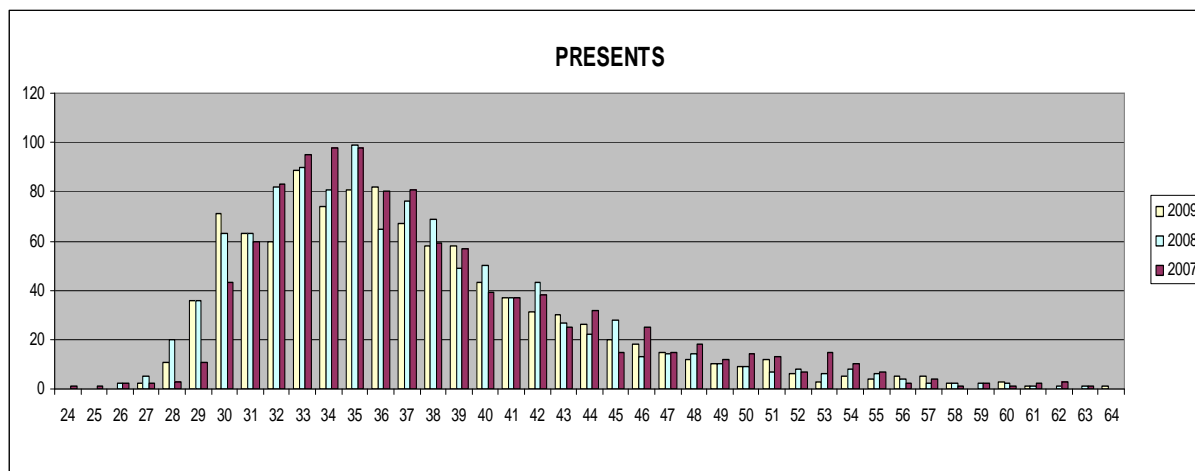
## ADMISSIBLES



## ADMIS



## ÉVOLUTION DES AGES DES CANDIDATS SUR LES TROIS DERNIÈRES ANNÉES





SESSION 2009

**CONCOURS INTERNE  
DE RECRUTEMENT DE PROFESSEURS AGRÉGÉS  
ET CONCOURS D'ACCÈS A L'ÉCHELLE DE RÉMUNÉRATION**

**Section : SCIENCES PHYSIQUES  
Option : PHYSIQUE ET CHIMIE**

**COMPOSITION SUR LA PHYSIQUE  
ET LE TRAITEMENT AUTOMATISÉ DE L'INFORMATION**

Durée : 5 heures

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

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

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

*De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.*

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

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

# Quelques applications potentielles des nanotubes de carbone

## Introduction

Découverts en 1991, les nanotubes de carbone sont des macromolécules aux propriétés électriques et mécaniques exceptionnelles : plus légers et plus rigides que l'acier, ils conduisent mieux le courant électrique que le cuivre et peuvent être métalliques ou semiconducteurs selon leur arrangement microscopique. Le diamètre de ces molécules cylindriques en forme de tube est de l'ordre du nanomètre tandis que leur longueur peut dépasser le millimètre.

Ce problème, centré sur plusieurs applications potentielles des nanotubes de carbone, est composé de 5 parties totalement indépendantes les unes des autres et qui peuvent être abordées dans n'importe quel ordre.

La partie A est une partie pédagogique qui traite de l'enseignement de l'astronomie au lycée.

La partie B, très largement futuriste, concerne la réalisation d'un ascenseur spatial qui relierait la Terre à un satellite géostationnaire.

La partie C, elle aussi pédagogique, est consacrée à l'étude des dipôles  $RC$ .

La partie D, inspirée d'expériences récentes, s'intéresse aux performances d'un transistor réalisé avec un nanotube de carbone unique.

La partie E, elle aussi basée sur des résultats expérimentaux récents, aborde le problème du transport de liquide dans le conduit formé par un nanotube de carbone.

On donne :

- la constante de gravitation  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
- l'unité astronomique :  $1 \text{ u.a.} = 1,50 \cdot 10^{11} \text{ m}$
- le rayon de la Terre  $R_T = 6370 \text{ km}$
- la masse de la Terre  $M_T = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
- la valeur absolue de la charge de l'électron  $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- la permittivité diélectrique du vide  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$
- la viscosité de l'eau  $\eta = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- le nombre d'Avogadro  $\mathfrak{N} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

L'usage de la calculatrice est autorisé.

## Partie A

### Astronomie au lycée

- Copernic, Galilée, Képler, Newton, Ptolémée et Tycho Brahé ont chacun contribué à l'évolution de l'astronomie.
  - Ordonner chronologiquement ces astronomes.
  - Indiquer approximativement la date de leurs travaux.
  - Quel est l'apport de chacun d'entre eux ?
  - L'Union Astronomique Internationale (U.A.I) a tenu sa 26<sup>ème</sup> assemblée générale à Prague en août 2006. Lors de cette réunion, une décision importante a été prise. Quelle est cette décision ? Quelles conséquences a cette décision sur la représentation du système solaire ?
- Le 8 juin 2004, il était possible d'assister au *transit de Vénus*. Qu'appelle-t-on le transit de Vénus et quelle grandeur a-t-il été possible de calculer à partir des observations faites ce jour-là ?
- La Lune : satellite de la Terre.
  - Les premières estimations de la distance Terre-Lune ont été obtenues à partir de mesures faites lors d'éclipses de Lune. Nous disposons actuellement d'une méthode beaucoup plus précise.
    - Connaissez-vous cette méthode ?
    - Cette technique peut-elle servir de support d'enseignement en classe de seconde ? Si oui, en rapport avec quelle partie du programme ? (Des extraits des programmes officiels de la classe de seconde sont disponibles en annexe A)
    - Comment sensibiliser les élèves à l'importance de la précision de la mesure à partir d'une telle expérience ?
  - Les programmes officiels de la classe de seconde demandent d'interpréter le mouvement de la Lune par extrapolation du mouvement d'un projectile (voir les extraits du programme donnés dans l'annexe A).
    - Quel type d'activité proposeriez-vous aux élèves pour atteindre cet objectif ? (on ne demande pas une description détaillée de l'activité)
    - Quel bilan attendez-vous de la part de l'élève à la suite de cette activité ? (4 à 5 lignes maximum)

#### 4. Astronomie en terminale S.

Le tableau ci-dessous présente quelques données concernant le système solaire :

Astre	Masse relative à celle de la Terre	Rayon de l'astre (en km)	Rayon moyen de l'orbite (en u.a.)	Période de rotation propre (en jour)	Période de révolution (en jour)
Mercure	0,0553	2439	0,387	58,6	87,96
Vénus	0,815	6051	0,723	243	224,7
Terre	1,00	6378	1,00	0,997	365,25
Mars	0,107	3402	1,52	1,03	686,9
Jupiter	318	71492	5,20	0,413	4335
Saturne	95,1	60268	9,54	0,444	10757
Uranus	14,5	25656	19,2	0,718	30708
Neptune	17,1	24961	30,1	0,671	60224
Lune	0,0123	1737	$2,56 \cdot 10^{-3}$	27,3	27,3

Proposer l'organisation d'une séquence de cours qui s'appuie sur ce tableau de valeurs (des extraits du programme officiel de la classe de terminale S sont disponibles en annexe B).

Vous prendrez soin de :

- préciser les éléments supposés acquis par les élèves avant le début de cette séquence
- préciser les contenus, connaissances et savoir-faire exigibles développés
- préciser le plan de la séquence et le travail demandé aux élèves
- faire explicitement les calculs de la masse du Soleil et de la masse de la Terre.

---

## Partie B

### Réalisation d'un ascenseur spatial

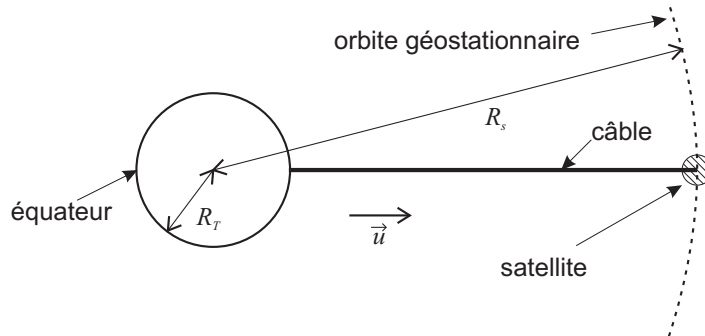
On étudie ici la possibilité de construire un câble rigide pour relier la Terre à un satellite géostationnaire. On s'intéresse essentiellement à la tension d'un tel câble et aux matériaux susceptibles de la supporter.

#### 1 Satellite géostationnaire

1. Rappeler ce qu'est un satellite géostationnaire. Quelle est son orbite? Quel type de satellite trouve-t-on sur cette orbite?
2. Appliquer le principe fondamental de la dynamique au satellite en précisant le référentiel d'étude. En déduire le rayon  $R_s$  de l'orbite géostationnaire en fonction de la constante de gravitation  $G$ , de la masse de la Terre  $M_T$  et de la pulsation  $\omega_T$  du mouvement de rotation propre de la Terre.
3. Le tableau de la question A.4 donne la période de rotation propre de la Terre  $T_T$ . Expliquer pourquoi  $T_T$  n'est pas strictement égale à 1 jour. Exprimer  $T_T$  en fonction de la durée du jour  $T_J$  et de la période de révolution de la Terre  $T_A$ .
4. *Application numérique* : Evaluer  $R_s$ .
5. Comment aurait-on pu retrouver simplement la valeur numérique de  $R_s$  à partir des données du tableau de la question A.4?

#### 2 Câble de section constante

On imagine qu'un câble de section constante  $S$ , réalisé dans un matériau de masse volumique  $\rho$ , relie la Terre à un satellite géostationnaire. Le câble est ancré à la Terre en un point de l'équateur situé à la verticale du satellite. Au niveau du satellite, l'extrémité du câble est supposée libre.



- Figure 1 -

Un point du câble est repéré par sa distance  $r$  au centre de la Terre. La tension du câble en  $r$ , notée  $\vec{T}(r)$ , est la force qu'exerce en  $r$  la partie supérieure du câble ( $r' > r$ ) sur la partie inférieure ( $r' \leq r$ ).

On pose ici  $\vec{T}(r) = T(r)\vec{u}$ , où  $\vec{u}$  est le vecteur unitaire pointant de la Terre vers le satellite dans la direction du câble (voir figure 1). On note  $g_0 = GM_T/R_T^2$  la valeur du champ de gravitation à la surface de la Terre.

On se place dans le référentiel terrestre.

1. Donner l'expression de la force d'inertie d'entraînement qui s'exerce sur un élément du câble, de masse  $dm$  et compris entre  $r$  et  $r + dr$ .
2. Ecrire la condition d'équilibre de cet élément. Montrer qu'elle peut s'écrire :

$$T(r + dr) - T(r) - dP(r) = 0$$

où

$$dP(r) = \rho S g_0 R_T^2 \left( \frac{1}{r^2} - \frac{r}{R_s^3} \right) dr$$

Quelle est la signification physique de  $dP(r)$ ? Que vaut  $dP(r)$  pour  $r = R_s$ ? Commenter.

3. Que vaut  $T(R_s)$ ?  
En utilisant cette condition aux limites, donner l'expression de  $T(r)$ .
4. Montrer que  $T(r = R_T)$  est le poids apparent du câble dans le référentiel terrestre. On note  $P_0$  le poids qu'aurait le câble s'il se trouvait entièrement dans le champ de pesanteur  $g_0$ . Montrer que :

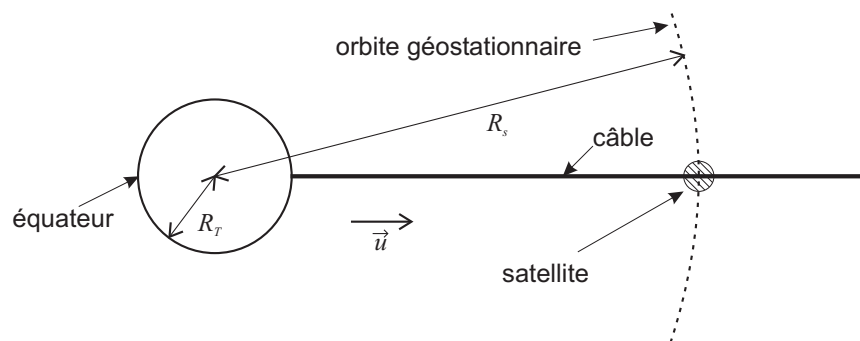
$$|T(r = R_T)| = P_0 \times \frac{x}{1-x} \left( 1 + \frac{x^3}{2} - \frac{3x}{2} \right)$$

où

$$x = \frac{R_T}{R_s}$$

*Application numérique :* Evaluer le rapport  $|T(r = R_T)|/P_0$ . Commenter.

5. Représenter graphiquement  $T(r)$  en fonction de  $r$ . Le câble est-il en tension ou en compression? Quel est le risque lié à une telle situation?
6. Pour remédier au problème soulevé à la question précédente, on envisage un câble qui dépasse l'orbite géostationnaire (i.e. dont la longueur est supérieure à  $R_s - R_T$ , voir figure 2). Comment est dirigé le poids apparent d'un élément de longueur du câble situé à  $r > R_s$ ?



- Figure 2 -

7. En reprenant la question 2.3 et le début de la question 2.4, montrer que si le câble dépasse une certaine distance  $R_0$ , il est en tension pour toute distance  $r$ . Quel est alors le poids apparent total du câble?

Montrer que  $R_0$  est solution de l'équation :

$$1 + \frac{R_0^3}{2R_s^3} - \frac{R_0}{R_T} - \frac{R_0 R_T^2}{2R_s^3} = 0$$

Montrer que :

$$R_0 \simeq \sqrt{\frac{2R_s^3}{R_T}}$$

*Application numérique* : Evaluer  $R_0$ .

8. Représenter graphiquement  $T(r)$  en fonction de  $r$  pour un câble de longueur  $R_0 - R_T$ . A quelle distance, le maximum  $T_{max}$  de  $T(r)$  est-il atteint ? Donner l'expression de  $T_{max}$ .

### 3 Câble de section variable

On envisage ici un câble de section variable  $S(r)$  de longueur supérieure à  $R_0 - R_T$  (i.e.  $T(r) > 0$  pour tout  $r$ ). On définit la contrainte  $\sigma(r)$  du câble au point  $r$  par :

$$\sigma(r) = \frac{T(r)}{S(r)}$$

Pour un matériau donné, la contrainte ne doit pas excéder une valeur critique  $\sigma_c$  sous peine d'entraîner des déformations irréversibles conduisant éventuellement à sa rupture.

1. Montrer que pour optimiser la masse du câble, on doit faire varier sa section de façon à avoir, pour tout  $r$ ,  $\sigma(r) = \sigma_c$ . Dans toute la suite, on suppose cette condition réalisée.
2. En utilisant le résultat de la question 2.2, montrer que  $S(r)$  satisfait l'équation différentielle :

$$\frac{dS}{S(r)} = \frac{R_T^2}{h} \left[ \frac{1}{r^2} - \frac{r}{R_s^3} \right] dr$$

où

$$h = \frac{\sigma_c}{\rho g_0}$$

Quelle est la dimension de  $h$  ?

3. En intégrant l'équation ci-dessus, montrer que :

$$S(r) = S_s e^{\frac{3R_T^2}{2hR_s}} e^{(-\frac{R_T}{h})(\frac{R_T}{r} + \frac{R_T r^2}{2R_s^3})}$$

où  $S_s$  est la section du câble sur l'orbite géostationnaire.

Représenter schématiquement la dépendance de  $S(r)$  avec  $r$ .

4. En déduire le rapport d'aspect du câble :

$$\frac{S_s}{S_T} = e^{0,775 \frac{R_T}{h}}$$

où  $S_T$  est la section du câble à la surface de la Terre.

Représenter  $S_s/S_T$  en fonction de  $h$  pour  $h$  compris entre 50 km et 10000 km.

Comment varie la tension  $T(r)$  ?

### 4 Choix du matériau

Le tableau suivant donne  $\rho$  et  $\sigma_c$  pour quelques matériaux dont les nanotubes de carbone. Il donne également le module d'Young  $E$  de ces matériaux défini par :

$$\sigma = E \frac{\delta l}{l}$$

où  $\delta l/l$  est l'allongement relatif du matériau sous la contrainte  $\sigma$ .

Matériau	Acier	Kevlar	Nanotubes
$\rho(\text{kg.m}^{-3})$	7800	1450	1300
$\sigma_c(\times 10^9 \text{ N.m}^{-2})$	1	3,5	100
$E(\times 10^9 \text{ N.m}^{-2})$	200	30	1000

1. Calculer  $h$  pour chacun des matériaux mentionnés.
2. Discuter les valeurs obtenues en utilisant les résultats de la question 3.4.
3. Quel est l'allongement relatif du câble sous contrainte critique  $\sigma_c$  pour les différents matériaux. ? Commenter.
4. On cherche à lever le long du câble une masse de 10 tonnes. On se donne comme critère de fonctionnement de l'ascenseur que le poids de cette masse au niveau de la Terre ne doit pas excéder  $T(R_T)/10$ . Evaluer  $S(R_T)$  et  $S(R_s)$  pour les différents matériaux du tableau. Commenter.

---

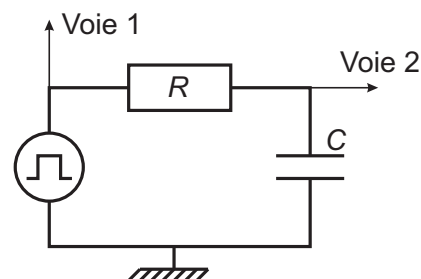
## Partie C

### Electricité : le dipôle RC

Le programme de la classe de terminale S aborde l'étude des dipôles RC. Les extraits du programme qui correspondent à cette étude sont donnés dans l'annexe B.

1. Proposer une séance de travaux pratiques **introductive** aux dipôles RC. On supposera que la partie 1.1 intitulée *Le condensateur* a déjà été traitée. Vous prendrez soin de préciser :
  - les objectifs en termes de savoir acquis
  - les compétences travaillées au cours de cette séance
  - l'organisation de la séance de travaux pratiques et le travail demandé aux élèves.

2. Lors de l'étude à l'oscilloscope de la réponse à un échelon de tension (voir figure 3), il faut veiller au choix de la valeur des composants pour obtenir expérimentalement une visualisation pertinente de la tension crête et de la réponse aux bornes de  $C$ .



- Figure 3 -

- (a) Comment choisir la fréquence du générateur basse fréquence ?
- (b) Quel est le schéma équivalent de l'entrée d'un oscilloscope à cette fréquence ?
- (c) Que se passe-t-il si la valeur de la résistance du circuit est très élevée ?
- (d) Donner l'ordre de grandeur de la valeur limite  $R_{max}$  de cette résistance ?
- (e) Quel est le schéma équivalent d'un générateur basse fréquence ?
- (f) Que se passe-t-il si la valeur de la résistance du circuit est très faible ? Donner l'ordre de grandeur de la valeur limite  $R_{min}$  ?
- (g) L'étude expérimentale peut aussi se faire à l'aide d'un système informatique d'acquisition de données. Quels sont les réglages à effectuer pour avoir une acquisition convenable de la tension aux bornes du condensateur en réponse à un échelon de tension d'amplitude  $E$ . Préciser les valeurs numériques pour  $E = 6 \text{ V}$ ,  $R = 10 \text{ k}\Omega$  et  $C = 10 \text{ nF}$ .

3. La méthode d'Euler, présentée en terminale S, permet la résolution approchée d'une équation différentielle. Quel est l'intérêt pédagogique de cette méthode ?
4. Au cours de la deuxième période de la classe de PCSI, on étudie le régime sinusoïdal forcé des circuits  $RC$ .
  - (a) Quelle méthode donner aux élèves pour qu'ils puissent déterminer qualitativement la nature du filtre avant de commencer le calcul de la fonction de transfert ?
  - (b) Déterminer l'expression de la fonction de transfert du circuit série  $RC$ , la tension de sortie étant prise aux bornes de  $C$ .
  - (c) Tracer le diagramme de Bode du circuit précédent. On se limitera au tracé du gain. Quelle est la nature de ce filtre ? Donner ses caractéristiques.
  - (d) Tracer pour ce même circuit, la tension aux bornes de  $C$  en réponse à un échelon de tension. Comment montrer aux élèves que cette réponse permet de retrouver la nature du filtre ?

---

## Partie D

### Transistor à effet de champ à nanotube de carbone unique

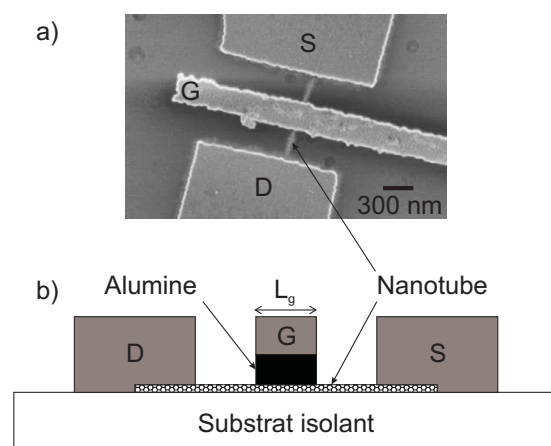
Grâce aux progrès récents des nano-technologies, on sait réaliser depuis quelques années des transistors fonctionnant avec un nanotube de carbone unique. Un tel composant est constitué d'un nanotube de carbone déposé sur une surface isolante et en contact à ses deux extrémités avec deux électrodes métalliques (appelées *drain* et *source* et notées respectivement D et S). Le potentiel appliqué sur une troisième électrode, appelée *grille* et notée G, permet, grâce à un effet de champ non décrit ici, de contrôler le courant électrique circulant dans le nanotube (entre le drain et la source). Dans la configuration étudiée ici, la grille est posée au-dessus du nanotube, séparée de celui-ci par une fine couche isolante d'alumine (voir figure 4.b).

L'objet de cette partie est l'étude électronique d'un tel transistor et de ses applications à la détection de charge ultra-rapide.

#### Transistor à nanotube unique (NTFET)

a) Image obtenue par microscopie électronique. L'échelle est indiquée sur la figure.

b) Schéma d'une vue en coupe. Le dessin n'est pas à l'échelle. Les électrodes sont reliées aux instruments de mesure par un dispositif non représenté.



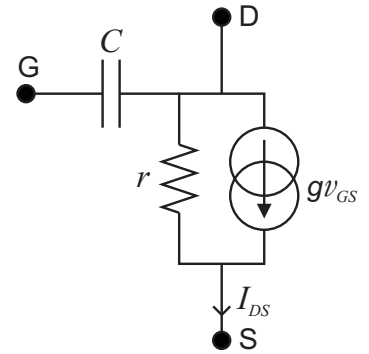
- Figure 4 -



Lors de son utilisation, le transistor est polarisé par des tensions continues de sorte que son schéma équivalent pour les petits signaux alternatifs est celui représenté sur la figure 5. Le générateur de courant est commandé par la tension entre grille et source.  $C$  est la capacité du condensateur formé par la grille, le nanotube et la couche d'alumine.  $r$  et  $g$  sont respectivement la résistance différentielle du nanotube (entre le drain et la source) et la transconductance du transistor définies par :

$$r = \left( \frac{dV_{DS}}{dI_{DS}} \right)_{V_{GS}} \quad \text{et} \quad g = \left( \frac{dI_{DS}}{dV_{GS}} \right)_{V_{DS}}$$

où  $V_{GS} = V_G - V_S$  et  $V_{DS} = V_D - V_S$ ,  $V_G$ ,  $V_D$ ,  $V_S$  étant respectivement les potentiels continus de la grille, du drain et de la source.  $I_{DS}$  est le courant continu circulant dans le nanotube.  $v_{GS}$  est la différence de potentiel alternative appliquée entre drain et source.  $g$ , exprimée en siemens ( $1 \text{ S} = 1 \Omega^{-1}$ ), est le paramètre essentiel du transistor. C'est lui qui caractérise la variation du courant dans le nanotube lorsqu'on change la tension grille, à tension drain-source constante.



- Figure 5 -

## 1 Ordres de grandeur

### 1.1 Estimation de la capacité $C$

Pour évaluer simplement un ordre de grandeur de la capacité  $C$  formée par la grille, le nanotube et la couche d'alumine, on modélise l'ensemble par un condensateur cylindrique constitué de deux armatures coaxiales conductrices séparées par un diélectrique de permittivité relative  $\epsilon_r$ . Dans ce modèle, l'armature interne de rayon  $R_{NT}$  est le nanotube. Elle est séparée de l'armature externe (la grille) par une couche d'alumine d'épaisseur  $e$ . On suppose le condensateur infiniment long.

On applique une différence de potentiel  $V$  entre les deux armatures.

1. Quelle est la géométrie du champ électrique à l'intérieur du condensateur ? Représenter graphiquement les lignes de champ électrique.
2. En utilisant le théorème de Gauss, donner l'expression du champ électrique à une distance  $r$  de l'axe du condensateur en fonction de la charge par unité de longueur de l'armature interne, notée  $q_l$ .
3. Relier la tension  $V$  aux bornes du condensateur à la charge linéique  $q_l$ .
4. En déduire que la capacité par unité de longueur de l'ensemble nanotube-alumine-grille est :

$$C_l = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{R_{NT}+e}{R_{NT}}\right)}$$

5. *Application numérique* : En prenant  $\epsilon_r = 9,8$ ,  $R_{NT} = 0,5 \text{ nm}$  et  $e = 10 \text{ nm}$ , donner la valeur de  $C_l$  en attoFarad ( $10^{-18} \text{ F}$ ) par micromètre. En déduire un ordre de grandeur de  $C$  pour une longueur de grille  $L_G = 100 \text{ nm}$  (voir figure 4).

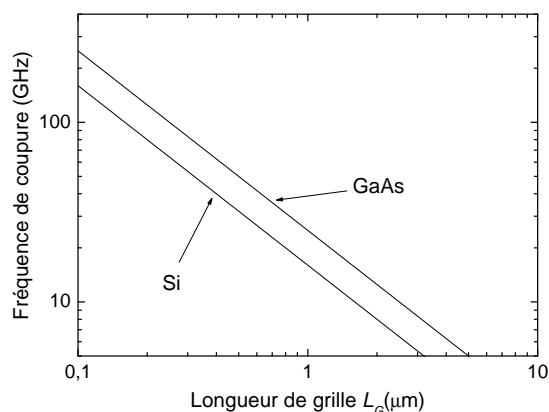
Dans la suite, on utilisera la valeur plus réaliste  $C_l = 50 \text{ aF} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ .

### 1.2 Fréquences caractéristiques

1. En utilisant le schéma équivalent au transistor présenté figure 5, montrer par analyse dimensionnelle que le NTFET possède deux fréquences caractéristiques :

$$\nu_1 = \frac{1}{2\pi r C} \quad \text{et} \quad \nu_2 = \frac{g}{2\pi C}$$

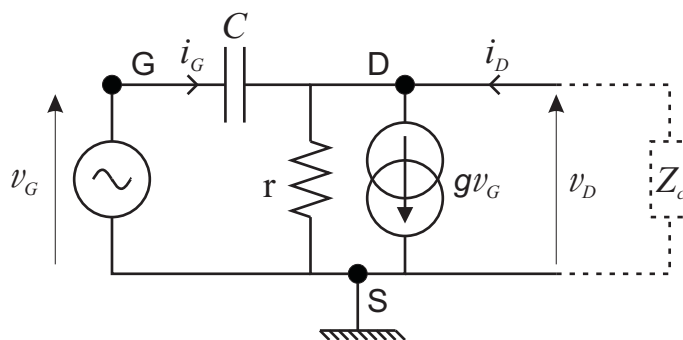
2. Evaluer  $\nu_1$  et  $\nu_2$  pour un transistor dont la longueur de grille est  $L_G = 100$  nm pour les valeurs typiques  $r = 100$  k $\Omega$ ,  $g = 20$   $\mu$ S,  $C_l = 50$  aF. $\mu$ m $^{-1}$ . Comment les fréquences  $\nu_1$  et  $\nu_2$  dépendent-elles de la longueur de grille  $L_G$  ?
3. On admet pour l'instant que la fréquence  $\nu_2$  définit la fréquence maximale de fonctionnement du transistor. En utilisant la figure 6, comparer la fréquence maximale de fonctionnement d'un NTFET à celle des transistors à effet de champ usuels à base de Silicium (ceux de vos ordinateurs) ou d'Arsénure de Gallium (ceux de vos téléphones portables).



- Figure 6 - Fréquence maximale d'utilisation des transistors à effet de champ usuels

## 2 Amplificateur à nanotube unique

Pour étudier un amplificateur à nanotube unique, on applique en plus des tensions de polarisation une tension alternative  $v_G$  de pulsation  $\omega$  (on notera  $\nu$  la fréquence correspondante) sur la grille du transistor. On mesure la tension alternative  $v_D$  entre drain et source et le courant  $i_D$  qui circule dans une charge d'impédance  $Z_c$  branchée entre drain et source. Le schéma équivalent de ce montage pour les petits signaux alternatifs est présenté figure 7.



- Figure 7 -

**Notations :** On note  $\tilde{a}$  l'amplitude complexe d'une grandeur alternative  $a$  de pulsation  $\omega$ , de sorte que la représentation complexe de  $a$  est  $\tilde{a}e^{j\omega t}$  où  $j$  désigne le nombre complexe de partie imaginaire positive tel que  $j^2 = -1$ .

## 2.1 Gain en tension

On s'intéresse d'abord au gain en tension  $G_V$  de l'amplificateur en l'absence de charge  $Z_c$  ( $Z_c = \infty$ ) :

$$G_V = \left( \frac{\tilde{v}_D}{\tilde{v}_G} \right)_{\tilde{i}_D=0}$$

1. Exprimer  $G_V$  en fonction de  $r$ ,  $C$ ,  $g$  et  $\omega$ .
2. En utilisant les valeurs numériques fournies à la question 1.2.2, représenter  $|G_V|$  en fonction de  $\nu$  pour un transistor avec une longueur de grille  $L_G = 100$  nm. Préciser le rôle des fréquences caractéristiques  $\nu_1$  et  $\nu_2$  définies au 1.2.
3. Commenter les résultats obtenus.
4. Montrer que le gain en tension de l'amplificateur s'effondre si on branche une faible impédance  $Z_c$  entre drain et source. On discutera en particulier le cas où  $Z_c = 50 \Omega$  est l'impédance caractéristique des lignes qui relie un composant à un autre dans les circuits hyperfréquences.
5. Montrer qu'on peut résoudre le problème soulevé à la question précédente en connectant entre drain et source un grand nombre de tubes en parallèle.

## 2.2 Gain en courant

On définit le gain en courant  $G_I$  par le rapport des courants  $i_D$  et  $i_G$  lorsqu'on court-circuite drain et source ( $Z_c = 0$ ) :

$$G_I = \left( \frac{\tilde{i}_D}{\tilde{i}_G} \right)_{\tilde{v}_D=0}$$

1. Exprimer  $G_I$  en fonction de  $C$ ,  $g$  et  $\omega$ .
2. En utilisant les valeurs numériques fournies à la question 1.2.2, représenter  $|G_I|$  en fonction de  $\nu$  pour un transistor avec une longueur de grille  $L_G = 100$  nm.
3. Commenter les résultats obtenus. Quelle est la fréquence maximale de fonctionnement de l'amplificateur ? Quelles sont ses applications possibles ?

## 3 Application à la détection de charge

Dans cette partie, on cherche à utiliser le NTFET comme électromètre rapide et sensible. Le transistor est polarisé en continu et on s'intéresse à la détection d'une petite variation de la charge électrique de la grille par la mesure de la variation correspondante du courant dans le nanotube.

1. On note  $N_\tau$  le nombre d'électrons qui traversent le nanotube (entre drain et source) pendant le temps  $\tau$ .  
Exprimer  $N_\tau$  en fonction de  $I_{DS}$ ,  $\tau$  et  $e$  en l'absence de perturbation sur la grille.
2. On impose une petite variation  $\delta q$  de la charge électrique de la grille. A l'aide du schéma de la figure 5, montrer que  $N_\tau$  varie de :

$$\delta N_\tau = \frac{g}{eC} \delta q \tau$$

En déduire que :

$$\frac{\delta N_\tau e}{\delta q} = 2\pi\nu_2\tau = \omega_2\tau$$

où  $\omega_2$  est la pulsation correspondant à la fréquence  $\nu_2$  introduite au 1.2.

*Application numérique :* On considère un NTFET pour lequel  $\nu_2 = 100$  GHz. Calculer  $\delta N_\tau$  pour une variation de la charge de la grille  $\delta q$  égale à la charge élémentaire  $e$  et un temps  $\tau = 1$  ns =  $10^{-9}$  s.

3. On cherche maintenant à comparer  $\delta N_\tau$  aux fluctuations de  $N_\tau$  associées au bruit du courant  $I_{DS}$ . On admet qu'à basse température, celui-ci est dominé par le bruit de grenaille dû au caractère corpusculaire des électrons. Dans ces conditions, les fluctuations de  $N_\tau$  sont égales à  $\Delta N_\tau = \sqrt{N_\tau}$ .

Exprimer le rapport  $\delta N_\tau / \Delta N_\tau$  en fonction de  $\omega_2$ ,  $\tau$ ,  $I_{DS}$ ,  $e$  et  $\delta q$ .

Montrer que si l'on se fixe un rapport signal sur bruit minimum de 1, la plus petite charge  $\delta q$  que l'on peut détecter en un temps  $\tau$  est :

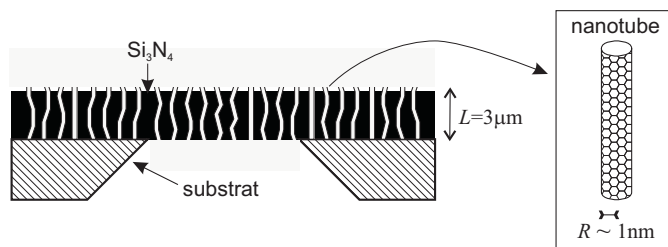
$$\delta q_{min} = e \frac{C}{g} \sqrt{\frac{I_{DS}}{e\tau}}$$

*Application numérique :* Evaluer  $\delta q_{min}/e$  pour  $\nu_2 = 100$  GHz,  $I_{DS} = 10 \mu\text{A}$  et  $\tau = 1$  ns. Commenter le résultat obtenu.

## Partie E

### Écoulement d'eau à travers un nanotube de carbone

Des expériences publiées récemment<sup>1</sup> ont permis la mesure de l'écoulement d'eau à travers une membrane poreuse de nitrure de silicium dont les pores sont des nanotubes de carbone alignés les uns avec les autres (voir figure 8). Le diamètre des nanotubes est compris entre 1,3 et 2 nm tandis que l'épaisseur de la membrane est  $3 \mu\text{m}$ . La densité surfacique de nanotubes est  $0,25 \text{ cm}^{-2}$ .



- Figure 8 -

On cherche ici à comparer les résultats de ces mesures à un modèle hydrodynamique simple.

## 1 Écoulement de Poiseuille

Pour modéliser le transfert de liquide à travers un nanotube de carbone, on considère l'écoulement, dit de Poiseuille, d'un fluide de masse volumique  $\rho$  et de viscosité  $\eta$  à travers un cylindre de rayon  $R$ . On s'intéresse à l'écoulement stationnaire induit par une différence de pression  $\Delta P$  sur une longueur  $L$  du tube. On utilise les coordonnées cylindriques  $r$ ,  $\theta$ ,  $z$  définies par la figure 9. L'origine ( $z = 0$ ) de l'axe des  $z$  est notée  $O$ . On note  $P(M)$  la pression au point  $M$  et on pose  $P(z = 0) - P(z = L) = \Delta P$ . On cherche le champ des vitesses du fluide sous la forme  $\vec{v}(M) = v(r)\vec{u}_z$ . On néglige les effets de la pesanteur.

<sup>1</sup>J.K. Holt et al., *Fast mass transport through Sub-2-Nanometer carbon nanotubes*, Science, **312**, 1034 (2006).

On rappelle l'expression de la divergence en coordonnées cylindriques :

$$\text{si } \vec{A} = A_r \vec{u}_r + A_\theta \vec{u}_\theta + A_z \vec{u}_z$$

$$\text{alors } \operatorname{div}(\vec{A}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r A_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

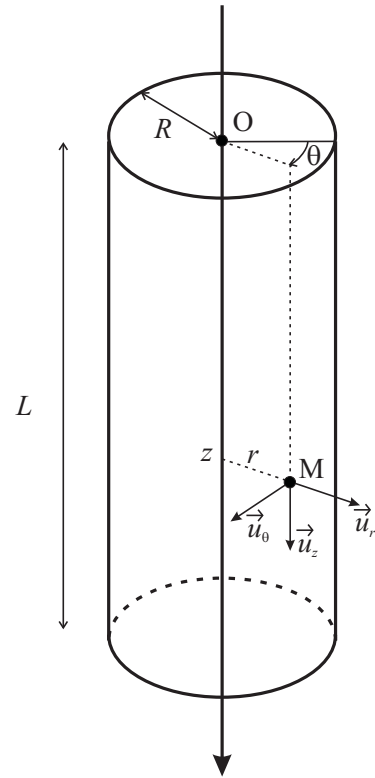
1. Ecrire l'équation locale traduisant la conservation de la masse.

Montrer que dans le cas où le fluide peut-être considéré comme incompressible, elle se ramène à :

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0$$

Un champ de vitesse de la forme  $v(r) \vec{u}_z$  vérifie-t-il cette équation ?

A quelle condition peut-on considérer le fluide comme incompressible ? Dans la suite, on supposera cette condition réalisée.

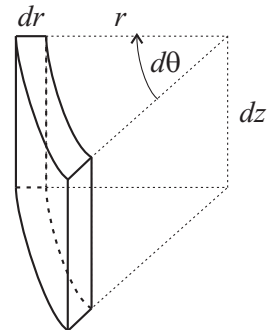


- Figure 9 -

On considère l'élément de fluide représenté figure 10. On rappelle que la force de viscosité exercée sur cet élément par le fluide situé entre 0 et  $r$  s'écrit :

$$d^2 \vec{F} = -\eta \frac{dv}{dr} r d\theta dz \vec{u}_z$$

2. Quelle est l'origine microscopique de la force de viscosité ?



- Figure 10 -

3. Calculer la résultante des forces de viscosité qui s'exercent sur l'élément de fluide de la figure 10 et montrer que la densité volumique de force de viscosité s'écrit :

$$\frac{\eta}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dv}{dr} \right) \vec{u}_z$$

L'équation, dite de Navier-Stokes, qui régit le champ des vitesses du fluide en régime stationnaire et en géométrie cylindrique s'écrit :

$$\rho \left( \vec{v} \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}} \right) \vec{v} = -\overrightarrow{\operatorname{grad}} P + \frac{\eta}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dv}{dr} \right) \vec{u}_z$$

4. Interpréter chacun des termes de cette équation.

5. Montrer que le terme  $\rho (\vec{v} \cdot \overrightarrow{grad}) \vec{v}$  est nul dans la géométrie considérée.  
 Déduire de l'équation de Navier Stokes que  $P$  ne dépend que de  $z$  et montrer que le gradient de pression est indépendant de  $z$ . En déduire :

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{\Delta P}{L}$$

Comment varie la pression dans le tube ?

6. En utilisant les conditions aux limites au centre et sur le bord du tube, montrer que :

$$v(r) = -\frac{\Delta P}{4\eta L}(r^2 - R^2)$$

Représenter schématiquement le profil de vitesse dans le tube.  
 Montrer que le débit volumique de l'écoulement est donné par :

$$D = \frac{\Delta P}{8\eta L} \pi R^4$$

Quelle est la vitesse moyenne  $\bar{v}$  d'une particule de fluide ?

7. En comparant les débits induits par un même gradient de pression dans un tube de rayon  $R$  et dans 100 tubes de rayon  $R/10$ , commenter la dépendance en  $R$  de  $D$ . Quelle est l'origine physique de ce comportement très différent de celui observé dans le transport du courant électrique par exemple ?
8. On se propose de retrouver rapidement les résultats précédents en faisant le bilan des forces qui s'exercent sur le système fermé constitué du fluide à l'intérieur d'un cylindre de rayon  $r < R$  à l'instant  $t$  et de la masse  $dm$  de fluide qui y pénètre entre  $t$  et  $t + dt$  (la figure 11 représente ce système à l'instant  $t$ ).

Représenter le système fermé considéré à l'instant  $t + dt$ .

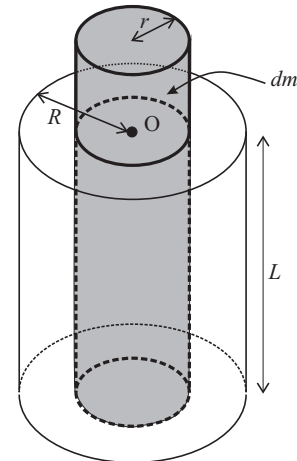
On note  $\vec{p}(t)$  la quantité de mouvement du système fermé à l'instant  $t$  et on suppose que la pression est uniforme sur une section droite du cylindre.

Montrer que  $\vec{p}(t) = \vec{p}(t + dt)$ .

Quelles sont les forces qui s'exercent sur le système fermé considéré entre  $t$  et  $t + dt$  ?

Montrer que l'application du théorème de la résultante cinétique permet de retrouver directement :

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{\Delta P}{2\eta L} r$$



- Figure 11 -

9. On définit le nombre de Reynolds de l'écoulement par :

$$\mathfrak{Re} = \frac{2\rho\bar{v}R}{\eta}$$

Quelle est la signification physique de  $\mathfrak{Re}$  ?

Dans quelle limite les calculs faits ci-dessus sont-ils pertinents ?

## 2 Analyse des résultats expérimentaux

1. En supposant un écoulement de type Poiseuille, évaluer numériquement le débit volumique d'eau  $D$  à travers un nanotube de carbone de rayon  $R = 1 \text{ nm}$ , de longueur  $L = 3 \mu\text{m}$  pour une différence de pression  $\Delta P = 1 \text{ bar}$ .
2. Evaluer la distance moyenne entre molécules d'eau dans l'eau liquide.
3. En déduire le nombre de molécules d'eau qui traverse un nanotube de carbone par nanoseconde. Dans leurs expériences, Holt et al. observent un flux de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-1}$  molécules par nanotube et par nanoseconde. Comparer ce résultat à celui prédit par le modèle de Poiseuille. Commenter en précisant quelles peuvent être les origines physiques du désaccord observé.

# Annexe A : Extraits du programme de la classe de seconde

## 1. Exploration de l'espace

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
<p>Comment déterminer l'ordre de grandeur de la taille d'une molécule ? <i>Expérience de Franklin</i></p> <p>Comment déterminer l'ordre de grandeur de l'épaisseur d'un cheveu ? <i>Utilisation de la diffraction pour construire une courbe d'étalement et utilisation de cette courbe</i> <i>Utilisation d'un microscope ou d'une loupe</i></p> <p>Comment évaluer la distance et les dimensions d'un immeuble ? <i>Méthode de la parallaxe</i> <i>Technique de la visée</i> <i>Utilisation du diamètre apparent</i></p> <p>Comment déterminer la profondeur d'un fond marin ? <i>Technique du sonar</i></p> <p>Comment mesurer le rayon de la Terre ? <i>Méthode d'Eratosthène*</i></p> <p>Comment mesurer la distance de la Terre à la Lune ?</p> <p><i>Technique de l'écho laser</i> Étude de documents textuels ou multimédias* donnant des informations sur les représentations du système solaire et sur les échelles de distances.</p>	<p><b>1.1. Présentation de l'Univers</b> L'atome, la Terre, le système solaire, la Galaxie, les autres galaxies .</p> <p><b>1.2. Echelle des longueurs</b> Echelle des distances dans l'univers de l'atome aux galaxies. Unités de longueur. Taille comparée des différents systèmes.</p> <p><b>1.3. L'année de lumière.</b> Propagation rectiligne de la lumière. Vitesse de la lumière dans le vide et dans l'air. Définition et intérêt de l'année de lumière.</p>	<p>Utiliser à bon escient les noms des objets remplissant l'espace aussi bien au niveau microscopique (noyau, atome, molécule, cellule etc...) qu'au niveau cosmique (Terre, Lune, planète, étoile, galaxie). Savoir classer ces objets en fonction de leur taille. Savoir positionner ces objets les uns par rapport aux autres sur une échelle de distances. 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.</p> <p>Connaître la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide (ou dans l'air) et savoir qu'il s'agit d'une vitesse limite. Convertir en année de lumière une distance exprimée en mètres et réciproquement. Expliquer que "voir loin, c'est voir dans le passé".</p> <p>Utiliser les puissances de 10 dans l'évaluation des ordres de grandeur, dans les calculs, et dans l'expression des données et des résultats. Repérer un angle.</p> <p><i>Mesurer une petite et une grande distance :</i> - mettre en œuvre une technique de mesure utilisée en TP - garder un nombre de chiffres significatifs en adéquation avec la précision de la mesure - exprimer le résultat avec une unité adaptée</p> <p>Compétence en cours d'acquisition : être capable d'effectuer une recherche documentaire et critique sur un cédérom ou sur Internet.</p>

## 2. L'Univers en mouvements et le temps

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
<p>La trajectoire d'un corps qui tombe est-elle la même pour tous les observateurs ? <i>Analyse d'un mouvement par rapport à différents corps de référence*</i> <i>(étude à partir d'images vidéo, chronophotographie)</i></p> <p><i>Expériences montrant l'influence d'une force sur le mouvement d'un corps (action d'un aimant sur une bille qui roule, modification de la trajectoire d'une balle lorsqu'on la touche, forces entre corps électrisés...)</i></p> <p>Peut-il y avoir mouvement sans force dans un référentiel terrestre ? Etude d'exemples de la vie courante provenant de films ou de bandes dessinées illustrant le principe d'inertie</p> <p>Pourquoi la Lune "ne tombe-t-elle pas" sur la Terre ? <i>Influence de la vitesse initiale sur la chute d'un corps* (simulation, étude à partir d'images vidéo...)</i> <i>Observation du mouvement circulaire uniforme d'un corps soumis à une force centrale</i></p>	<p><b>1.1. Relativité du mouvement</b></p> <p><b>1.2. Principe d'inertie</b> 1.2.a. Effets d'une force sur le mouvement d'un corps. Rôle de la masse du corps</p> <p>1.2.b. Enoncé du principe d'inertie pour un observateur terrestre : "tout corps persévère, dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme si les forces qui s'exercent sur lui se compensent"</p> <p><b>1.3. La gravitation universelle</b> 1.3.a. L'interaction gravitationnelle entre deux corps. 1.3.b. La pesanteur résulte de l'attraction terrestre. Comparaison du poids d'un même corps sur la Terre et sur la Lune.</p> <p>1.3.c. Trajectoire d'un projectile. Interprétation du mouvement de la Lune (ou d'un satellite) par extrapolation du mouvement d'un projectile.</p>	<p>Décrire le mouvement d'un point dans deux référentiels différents.</p> <p>Savoir qu'une force s'exerçant sur un corps modifie la valeur de sa vitesse et/ou la direction de son mouvement et que cette modification dépend de la masse du corps.</p> <p>Énoncer le principe d'inertie Savoir qu'il est équivalent de dire : "un corps est soumis à des forces qui se compensent" et "un corps n'est soumis à aucune force".</p> <p>Utiliser le principe d'inertie pour interpréter en termes de force la chute des corps sur Terre Calculer la force d'attraction gravitationnelle qui s'exerce entre deux corps à répartition sphérique de masse, et représenter cette force. Cas du poids en différents points de la surface de la Terre Prévoir qualitativement comment est modifié le mouvement d'un projectile lorsqu'on modifie la direction du lancement ou la valeur de la vitesse initiale.</p>



# Annexe B : Extraits du programme de la classe terminale de la série scientifique

## Évolution des systèmes électriques (3TP - 10HCE)

### Objectifs

Les élèves ont abordé dans le cours de physique de la classe de première quelques propriétés de circuits électriques en courant continu. Dans cette partie, on s'intéresse à des phénomènes associés à des courants variables, et plus spécifiquement aux éléments qui permettent de contrôler l'évolution temporelle d'un courant électrique : condensateurs et bobines. Les lois fondamentales utilisées en courant continu (loi des tensions, loi des intensités) seront dans les applications toujours valables pour les valeurs instantanées des tensions et des intensités variables. Condensateurs et bobines sont caractérisés empiriquement par l'expression de la tension que l'on mesure à leurs bornes. Dans cette logique, il n'est pas nécessaire d'introduire la notion d'auto-induction, puisque le phénomène d'induction n'est pas au programme. On indique que la possibilité de produire des signaux électriques modulables dans le temps est à l'origine de nombreuses applications. Dans chaque cas considéré (circuit RC, RL et LC), ce qui est appelé "résolution analytique" dans la colonne des compétences exigibles comprend : l'établissement de l'équation différentielle, la vérification qu'une solution analytique proposée la satisfait, et la détermination des constantes à partir des paramètres du circuit et des conditions initiales. On rappelle que ces compétences sont des compétences scientifiques transversales. Les savoir-faire expérimentaux concernant l'oscilloscope ne sont exigibles qu'à la fin de l'étude de l'évolution des systèmes électriques, c'est pourquoi ils figurent à la fin de cette partie. Tous les autres réglages, tels la synchronisation ou le décalibrage, ne sont pas exigibles.

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
<p><i>Illustrations expérimentales par quelques montages simples : oscillateurs de relaxation, temporisation, etc.</i></p> <p><i>Illustration de l'utilisation des condensateurs (alimentation continue, condensateur de découplage, stimulateur cardiaque, etc.)*</i></p> <p><i>Charge d'un condensateur à courant constant.</i></p> <p><i>Mise en évidence de l'énergie emmagasinée.</i></p> <p><i>Exemples d'application du stockage de l'énergie par des condensateurs (principe du flash).</i></p> <p><i>Charge et décharge d'un condensateur à travers une résistance :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- utilisation d'un oscilloscope et/ou d'un système d'acquisition informatisé avec traitement de l'information,</li> <li>- visualisation des tensions aux bornes du générateur, du condensateur et du conducteur ohmique,</li> <li>- influence des paramètres R et C,</li> <li>- mesure de la constante de temps,</li> <li>- influence de la tension du générateur.</li> </ul>	<p><b>1 - Cas d'un dipôle RC</b></p> <p><b>1.1 Le condensateur</b></p> <p>Description sommaire, symbole. Charges des armatures. Intensité : débit de charges</p> <p>Algèbrisation en convention récepteur <math>i, u, q</math>. Relation charge-intensité pour un condensateur <math>i = dq/dt</math>, <math>q</math> charge du condensateur en convention récepteur. Relation charge-tension <math>q = Cu</math>; capacité, son unité le farad (F).</p> <p><b>1.2 - Dipôle RC</b></p> <p>Réponse d'un dipôle RC à un échelon de tension : tension aux bornes du condensateur, intensité du courant ; étude expérimentale et étude théorique (résolution analytique). Énergie emmagasinée dans un condensateur. Continuité de la tension aux bornes du condensateur. Connaître la représentation symbolique d'un condensateur.</p>	<p>Connaître la représentation symbolique d'un condensateur. En utilisant la convention récepteur, savoir orienter un circuit sur un schéma, représenter les différentes flèches-tension, noter les charges des armatures du condensateur. Connaître les relations charge-intensité et charge-tension pour un condensateur en convention récepteur ; connaître la signification de chacun des termes et leur unité. Savoir exploiter la relation <math>q = Cu</math>.</p> <p>Effectuer la résolution analytique pour la tension aux bornes du condensateur ou la charge de celui-ci lorsque le dipôle RC est soumis à un échelon de tension. En déduire l'expression de l'intensité dans le circuit. Connaître l'expression de la constante de temps et savoir vérifier son unité par analyse dimensionnelle. Connaître l'expression de l'énergie emmagasinée dans un condensateur. Savoir que la tension aux bornes d'un condensateur n'est jamais discontinue. Savoir exploiter un document expérimental pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- identifier les tensions observées,</li> <li>- montrer l'influence de R et de C sur la charge ou la décharge,</li> <li>- déterminer une constante de temps lors de la charge et de la décharge.</li> </ul> <p><b>Savoir-faire expérimentaux</b></p> <p>Réaliser un montage électrique à partir d'un schéma. Réaliser les branchements pour visualiser les tensions aux bornes du générateur, du condensateur et du conducteur ohmique. Montrer l'influence de l'amplitude de l'échelon de tension, de la résistance et de la capacité sur le phénomène observé lors de la charge et de la décharge du condensateur.</p>

### Commentaires

L'objectif de la manipulation introductive est de montrer, d'un point de vue qualitatif, l'influence d'un conducteur ohmique, d'un condensateur et d'une bobine sur l'établissement du courant dans un circuit. Les trois dipôles pourront être montés en dérivation.

1. Aucun développement sur la technologie des condensateurs n'est demandé. Le symbole du condensateur électrochimique est hors programme. L'orientation d'un circuit sera indiquée par une flèche sur un fil de jonction, surmontée de  $i$ . On insistera auprès des élèves sur le fait que si le courant passe dans le sens de la flèche, alors  $i$  est positif et que si le courant passe en sens opposé, alors  $i$  est négatif. Les conventions choisies seront celles du schéma ci-dessous :



Après avoir rappelé que l'intensité est un débit de charges électriques, on introduira  $i = dq/dt$  uniquement pour le condensateur,  $q$  étant la charge du condensateur à l'instant  $t$ . L'expression  $q = Cu$  pourra être introduite à partir de l'expérience de la charge d'un condensateur à courant constant. L'expression de la capacité d'un condensateur plan est hors programme. Les associations de condensateurs sont hors programme. On étudiera aussi bien la charge que la décharge d'un condensateur en utilisant un oscilloscope à mémoire ou un système d'acquisition de données. Dans cette partie on évitera d'utiliser des tensions crête-à-crête pour ne pas se heurter aux difficultés liées à l'utilisation du matériel (offset) ou conceptuelles ( $-E, +E$ ). La constante de temps sera déterminée par une méthode au choix de l'enseignant. L'expression de l'énergie pourra être établie mais sa démonstration n'est pas exigible. On indiquera que le stockage et le déstockage de l'énergie ne peuvent jamais s'effectuer instantanément. Par conséquent, la tension aux bornes d'un condensateur ne subit pas de discontinuité.

2. ...

# Évolution temporelle des systèmes mécaniques (5 TP - 22 HCE)

## Objectifs

Cette partie constitue l'aboutissement de l'enseignement de mécanique commencé en classe de seconde. L'appropriation des lois de Newton, à travers les différents exemples de mouvements étudiés, permet aux élèves de pratiquer les différents aspects de la démarche scientifique :

- modéliser un système et utiliser les lois de la dynamique pour prévoir son comportement, en utilisant une résolution analytique et/ou une méthode numérique itérative ;
- réaliser des mesures quantitatives et les confronter aux prédictions d'une théorie, dans le but éventuel d'améliorer la modélisation. La variété des systèmes étudiés doit illustrer la généralité de la théorie.

Dans chaque cas considéré, ce qui est appelé "résolution analytique" dans la colonne des compétences exigibles comprend : l'établissement de l'équation différentielle, la vérification qu'une solution analytique proposée la satisfait, et la détermination des constantes à partir des paramètres du circuit et des conditions initiales.

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
<p>Textes (Galilée, Newton, Einstein, Feynman, etc.)<sup>*</sup></p> <p>Applications de la vie courante mettant en jeu la première et la troisième loi de Newton.</p> <p><i>Tracé des vecteurs vitesse et accélération sur des enregistrements de mouvements divers de solides (la résultante des forces appliquées au solide est donnée).</i></p> <p><i>Vérification de la pertinence des grandeurs <math>m</math>, <math>\Delta V_c / \Delta t</math> et <math>\Sigma F_{ext}</math> intervenant dans la deuxième loi de Newton (une des grandeurs étant fixée, l'étude porte sur les variations relatives des deux autres).</i></p> <p><i>Étude de la chute verticale de solides de même forme et de masses différentes, dans l'air et dans l'huile. Détermination des vitesses limites.</i></p>	<p><b>1. La mécanique de Newton</b></p> <p>Lien qualitatif entre <math>\Sigma F_{ext}</math> et <math>\Delta V_c</math> (rappels)</p> <p>Comparaison de <math>\Delta V_c</math> correspondant à des intervalles de temps égaux pour des forces de valeurs différentes (résultat de l'activité)</p> <p>Introduction de <math>\Delta V_c / \Delta t</math></p> <p>Accélération : <math>a_c = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta V_c / \Delta t) = dV_c / dt</math> ; vecteur accélération (direction, sens, valeur).</p> <p>Rôle de la masse.</p> <p>Deuxième loi de Newton appliquée au centre d'inertie.</p> <p>Importance du choix du référentiel dans l'étude du mouvement du centre d'inertie d'un solide : référentiels galiléens.</p> <p>Troisième loi de Newton : loi des actions réciproques (rappel).</p>	<p>Choisir un système. Choisir les repères d'espace et de temps.</p> <p>Faire l'inventaire des forces extérieures appliquées à ce système.</p> <p>Définir le vecteur accélération et exploiter cette définition, connaître son unité.</p> <p>Énoncer les trois lois de Newton.</p> <p>Savoir exploiter un document expérimental (série de photos, film, acquisition de données avec un ordinateur...); reconnaître si le mouvement du centre d'inertie est rectiligne uniforme ou non, déterminer des vecteurs vitesse et accélération, mettre en relation accélération et somme des forces, tracer et exploiter des courbes <math>V_c = f(t)</math>.</p> <p><b>Savoir-faire expérimentaux</b></p> <p><i>Savoir enregistrer expérimentalement le mouvement de chute d'un solide dans l'air et/ou dans un autre fluide en vue de l'exploitation du document obtenu.</i></p>
<p><i>Exploitation des résultats obtenus au TP précédent : vitesse limite, régime initial et permanent, influence de la masse sur la vitesse limite, modélisation de la force de frottement.</i></p> <p>Exemples de chutes verticales dans la vie courante.</p> <p><i>Une méthode numérique itérative pour résoudre l'équation différentielle caractéristique de l'évolution d'un système à l'aide d'un tableur ou d'une calculatrice graphique : la méthode d'Euler. Confrontation des résultats théoriques et expérimentaux, importance du choix du pas de discrétisation temporelle, du modèle théorique choisi pour la force de frottement.</i></p> <p>Exemples de mouvements de projectiles dans la vie courante.</p> <p><i>Étude expérimentale de mouvements de projectiles de masses différentes dans un champ de pesanteur ; importance des conditions initiales.</i></p> <p>ou webcam :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- tracé de vecteurs accélération,</li> <li>- vérification que dans tous les cas <math>a_c = g</math> quelle que soit la masse.</li> <li>- importance des conditions initiales sur la nature de la trajectoire.</li> </ul>	<p><b>2. Étude de cas</b></p> <p><b>2.1 Chute verticale d'un solide</b></p> <p>Force de pesanteur, notion de champ de pesanteur uniforme.</p> <p><b>- Chute verticale avec frottement</b></p> <p>Application de la deuxième loi de Newton à un mouvement de chute verticale : forces appliquées au solide (poids, poussée d'Archimède, force de frottement fluide) ; équation différentielle du mouvement ; résolution par une méthode numérique itérative, régime initial et régime asymptotique (dit "permanent"), vitesse limite ; notion de temps caractéristique.</p> <p><b>- Chute verticale libre</b></p> <p>Mouvement rectiligne uniformément accéléré ; accélération indépendante de la masse de l'objet. Résolution analytique de l'équation différentielle du mouvement ; importance des conditions initiales.</p> <p><b>2.2 Mouvements plans</b></p> <p><b>- Mouvement de projectiles dans un champ de pesanteur uniforme</b></p> <p>Application de la deuxième loi de Newton au mouvement du centre d'inertie d'un projectile dans un champ de pesanteur uniforme dans le cas où les frottements peuvent être négligés.</p> <p>Équations horaires paramétriques.</p> <p>Équation de la trajectoire.</p> <p>Importance des conditions initiales.</p>	<p>Définir un champ de pesanteur uniforme. Connaître les caractéristiques de la poussée d'Archimède</p> <p>Appliquer la deuxième loi de Newton à un corps en chute verticale dans un fluide et établir l'équation différentielle du mouvement, la force de frottement étant donnée.</p> <p>Connaître le principe de la méthode d'Euler pour la résolution approchée d'une équation différentielle.</p> <p>Définir une chute libre, établir son équation différentielle et la résoudre</p> <p>Définir un mouvement rectiligne uniformément accéléré.</p> <p>Savoir exploiter des reproductions d'écrans d'ordinateur (lors de l'utilisation d'un tableur grapheur) correspondant à des enregistrements expérimentaux</p> <p>Savoir exploiter des courbes <math>v_c = f(t)</math> pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- reconnaître le régime initial et/ou le régime asymptotique.</li> <li>- évaluer le temps caractéristique correspondant au passage d'un régime à l'autre.</li> <li>- déterminer la vitesse limite.</li> </ul> <p>Dans le cas de la résolution par méthode itérative de l'équation différentielle, discuter la pertinence des courbes obtenues par rapport aux résultats expérimentaux (choix du pas de résolution, modèle proposé pour la force de frottement).</p> <p><b>Savoir-faire expérimentaux</b></p> <p><i>Utiliser un tableur ou une calculatrice pour résoudre une équation différentielle par la méthode d'Euler.</i></p> <p>Appliquer la deuxième loi de Newton à un projectile dans un champ de pesanteur uniforme. Montrer que le mouvement est plan. Établir l'équation de la trajectoire à partir des équations horaires paramétriques. Savoir exploiter un document expérimental reproduisant la trajectoire d'un projectile : tracer des vecteurs vitesse et accélération, déterminer les caractéristiques du vecteur accélération, trouver les conditions initiales.</p>

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
<p>Lois de Kepler : approche historique*.</p> <p>Tracés de vecteurs accélération dans le cas d'un mouvement circulaire uniforme.</p> <p>Utilisation d'un logiciel de simulation pour la satellisation et les lois de Kepler*.</p>	<p><b>- Satellites et planètes</b></p> <p>Lois de Kepler (trajectoire circulaire ou elliptique). Référentiels héliocentrique et géocentrique.</p> <p>Étude d'un mouvement circulaire uniforme ; vitesse, vecteur accélération ; accélération normale.</p> <p>Énoncé de la loi de gravitation universelle pour des corps dont la répartition des masses est à symétrie sphérique et la distance grande devant leur taille (rappel).</p> <p>Application de la deuxième loi de Newton au centre d'inertie d'un satellite ou d'une planète : force centripète, accélération radiale, modélisation du mouvement des centres d'inertie des satellites et des planètes par un mouvement circulaire et uniforme, applications (période de révolution, vitesse, altitude, satellite géostationnaire).</p> <p>Interprétation qualitative de l'impesanteur dans le cas d'un satellite en mouvement circulaire uniforme.</p>	<p><b>Savoir-faire expérimentaux</b></p> <p>Savoir enregistrer expérimentalement la trajectoire d'un projectile et exploiter le document obtenu.</p> <p>Énoncer les lois de Kepler et les appliquer à une trajectoire circulaire ou elliptique.</p> <p>Définir un mouvement circulaire uniforme et donner les caractéristiques de son vecteur accélération.</p> <p>Connaître les conditions nécessaires pour observer un mouvement circulaire uniforme : vitesse initiale non nulle et force radiale.</p> <p>Énoncer la loi de gravitation universelle sous sa forme vectorielle pour des corps dont la répartition des masses est à symétrie sphérique et la distance grande devant leur taille.</p> <p>Appliquer la deuxième loi de Newton à un satellite ou à une planète.</p> <p>Démontrer que le mouvement circulaire et uniforme est une solution des équations obtenues en appliquant la deuxième loi de Newton aux satellites ou aux planètes.</p> <p>Définir la période de révolution et la distinguer de la période de rotation propre.</p> <p>Exploiter les relations liant la vitesse, la période de révolution et le rayon de la trajectoire.</p> <p>Connaître et justifier les caractéristiques imposées au mouvement d'un satellite pour qu'il soit géostationnaire.</p> <p>Retrouver la troisième loi de Kepler pour un satellite ou une planète en mouvement circulaire uniforme.</p> <p>Exploiter des informations concernant le mouvement de satellites ou de planètes.</p>

## Compétences scientifiques générales exigibles en fin de classe terminale S

- **Compétences expérimentales**
  - Formuler une hypothèse sur un événement susceptible de se produire ou sur un paramètre pouvant influencer un phénomène
  - Proposer une expérience susceptible de valider ou d'invalider une hypothèse ou répondant à un objectif précis
  - Choisir et justifier l'utilisation du matériel de laboratoire
  - Décrire une expérience, un phénomène
  - Analyser les résultats expérimentaux et les confronter aux prévisions d'un modèle
- **Compétences manipulatoires**
  - Reconnaître et nommer le matériel de laboratoire
  - Suivre un protocole et utiliser le matériel prescrit
  - Respecter les règles de sécurité élémentaires pour l'utilisation du matériel et des produits
  - Faire le schéma d'un montage expérimental
  - Réaliser un montage à partir d'un schéma ou d'un protocole
- **Compétences scientifiques**
  - Identifier les paramètres jouant un rôle dans un phénomène physique ou chimique
  - Associer un modèle à un phénomène
  - Elaborer une argumentation, une démarche scientifique
  - Discuter la pertinence, la cohérence et la logique d'une argumentation scientifique
  - Utiliser des unités adaptées
  - Utiliser l'analyse dimensionnelle
  - Évaluer l'ordre de grandeur d'un résultat
  - S'interroger sur la vraisemblance d'un résultat
  - Utiliser un vocabulaire scientifique adapté
  - Analyser, en termes scientifiques, une situation, une expérience, un document
  - Construire une courbe à partir d'un ensemble de mesures et l'exploiter
  - Savoir exploiter une courbe
- **Compétences transversales**
  - Utiliser un axe orienté et des mesures algébriques
  - Utiliser les vecteurs et les opérations correspondantes (coordonnées, addition, produit scalaire)
  - Utiliser les fonctions du programme de mathématiques
  - Conduire un calcul de dérivée, de primitive et d'intégrale
  - Utiliser la notion d'équation différentielle
  - Utiliser les notions de statistique et de probabilité du programme de mathématiques
  - Exploiter un tableau de valeurs
  - Utiliser l'ordinateur pour acquérir et/ou traiter des données expérimentales
  - Effectuer une recherche documentaire et savoir trier les informations selon des critères pertinents
  - S'interroger sur la crédibilité d'une information
  - Produire un document en utilisant les technologies de l'information et de la communication

## Corrigé du problème :

### Quelques applications plus ou moins futuristes des nanotubes de carbone

---

#### Partie A

##### Astronomie au lycée

1. (a) Dans l'ordre chronologique : Ptolémée, Copernic, Tycho Brahé, Képler et Galilée sont contemporains, Newton.
    - (b) – Ptolémée : 2<sup>ème</sup> siècle
    - Copernic (1473-1543) : Travaux début 16<sup>ème</sup> siècle
    - Ticho Brahé (1546-1601) : Travaux fin 16<sup>ème</sup> siècle
    - Kepler (1571-1630) : Travaux début 17<sup>ème</sup> siècle
    - Galilée (1564 - 1642) : Travaux les plus célèbres début du 17<sup>ème</sup> siècle
    - Newton (1642 - 1727) : Travaux fin 17<sup>ème</sup> siècle
  - (c) – Nicolas Copernic propose un modèle héliocentrique pour décrire le mouvement des planètes. Mais les résultats ne sont pas plus précis que les tables de Ptolémée, aucune table astronomique ne sera construite à partir de ce modèle.
    - Galilée : Si Galilée n'a pas inventé la lunette, il en a construit plusieurs en s'appuyant sur des travaux hollandais. Ses observations l'ont conduit à des résultats inattendus : la Lune n'est pas une sphère lisse ; certaines planètes comme Jupiter ont des satellites ; la Voie Lactée est formée d'étoiles. Mais c'est surtout l'observation des phases de Vénus qui le conduise à affirmer la primauté du modèle héliocentrique.
    - Newton : Newton marque le début de la mathématisation de la physique. Il pose les fondements de la mécanique classique avec en particulier la loi de l'interaction gravitationnelle qui permet d'expliquer les lois de Kepler.
  - (d) En août 2006, lors de sa 26<sup>ème</sup> assemblée générale, L'Union Astronomique Internationale a donné la définition d'une planète. Selon cette définition, le système solaire ne compte plus que huit planètes : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Pluton se classe dans la catégorie des planètes naines.
2. Le *Transit de Vénus* correspond au passage de Vénus devant le soleil quand cette planète est observée depuis la Terre. Lors du *transit* du 8 juin 2004, une nouvelle campagne de mesure de l'unité astronomique a été lancée.
  3. La Lune : satellite de la Terre.
    - (a) – La méthode la plus précise utilisée actuellement est la télémétrie laser qui consiste à mesurer de temps mis par la lumière pour faire un aller retour entre la Terre et la Lune. Une impulsion laser est envoyée depuis la Terre et réfléchié par un réflecteur posé sur la Lune.

- Cette technique peut être exploitée en classe de seconde dans la partie *Exploration de L'espace, - De l'atome aux galaxies - Propagation rectiligne de la lumière, vitesse de la lumière.*
  - La précision sur la mesure de la distance est directement liée à la précision de la mesure du temps : une erreur de  $10^{-9}$ s = 1 ns conduit à une erreur de 30 cm. Si on souhaite utiliser ce type de méthode pour des distances de l'ordre du mètre, il est nécessaire d'avoir un appareil de mesure du temps très précis.
- (b) - L'utilisation d'un logiciel de simulation, permet d'observer l'effet de la vitesse initiale sur la portée d'un tir. Ce travail de simulation permet d'une part d'atteindre un des objectifs du programme : *Prévoir qualitativement comment est modifié le mouvement d'un projectile lorsqu'on modifie la vitesse initiale* et d'autre part de faire comprendre aux élèves que la Lune est en chute libre.

#### 4. Astronomie en terminale S.

Un exemple de scénario :

- **Eléments supposés acquis par les élèves avant le début de la séance :** Tout le cours a été fait, les lois de Kepler ont été vues mais la 3ème loi n'est pas encore vérifiée pour une orbite circulaire.
- **Contenus, connaissances et savoir-faire exigibles développés :** Exploiter des informations concernant le mouvement des satellites et des planètes. Retrouver la troisième loi de Kepler pour un mouvement circulaire uniforme.
- **Plan de la séquence :**

Travail élève : Quelle exploitation peut-on faire des données fournies ?

Résultat attendu : Vérification de la troisième loi de Kepler

Travail prof/élève : Retrouver la troisième loi de Kepler pour un mouvement circulaire uniforme.

*Comme la trajectoire est circulaire, on sait que l'accélération est centripète et vaut  $v^2/R$ , où  $v$  est la vitesse de la planète et  $R$  le rayon de son orbite. Le principe fondamental de la dynamique s'écrit donc :*

$$\frac{mv^2}{R} = \frac{GMm}{R^2}$$

où  $m$  est la masse de la planète et  $M$  celle de l'astre autour duquel elle gravite.

La période de révolution  $T$  est donnée par  $T = 2\pi R/v$  de sorte que :

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

*On retrouve ainsi la troisième loi de Kepler qui prédit que pour toutes les planètes gravitant autour d'un même astre, le rapport  $R^3/T^2$  est constant.*

Travail élève : Comment retrouver la masse du Soleil puis de la Terre à partir des données fournies.

Du tableau de l'énoncé, on déduit :

Astre	$R(m)$	$T(s)$	$4\pi^2 R^3/GT^2(kg)$
Mercur	$5,81 \cdot 10^{10}$	$7,60 \cdot 10^6$	$2,00 \cdot 10^{30}$
Vénus	$1,08 \cdot 10^{11}$	$1,94 \cdot 10^7$	$2,00 \cdot 10^{30}$
Terre	$1,50 \cdot 10^{11}$	$3,16 \cdot 10^7$	$2,01 \cdot 10^{30}$
Mars	$2,28 \cdot 10^{11}$	$5,93 \cdot 10^7$	$1,99 \cdot 10^{30}$
Jupiter	$7,80 \cdot 10^{11}$	$3,75 \cdot 10^8$	$2,00 \cdot 10^{30}$
Saturne	$1,43 \cdot 10^{12}$	$9,29 \cdot 10^8$	$2,01 \cdot 10^{30}$
Uranus	$2,88 \cdot 10^{12}$	$2,65 \cdot 10^9$	$2,01 \cdot 10^{30}$
Neptune	$4,52 \cdot 10^{12}$	$5,20 \cdot 10^9$	$2,01 \cdot 10^{30}$
Lune	$3,84 \cdot 10^8$	$2,36 \cdot 10^6$	$6,02 \cdot 10^{24}$

On constate que la troisième loi de Kepler est bien vérifiée pour les planètes gravitant autour du soleil et on déduit la masse du soleil  $M_S = 2,00 \cdot 10^{30}$  kg. Des données concernant la Lune, on déduit également la masse de la terre  $M_T = 6,02 \cdot 10^{24}$  kg.

## Partie B

### Réalisation d'un ascenseur spatial

#### 1 Satellite géostationnaire

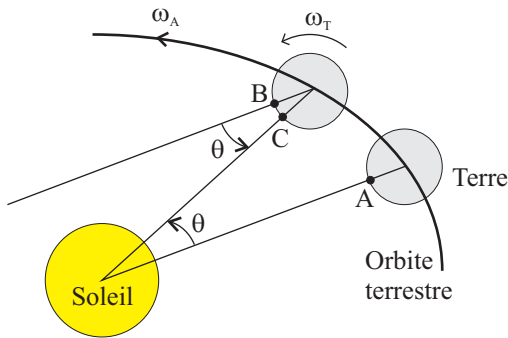
1. Un satellite géostationnaire est un satellite fixe par rapport à la terre. Son orbite est circulaire, dans le plan équatorial. On y trouve par exemple les satellites de télécommunication.
2. Dans le référentiel terrestre, le satellite (de masse  $m$ ) est immobile et 2 forces s'exercent sur lui : son poids  $-GM_T m/R_s^2 \vec{u}$  et la force d'inertie d'entraînement  $m\omega_T^2 R_s \vec{u}$  (force centrifuge), où  $\vec{u}$  est le vecteur unitaire pointant de la Terre vers le satellite.

Dans le référentiel géocentrique, supposé Galiléen, le satellite est uniquement soumis à son poids et il est en mouvement circulaire uniforme d'accélération centripète  $-\omega_T^2 R_s \vec{u}$ .

Dans les 2 cas, l'application du principe fondamental de la dynamique conduit à :

$$R_s = \left( \frac{GM_T}{\omega_T^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

3. Comme la terre tourne autour du soleil en même temps qu'elle tourne sur elle-même, la durée du jour solaire est différente de la période de rotation propre de la terre (jour sidéral). Comme les deux rotations s'effectuent dans le même sens, le jour sidéral ( $T_T$ ) est plus court que le jour solaire ( $T_J$ ). On peut le comprendre à l'aide de la figure 3.



- Figure 1 -

On part d'une position de la terre où le soleil est à la verticale du lieu situé au point A. Au bout d'un jour sidéral, ce lieu se trouve au point B et le soleil n'est pas encore revenu à sa verticale. On constate sur la figure 3 que l'angle manquant est égal à l'angle parcouru sur l'orbite terrestre. Lors d'une rotation autour du soleil, il y a donc exactement un jour sidéral de plus que de jours solaires. On en déduit :

$$\frac{T_A}{T_T} = \frac{T_A}{T_J} + 1$$

soit

$$\frac{T_T}{T_J} = \frac{\frac{T_A}{T_J}}{\frac{T_A}{T_J} + 1} = \frac{365,25}{366,25} = 0,997$$

4. *Application numérique* :  $R_s = 42200$  km.
5. On aurait pu appliquer la troisième loi de Kepler à la Lune et à un satellite géostationnaire (tous deux satellites de la terre, de périodes de révolution respectives  $T_{lune}$  et  $T_T$ , et avec des rayons d'orbite respectifs  $R_{lune}$  et  $R_s$ ). On aurait alors obtenu directement :

$$R_s = R_{lune} \left( \frac{T_s}{T_{lune}} \right)^{\frac{2}{3}} = 2,56 \cdot 10^{-3} \times 1,50 \cdot 10^{11} \times \left( \frac{0,997}{27,3} \right)^{\frac{2}{3}} = 42200 \text{ km}$$

## 2 Câble de section constante

1. Dans le référentiel terrestre, la force d'inertie d'entraînement qui s'exerce sur un élément du câble, de longueur  $dr$  et de masse  $dm$ , situé à la distance  $r$  du centre de la Terre s'écrit  $dm \omega_T^2 r \vec{u}$ .
2. La condition d'équilibre de cet élément de câble projetée sur  $\vec{u}$  s'écrit :

$$T(r+dr) - T(r) - \underbrace{dm \frac{GM_T}{r^2}}_{\text{Poids de l'élément de câble}} + \underbrace{dm \omega_T^2 r}_{\text{force centrifuge}} = 0$$

Comme  $dm = \rho S dr$ ,  $\omega_T^2 = GM_T/R_s^3$  et  $g_0 = GM_T/R_T^2$ , on trouve :

$$T(r+dr) - T(r) - dP(r) = 0$$

où

$$dP(r) = \rho S g_0 R_T^2 \left( \frac{1}{r^2} - \frac{r}{R_s^3} \right) dr$$

$dP(r)$  est le poids apparent de l'élément de câble dans le référentiel terrestre.  $dP(r) = 0$  pour  $r = R_s$ . Sur l'orbite géostationnaire, le poids apparent dans le référentiel terrestre d'un objet est nul. C'est pourquoi un satellite peut y rester immobile par rapport à la terre.

3. Comme l'extrémité du câble sur l'orbite géostationnaire est libre et que le poids apparent d'un élément de câble sur l'orbite géostationnaire est nul, on déduit :

$$T(R_s) = 0$$

D'après ce qui précède :

$$\frac{dT}{dr} = \rho S g_0 R_T^2 \left( \frac{1}{r^2} - \frac{r}{R_s^3} \right)$$

On en déduit :

$$T(r) = \rho S g_0 R_T^2 \left( -\frac{1}{r} - \frac{r^2}{2R_s^3} \right) + \text{Constante}$$

La condition aux limites  $T(R_s) = 0$  permet d'obtenir la valeur de la constante et :

$$T(r) = \rho S g_0 R_T^2 \left( -\frac{1}{r} - \frac{r^2}{2R_s^3} + \frac{3}{2} \frac{1}{R_s} \right)$$

4. On écrit le bilan des forces exercées sur le câble dans le référentiel terrestre. Comme l'extrémité du câble sur l'orbite géostationnaire est libre, il n'est soumis qu'à 2 forces : la force  $-\vec{T}(R_T)$  exercée par la fixation du câble sur la terre et son poids apparent. Le câble étant à l'équilibre dans le référentiel terrestre, on en déduit immédiatement que  $\vec{T}(r = R_T)$  est le poids apparent du câble dans le référentiel terrestre.

L'expression de  $T(r)$  obtenue ci-dessus donne :

$$T(R_T) = \rho S g_0 R_T^2 \left( -\frac{1}{R_T} - \frac{R_T^2}{2R_s^3} + \frac{3}{2} \frac{1}{R_s} \right)$$

S'il se trouvait entièrement dans le champ de pesanteur  $g_0$ , le câble aurait un poids  $P_0 = \rho S(R_s - R_T)g_0$ . On en déduit :

$$T(R_T) = P_0 \frac{R_T^2}{R_s - R_T} \left( -\frac{1}{R_T} - \frac{R_T^2}{2R_s^3} + \frac{3}{2} \frac{1}{R_s} \right) = -P_0 \frac{x}{1-x} \left( 1 + \frac{x^3}{2} - \frac{3x}{2} \right)$$

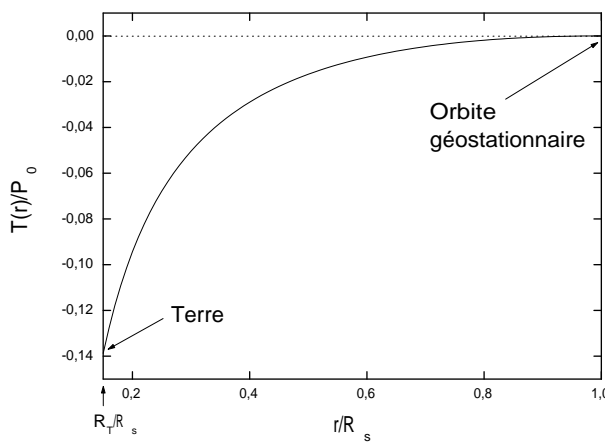
où  $x = R_T/R_s$ .

On a donc :

$$|T(R_T)| = P_0 \frac{x}{1-x} \left( 1 + \frac{x^3}{2} - \frac{3x}{2} \right)$$

Application numérique :  $x \approx 0,15$  et  $|T(R_T)|/P_0 \approx 14\%$ .

5. La figure 2 présente la tension du câble en fonction de  $r$ .



- Figure 2 - Tension d'un câble de longueur  $R_s - R_T$

Le câble est en compression (tension négative). Il y a risque d'effondrement.

6. Le poids apparent d'un élément de longueur du câble situé à  $r > R_s$  est dans le sens de  $\vec{u}$  (la force centrifuge est plus grande que le poids en valeur absolue).
7. Lorsque le poids apparent total du câble est positif, la tension du câble au niveau de la terre est positive (voir question 4). Elle passe par un maximum et s'annule à l'extrémité libre du câble. Le câble est donc partout en tension et le risque d'effondrement a disparu. La valeur limite  $R_0$  correspond donc à l'annulation du poids apparent total du câble. Pour l'obtenir, on écrit donc :

$$\int_{R_T}^{R_0} dP(r) = \int_{R_T}^{R_0} \rho S g_0 R_T^2 \left( \frac{1}{r^2} - \frac{r}{R_s^3} \right) dr = 0$$

soit

$$\left[ -\frac{1}{r} - \frac{r^2}{2R_s^3} \right]_{R_T}^{R_0} = 0$$

$R_0$  est donc solution de l'équation :

$$1 + \frac{R_0^3}{2R_s^3} - \frac{R_0}{R_T} - \frac{R_0 R_T^2}{2R_s^3} = 0$$

Dans le membre de gauche de l'équation précédente, le 2<sup>ème</sup> et le 3<sup>ème</sup> termes sont nettement plus grands que le 1<sup>er</sup> et le 4<sup>ème</sup> (en supposant que  $R_0$  vaut quelques  $R_s$ , ce que l'on vérifiera *a posteriori*).

On a donc :

$$\frac{R_0^3}{2R_s^3} - \frac{R_0}{R_T} \approx 0$$

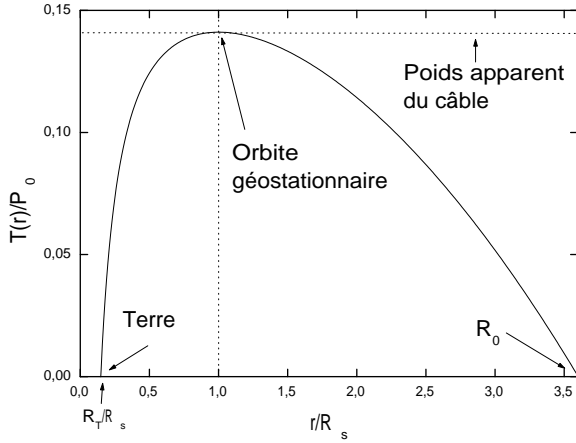


d'où :

$$R_0 \simeq \sqrt{\frac{2R_s^3}{R_T}}$$

Application numérique :  $R_0 \approx 153600\text{km} \approx 3,6 R_s$ , ce qui valide l'hypothèse ci-dessus.

8. La figure 3 présente les variations de la tension d'un câble longueur  $R_0 - R_T$  en fonction de  $r$ .



- Figure 3 - Tension d'un câble de longueur  $R_0 - R_T$

Le maximum  $T_{max}$  de  $T(r)$  est atteint lorsque  $dP(r) = 0$ , c'est à dire sur l'orbite géostationnaire.  $|T_{max}|$  est alors égale au poids apparent dans le référentiel terrestre de la portion de câble  $r < R_s$ .  $T(r)$  s'annule en  $r = R_T$  et  $r = R_0$ .

### 3 Câble de section variable

1. Comme  $S(r) = T(r)/\sigma(r)$  et  $\sigma \leq \sigma_c$ , on doit forcément choisir  $S(r) \geq T(r)/\sigma_c$  si l'on veut éviter la rupture du câble. Pour minimiser la masse du câble, on a intérêt à choisir en tout point la surface minimale donnée par  $S(r) = T(r)/\sigma_c$ . La contrainte dans le câble est alors constante égale à  $\sigma_c$ .

2. En utilisant :

$$\frac{dT}{dr} = \rho S g_0 R_T^2 \left( \frac{1}{r^2} - \frac{r}{R_s^3} \right) \quad \text{et} \quad T(r) = \sigma_c S(r)$$

on trouve immédiatement :

$$\frac{dS}{S(r)} = \frac{R_T^2}{h} \left[ \frac{1}{r^2} - \frac{r}{R_s^3} \right] dr \quad \text{où} \quad h = \frac{\sigma_c}{\rho g_0}$$

$h$  a la dimension d'une longueur.

3. L'intégration de l'équation ci-dessus conduit à :

$$\text{Ln} \frac{S(r)}{S_s} = \frac{R_T^2}{h} \left[ -\frac{1}{r} - \frac{r^2}{2R_s^3} \right]_{R_s}^r$$

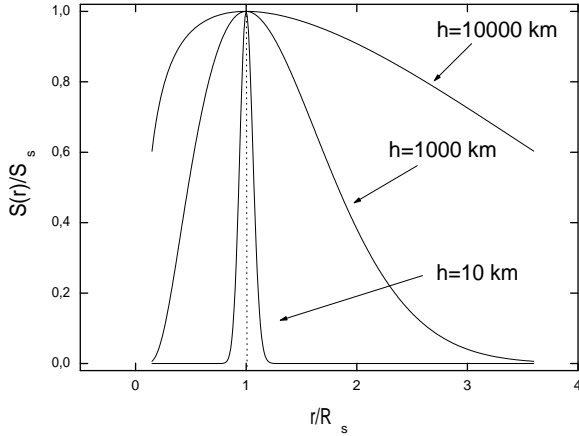
soit :

$$\text{Ln} \frac{S(r)}{S_s} = \frac{R_T^2}{h} \left[ -\frac{1}{r} - \frac{r^2}{2R_s^3} + \frac{3}{2R_s} \right]$$

On en déduit :

$$S(r) = S_s e^{\frac{3R_T^2}{2hR_s}} e^{(-\frac{R_T}{h})\left(\frac{R_T}{r} + \frac{R_T r^2}{2R_s^3}\right)}$$

La figure 4 présente les variations de la surface optimale  $S(r)$  en fonction de  $r$  pour 3 valeurs de  $h$ .  $S(r)$  est maximale sur l'orbite géostationnaire et le rapport d'aspect du câble  $S_s/S_T$ , que l'on étudie quantitativement à la question suivante, est d'autant plus grand que  $h$  est petit.



- Figure 4 - Surface optimale

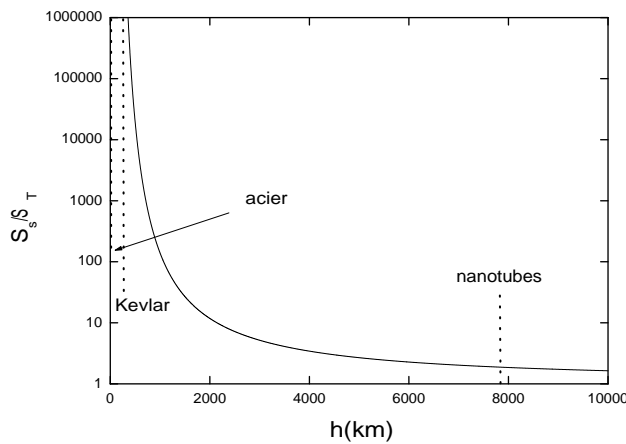
4. De la question précédente, on déduit pour  $r = R_T$  :

$$S_T = S_s e^{\frac{3R_T^2}{2hR_s}} e^{(-\frac{R_T}{h})(1+\frac{R_T^3}{2R_s^3})} = S_s e^{(-\frac{R_T}{h})(1+\frac{R_T^3}{2R_s^3}-\frac{3R_T}{2R_s})}$$

d'où

$$\frac{S_s}{S_T} = e^{\frac{R_T}{h}(1+\frac{R_T^3}{2R_s^3}-\frac{3R_T}{2R_s})} = e^{0,775 \frac{R_T}{h}}$$

La figure 5 présente  $S_s/S_T$  en fonction de  $h$ . Le rapport d'aspect du câble reste raisonnable (de l'ordre de l'unité) lorsque  $h$  est comparable ou supérieur au rayon terrestre  $R_T$ . Il diverge exponentiellement pour les faibles valeurs de  $h$ . On a indiqué sur la figure les valeurs de  $h$  correspondant aux matériaux étudiés dans la partie suivante.



- Figure 5 - Rapport d'aspect du câble

Puisque  $T(r) = \sigma_c S(r)$ ,  $T(r)$  varie exactement comme  $S(r)$ . Les variations de  $T(r)$  sont donc aussi données par la figure 4.

## 4 Choix du matériau

1. Le tableau ci-dessous donne les valeurs de  $h$  pour les différents matériaux considérés.

Matériau	Acier	Kevlar	Nanotubes
$h(\text{km})$	13	246	7840

2. A l'aide des résultats de la partie précédente, on obtient pour le rapport d'aspect  $S_s/S_T$  les valeurs reportées dans le tableau ci-dessous.

Matériau	Acier	Kevlar	Nanotubes
$S_s/S_T$	$\approx 10^{164}$	$5,2 \cdot 10^8$	1,88

Seuls les nanotubes de carbone permettent d'envisager la réalisation d'un tel câble.

3. L'allongement relatif  $\sigma_c/E$  du câble sous contrainte  $\sigma_c$  est donné dans le tableau ci-dessous pour les différents matériaux considérés.

Matériau	Acier	Kevlar	Nanotubes
$\delta l/l$	$5 \cdot 10^{-3}$	0,12	0,1

L'allongement relatif est beaucoup plus important dans le cas du Kevlar et des nanotubes que dans le cas de l'acier.

4. En utilisant  $T(R_T) = \sigma_c S_T$  et  $S_s/S_T = e^{0,775 R_T/h}$ , on calcule, pour  $T(R_T) = 10^6 \text{ N}$  (i.e. à peu près 10 fois le poids d'une masse de 10 tonnes à la surface de la terre), les valeurs suivantes de  $S_T$  et  $S_s$  :

Matériau	Acier	Kevlar	Nanotubes
$S_T (\text{m}^2)$	$10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$10^{-5}$
$S_s (\text{m}^2)$	$\approx 10^{161}$	$1,5 \cdot 10^5$	$1,9 \cdot 10^{-5}$

On constate que seuls les nanotubes de carbone permettent d'envisager la réalisation d'un câble de dimensions raisonnables et suffisamment résistant.

---

## Partie C

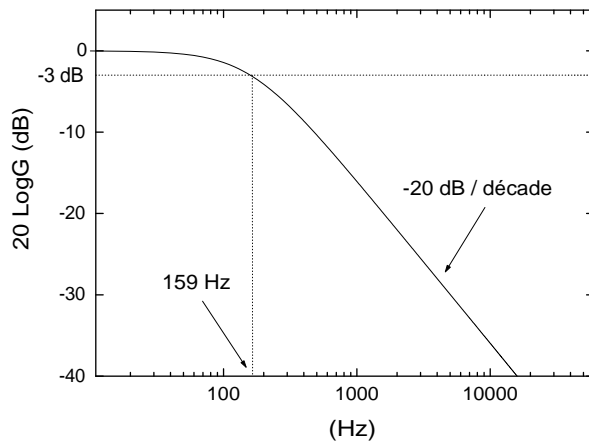
### Electricité : le dipôle $RC$

- Un exemple de séance de travaux pratiques :
  - **Objectifs en termes de savoir acquis**
    - Continuité de la tension  $U_C(t)$  aux bornes du condensateur.
    - Un condensateur se comporte comme un interrupteur ouvert en régime permanent
    - Le temps de réponse  $\tau$  augmente avec proportionnellement avec  $R$  et avec  $C$ . Analyse dimensionnelle pour retrouver  $\tau = RC$ .
  - **Compétences développées**
    - Compétences expérimentales :  
Analyser des résultats expérimentaux.  
Proposer une expérience susceptible de répondre à un objectif précis.
    - Compétences manipulatoires :  
Réaliser un montage à partir d'un schéma.
    - Compétences scientifiques :  
Identifier les paramètres jouant un rôle dans un phénomène physique.  
Utiliser l'analyse dimensionnelle.  
Construire une courbe à partir d'un ensemble de mesures.
  - **Exemple de plan de la séquence**
    - Travail élève :  
Suivi d'un protocole expérimental donné par le professeur : observer  $U_C(t)$  et  $U_R(t)$ , agir sur les différents paramètres du circuit. Tous les élèves n'ont pas obligatoirement les mêmes valeurs de  $R$  et  $C$ .

- Mise en commun :  
 Au bout d'un certain temps  $U_C(t) = E$  et  $U_R(t) = 0$ .  
 A  $t = 0$ ,  $U_C(t)$  est continu,  $U_R(t)$  ne l'est pas.  
 Les valeurs de  $R$  et  $C$  ont clairement un impact sur le temps caractéristique. C'est moins évident pour  $E$ . Il est donc nécessaire de définir une méthode commune de mesure du temps caractéristique.
  - Travail élève :  
 Partage du travail : un groupe travaille sur un paramètre et doit caractériser l'influence de ce paramètre.
  - Travail de synthèse :  
 Continuité de  $uc(t)$ .  
 C se comporte comme un interrupteur ouvert en régime permanent.  
 Le temps de réponse augmente proportionnellement à  $R$  et à  $C$ .  
 Analyse dimensionnelle pour retrouver  $\tau = RC$ .
2. (a) La période  $T$  du signal créneau doit être nettement supérieure à la constante de temps du circuit. En pratique, on doit avoir  $T/2$  de l'ordre de  $5RC$  pour observer convenablement le phénomène, ce qui correspond à une fréquence  $f$  de l'ordre de  $1/(10RC)$ .
  - (b) Pour ces valeurs de fréquences de l'ordre de la centaine de Hertz, on peut considérer que l'entrée de l'oscilloscope est équivalente à une résistance (de l'ordre du  $M\Omega$ ). La petite capacité (de l'ordre de 10 pF) en parallèle de cette résistance joue alors un rôle négligeable.
  - (c) Si la résistance  $R$  est comparable à la résistance d'entrée de l'oscilloscope  $R_{osc}$ , 2 phénomènes se produisent :
    - Le temps caractéristique du circuit n'est plus égal à  $RC$  mais à  $(R//R_{osc})C$ .
    - En régime permanent, la tension observée n'est plus égale à  $E$  mais à  $E R_{osc}/(R + R_{osc})$ .
  - (d)  $R_{max} \sim R_{osc} \sim M\Omega$
  - (e) Le schéma équivalent d'un générateur basse-fréquence est constitué d'un générateur de tension idéal en série avec une résistance, appelée résistance de sortie et notée  $R_{GBF}$ .
  - (f) Si la résistance  $R$  est comparable à  $R_{GBF}$ , 2 phénomènes se produisent :
    - Le temps caractéristique du circuit n'est plus égal à  $RC$  mais à  $(R + R_{GBF})C$ .
    - La tension d'entrée est déformée, ce n'est plus un créneau.
 La résistance de sortie d'un générateur basse fréquence est généralement égale à  $50 \Omega$ .
  - (g) Pour  $R = 10 \text{ k}\Omega$  et  $C = 10 \text{ nF}$ , on a  $\tau = RC = 0,1 \text{ ms}$ . Les choix d'une durée d'acquisition de  $0,7 \text{ ms}$  et d'un temps entre 2 mesures de  $1 \mu\text{s}$  (soit une fréquence d'échantillonnage de 1 MHz) sont raisonnables. Le déclenchement de l'acquisition se fait sur le signal d'entrée et il est souhaitable de choisir le mode avec affichage du signal avant le déclenchement si c'est possible.
3. (a) Pour déterminer qualitativement la nature du filtre, il suffit d'étudier le comportement du circuit aux très basses fréquences ( $f \rightarrow 0$ ) et aux très hautes fréquences ( $f \rightarrow \infty$ ). Dans l'exemple considéré ici, la tension de sortie est prise aux bornes du condensateur d'un circuit  $RC$ . A très basse fréquence, le condensateur est un circuit ouvert et la tension de sortie est égale à la tension d'entrée. A haute fréquence, le condensateur est un court-circuit et la tension de sortie est nulle. On a donc un filtre passe-bas.
  - (b) La fonction de transfert du filtre vaut :

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + jRC\omega} \quad (1)$$

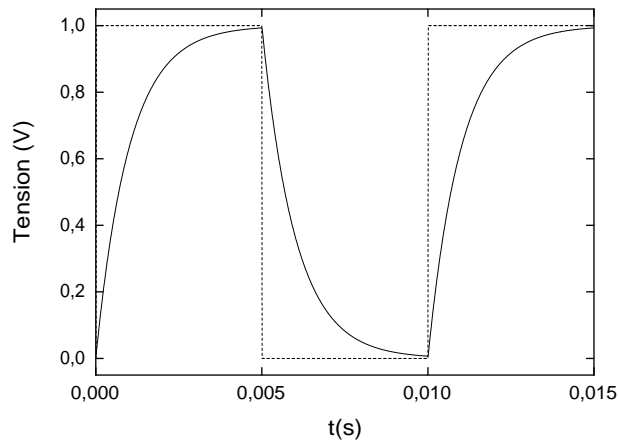
- (c) La figure 6 présente le diagramme de Bode du filtre RC étudié pour  $R = 10 \text{ k}\Omega$  et  $C = 10 \text{ nF}$ .



- Figure 6 - Diagramme de Bode d'un filtre RC passe-bas

Il s'agit d'un filtre passe-bas du premier ordre de fréquence de coupure  $f_c = 1/2\pi RC = 159$  Hz.

- (d) la figure 7 présente la réponse du même circuit à un échelon de tension de fréquence et variant entre 0 et 1 Volt.



- Figure 7 - Réponse d'un filtre RC passe-bas à un échelon de tension

On constate que les phénomènes lents sont conservés que puisque l'on conserve la composante continue du signal : au bout d'un certain temps la tension est constante et non nulle. Par contre les phénomènes rapides ont disparu : la montée brutale de l'échelon de tension a disparu dans la réponse aux bornes de la capacité. On a donc bien un filtre passe bas.

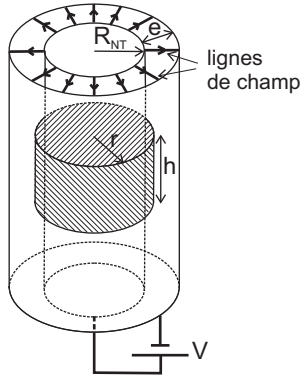
## Partie D

### Transistor à effet de champ à nanotube de carbone unique

#### 1 Ordres de grandeur

##### 1.1 Estimation de la capacité $C$

1. A l'intérieur du condensateur, le champ est radial comme représenté sur la figure 8.



- Figure 8 -

2. L'application du théorème de Gauss à la surface hâchée de la figure 8 (cylindre de rayon  $r$  et de hauteur  $h$ ) conduit à :

$$2\pi r h E(r) = \frac{q_l h}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

d'où

$$E(r) = \frac{q_l}{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r r}$$

3. On en déduit :

$$V = \int_{R_{NT}}^{R_{NT}+e} \frac{q_l}{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r r} dr = \frac{q_l}{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \text{Ln} \left( \frac{R_{NT} + e}{R_{NT}} \right)$$

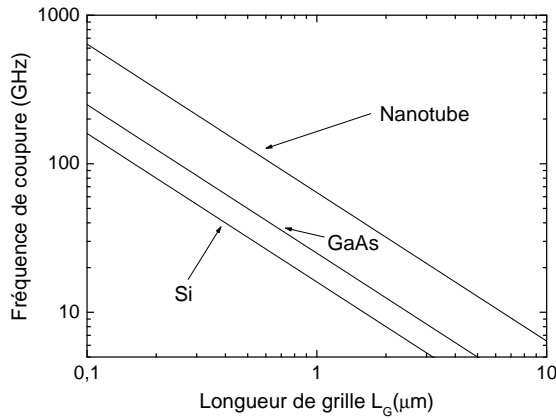
4. La capacité par unité de longueur de l'ensemble nanotube-alumine-grille est donc donnée par :

$$C_l = \frac{q_l}{V} = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\text{ln} \left( \frac{R_{NT} + e}{R_{NT}} \right)}$$

5. *Application numérique* :  $C_l = 180 \text{ aF} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ . Pour une longueur de grille  $L_G = 100 \text{ nm}$ , la capacité vaut  $18 \text{ aF}$ .

##### 1.2 Fréquences caractéristiques

1.  $rC$  et  $C/g$  sont tous deux homogènes à un temps.  
 $\nu_1 = \frac{1}{2\pi rC}$  et  $\nu_2 = \frac{g}{2\pi C}$  sont donc des fréquences. Ce sont les fréquences caractéristiques du NTFET.
2. Pour  $L_G = 100 \text{ nm}$ , on trouve :  $\nu_1 = 3,2 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$  et  $\nu_2 = 6,4 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$ . Lorsque  $L_G$  augmente, la capacité  $C$  augmente et les fréquences  $\nu_1$  et  $\nu_2$  diminuent.
3. La figure 9 compare les fréquences maximales d'utilisation des transistors à effet de champ usuels (Si et GaAs) et celles des NTFET (fréquence  $\nu_2$ ).



- Figure 9 - Fréquence maximale d'utilisation des transistors à effet de champ usuels et des NTFETs

On constate que les transistors à nanotubes ont des fréquences maximales d'utilisation supérieures à celles des transistors usuels.

## 2 Amplificateur à nanotube unique

### 2.1 Gain en tension

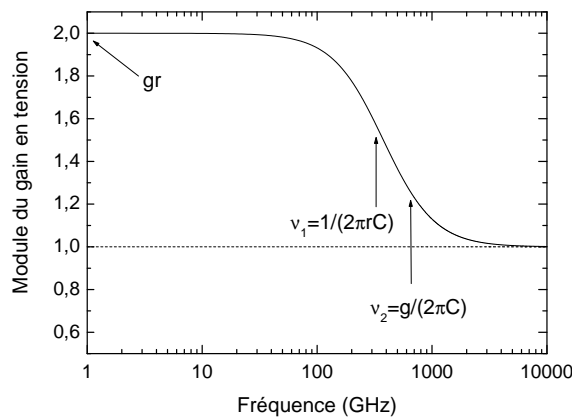
1. Lorsque  $\tilde{i}_D = 0$ , on a :

$$\tilde{v}_G - \tilde{v}_D = \frac{\tilde{i}_G}{jC\omega} \quad \text{et} \quad \tilde{v}_D = r[\tilde{i}_G - g\tilde{v}_G]$$

En éliminant  $\tilde{i}_G$  dans les équations ci-dessus, on déduit :

$$G_V = \left( \frac{\tilde{v}_D}{\tilde{v}_G} \right)_{\tilde{i}_D=0} = \frac{jrC\omega - gr}{jrC\omega + 1} = \frac{1 + j\frac{\nu_2}{\nu}}{1 - j\frac{\nu_1}{\nu}}$$

2. la figure 10 présente  $|G_V|$  en fonction de  $\nu$  pour un NTFET dont la longueur de grille est  $L_G = 100$  nm.



- Figure 10 - Module du gain en tension d'un NTFET ( $L_G = 100$  nm,  $C_l = 50$  aF. $\mu\text{m}^{-1}$ ,  $r = 100$  k $\Omega$ ,  $g = 20$   $\mu\text{S}$ )

Pour  $\nu \ll \nu_1$  et  $\nu_2$ ,  $|G_V| = gr = \frac{\nu_2}{\nu_1}$  (la capacité est alors un circuit ouvert).  
 Pour  $\nu \gg \nu_1$  et  $\nu_2$ ,  $|G_V| = 1$  (la capacité est alors un court-circuit).

3. Le transistor présente un faible gain en tension (de l'ordre de 2 à basse fréquence).

4. Si on branche une faible impédance  $Z_c$  entre drain et source, il faut remplacer  $r$  par  $r//Z_c$  dans l'expression de  $G_V$  obtenue ci-dessus. Si  $r \ll Z_c$ ,  $r//Z_c \approx r$  et le module du gain à basse fréquence vaut  $gZ_c \ll gr$ . On a donc un effondrement du gain. Pour  $Z_c = 50 \Omega$ , on trouve  $|G_V| = 10^{-3} \ll 1$ . Il n'y a plus de gain en tension, au contraire.
5. En connectant entre drain et source un grand nombre de tubes en parallèle entre drain et source, on diminue la résistance  $r$  proportionnellement au nombre de tubes alors que la capacité  $C$  et la transconductance  $g$  augmentent proportionnellement au nombre de tubes. Les performances intrinsèques du transistor sont donc inchangées (fréquences de coupure, gain en l'absence de charge). Par contre, on a résolu le problème soulevé à la question précédente qui était lié à la grande valeur de  $r$ . Pour obtenir  $r = 50 \Omega$ , il faut connecter 2000 nanotubes en parallèle, ce qu'on n'est pas loin de savoir faire à l'heure actuelle.

## 2.2 Gain en courant

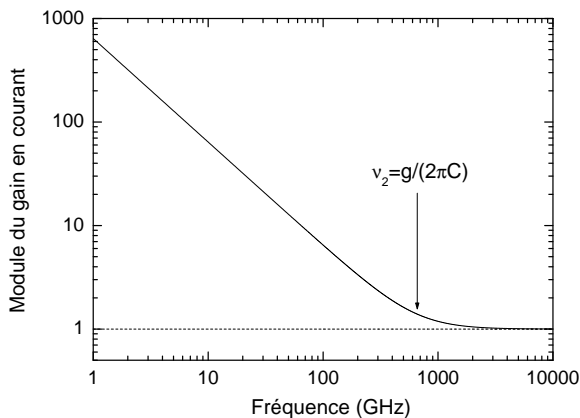
1. Lorsque  $Z_c = 0$ , on a :

$$\tilde{v}_D = 0 \quad , \quad \tilde{i}_G + \tilde{i}_D = g\tilde{v}_G \quad \text{et} \quad \tilde{i}_G = jC\omega\tilde{v}_G$$

En éliminant  $v_G$  dans les équations précédentes, on obtient :

$$G_I = \left( \frac{\tilde{i}_D}{\tilde{i}_G} \right)_{\tilde{v}_D=0} = \frac{g}{jC\omega} - 1 = -1 - j\frac{\nu_2}{\nu}$$

2. La figure 11 présente  $|G_I|$  en fonction de  $\nu$  pour un NTFET dont la longueur de grille est  $L_G = 100 \text{ nm}$ .



- Figure 11 -Module du gain en courant d'un NTFET ( $L_G = 100 \text{ nm}$ ,  $C_l = 50 \text{ aF} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ,  $r = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $g = 20 \mu\text{S}$ )

La résistance  $r$  n'intervient pas dans l'expression de  $G_I$  car elle n'est traversée par aucun courant ( $\tilde{v}_D = 0$ ). Pour  $\nu \gg \nu_2$ , la capacité est un court-circuit et  $\tilde{v}_G = \tilde{v}_D = 0$ , on a alors  $\tilde{i}_G = -\tilde{i}_D$ . A fréquence  $\nu \ll \nu_2$ , l'impédance de la capacité est très grande et  $\tilde{i}_D = g\tilde{v}_G = g/jC\omega\tilde{i}_G = -j\frac{\nu_2}{\nu}\tilde{i}_G$ .

3. Le NTFET présente un fort gain en courant à basse fréquence avec une fréquence de coupure égale à  $\nu_2$ . Les applications possibles sont les applications usuelles des amplificateurs de courant en particulier l'utilisation en commutation pour les dispositifs logiques.

## 3 Application à la détection de charge

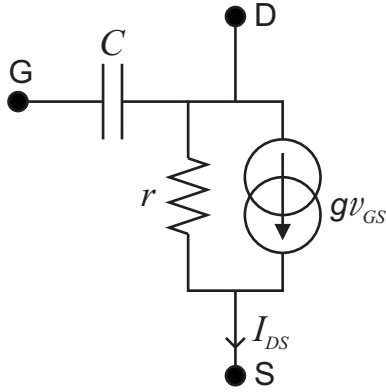
1. On a  $I_{DS} = \frac{N_\tau e}{\tau}$  donc  $N_\tau = \frac{I_{DS}\tau}{e}$ .



2. Le schéma équivalent du NTFET présenté figure 12 montre que :

$$V_{GS} = \frac{q}{C} + V_{DS}$$

où  $q$  est la charge électrique de la grille.



- Figure 12 -

On suppose que les variations de  $q$  et donc de  $V_{GS}$  sont lentes par rapport aux fréquences  $\nu_1$  et  $\nu_2$ . On a alors  $V_{GS} \approx \frac{q}{C}$ . On en déduit :

$$\delta V_{GS} = \frac{\delta q}{C}$$

d'où :

$$\delta I_{DS} = g \delta V_{GS} = g \frac{\delta q}{C}$$

D'après la question précédente, on a donc :

$$\delta N_\tau = \delta I_{DS} \frac{\tau}{e} = \frac{g}{eC} \delta q \tau$$

On en déduit :

$$\frac{\delta N_\tau e}{\delta q} = \frac{g}{C} \tau = 2\pi \nu_2 \tau = \omega_2 \tau$$

*Application numérique* : pour  $\nu_2 = 100$  GHz et pour une variation de la charge de la grille  $\delta q$  égale à la charge élémentaire  $e$  on trouve que la variation du nombre d'électrons qui traversent le nanotube en un temps  $\tau = 10^{-9}$  s vaut  $\delta N_\tau = 628$  électrons.

3. On a :

$$\frac{\delta N_\tau}{\Delta N_\tau} = \frac{\delta N_\tau}{\sqrt{N_\tau}} = \frac{\omega_2 \tau \frac{\delta q}{e}}{\sqrt{\frac{I_{DS} \tau}{e}}} = \omega_2 \delta q \sqrt{\frac{\tau}{e I_{DS}}}$$

Le rapport signal sur bruit de la mesure de  $\delta q$  vaut  $\frac{\delta N_\tau}{\Delta N_\tau}$ . Si on admet que l'on sait détecter une charge  $\delta q$  si le rapport signal sur bruit vaut 1, on trouve que la plus petite charge détectable est :

$$\delta q_{min} = \frac{1}{\omega_2} \sqrt{\frac{e I_{DS}}{\tau}} = e \frac{C}{g} \sqrt{\frac{I_{DS}}{e \tau}}$$

*Application numérique* : Pour  $\nu_2 = 100$  GHz,  $I_{DS} = 10 \mu A$  et  $\tau = 1$  ns, on trouve  $\delta q_{min}/e = 0,4$ . On a donc réalisé un électromètre extrêmement sensible capable de détecter une fraction de la charge électronique en une nanoseconde.

---

## Partie E

### Écoulement d'eau à travers un nanotube de carbone

#### 1 Écoulement de Poiseuille

1. L'équation de conservation de la masse s'écrit :

$$\operatorname{div} \rho \vec{v} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

Lorsque le fluide est incompressible  $\rho$  est constant de sorte que :

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0$$

Un champ de vitesse de la forme  $v(r) \vec{u}_z$  vérifie l'équation ci-dessus.

Le fluide peut être considéré comme incompressible si la vitesse caractéristique de l'écoulement reste très inférieure à la vitesse du son dans le milieu.

2. L'origine microscopique de la force de viscosité est la diffusion de la quantité de mouvement du fluide.
3. La résultante des forces de viscosité qui s'exercent sur l'élément de fluide considéré s'écrit :

$$d^3 \vec{F} = \underbrace{-\eta \frac{dv}{dr}(r) r d\theta dz \vec{u}_z}_{\text{force exercée par le fluide situé entre 0 et } r} + \underbrace{\eta \frac{dv}{dr}(r+dr) (r+dr) d\theta dz \vec{u}_z}_{\text{force exercée par le fluide situé au delà de } (r+dr)}$$

On en déduit :

$$d^3 \vec{F} = \eta d \left( r \frac{dv}{dr} \right) d\theta dz \vec{u}_z = \eta \frac{d}{dr} \left( r \frac{dv}{dr} \right) d\theta dz dr \vec{u}_z$$

Le volume de l'élément de fluide considéré s'écrit  $rd\theta dz dr$  de sorte que la densité volumique de force de viscosité s'écrit :

$$\frac{d^3 \vec{F}}{rd\theta dz dr} = \frac{\eta}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dv}{dr} \right) \vec{u}_z$$

4. Dans l'équation de Navier Stokes, le terme  $(\vec{v} \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}}) \vec{v}$  est l'accélération correspondant à la variation de vitesse associée à l'exploration du champ de vitesse par la particule de fluide au cours de son mouvement. Le terme  $-\overrightarrow{\operatorname{grad}}P$  correspond aux forces de pression tandis que le terme  $\frac{\eta}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dv}{dr} \right) \vec{u}_z$  représente les forces de viscosité.
5. Comme  $\vec{v} = v(r) \vec{u}_z$ ,  $(\vec{v} \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}}) \vec{v} = v(r) \frac{\partial}{\partial z} (v(r) \vec{u}_z) = \vec{0}$ .

On déduit alors de l'équation de Navier Stokes que  $\overrightarrow{\operatorname{grad}}P$  est colinéaire à  $\vec{u}_z$  et que  $P$  ne dépend donc que de  $z$ . Comme  $v$  ne dépend que de  $r$ , l'équation de Navier Stokes montre également que  $\overrightarrow{\operatorname{grad}}P$  est indépendant de  $z$ .

On a donc :

$$\frac{dP}{dz} = \frac{P(z=L) - P(z=0)}{L} = -\frac{\Delta P}{L}$$

La pression décroît linéairement dans le tube.

6. L'équation de Navier Stokes s'écrit :

$$\frac{\Delta P}{L} + \frac{\eta}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dv}{dr} \right) = 0$$

En intégrant l'équation ci-dessus, on obtient :

$$r \frac{dv}{dr} = -\frac{\Delta P}{2\eta L} r + \text{constante}$$

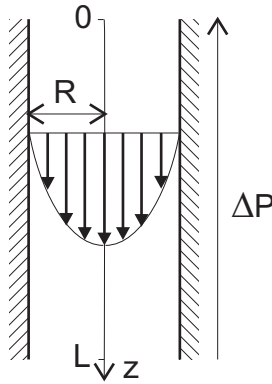
Comme  $\frac{dv}{dr}$  doit rester fini pour  $r = 0$  la constante d'intégration est nulle de sorte que :

$$r \frac{dv}{dr} = -\frac{\Delta P}{2\eta L} r$$

Une nouvelle intégration et la prise ne compte de la condition aux limites  $v(R) = 0$  conduit à :

$$v(r) = -\frac{\Delta P}{4\eta L} (r^2 - R^2)$$

Le profil de vitesse est représenté schématiquement sur la figure 13.



- Figure 13 -Écoulement de Poiseuille : profil de vitesse

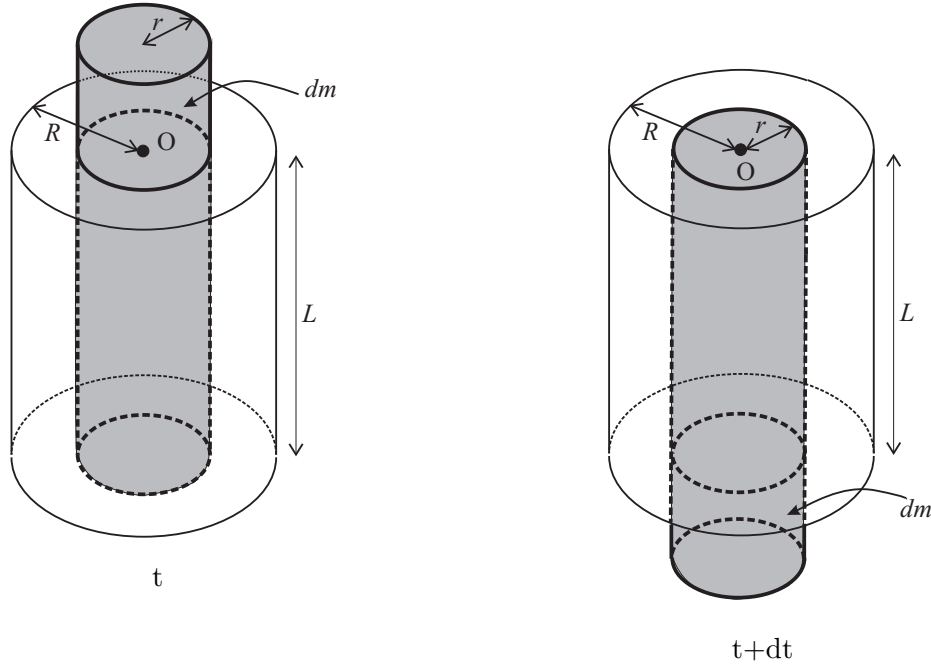
Le débit volumique de l'écoulement est donné par :

$$D = \int_0^R 2\pi r dr v(r) = -\frac{2\pi\Delta P}{4\eta L} \left[ \frac{r^4}{4} - \frac{R^2}{2r^2} \right]_0^R = \frac{\Delta P}{8\eta L} \pi R^4$$

La vitesse moyenne d'une particule du fluide est :

$$\bar{v} = \frac{D}{\pi R^2} = \frac{\Delta P}{8\eta L} R^2$$

7.  $D$  varie comme  $R^4$ , c'est à dire comme la section du tube au carré. Ainsi, pour une même différence de pression, le débit induit dans 100 tubes de rayon  $R/10$  est 100 fois plus faible que celui dans un tube de rayon  $R$ , alors que les deux dispositifs ont la même section. Ce résultat est très différent de celui obtenu pour le transport du courant électrique où, dans l'exemple précédent, on obtiendrait la même résistance. La différence entre les 2 problèmes vient de la condition aux limites de vitesse nulle sur les parois pour l'écoulement d'un fluide visqueux, qui n'existe pas pour le courant électrique. A cause de cette condition, les gradients de vitesse et, par suite, les forces de frottement visqueuses augmentent fortement quand la taille des tubes diminue.
8. La figure 14 présente le système fermé considéré aux instants  $t$  et  $t + dt$ .



- Figure 14 -

Comme le champ des vitesses ne dépend que de  $r$  (il ne dépend ni de  $z$ , ni de  $t$ ),  $\vec{p}(t) = \vec{p}(t+dt)$ .

Les actions mécaniques extérieures qui agissent sur le système étudié sont :

- les forces de pression de résultante :  $(P(z=0) - P(z=L)) \pi r^2 \vec{u}_z$
- les forces de viscosité exercées par le reste du fluide :  $\eta \frac{dv}{dr} 2\pi r L \vec{u}_z$

Le théorème de la résultante cinétique appliqué au système étudié s'écrit :

$$\vec{p}(t+dt) - \vec{p}(t) = \left[ (P(z=0) - P(z=L)) \pi r^2 \vec{u}_z + \eta \frac{dv}{dr} 2\pi r L \vec{u}_z \right] dt = \vec{0}$$

ce qui conduit immédiatement à :

$$\frac{dv}{dr} = - \frac{(P(z=0) - P(z=L))}{2\eta L} r = - \frac{\Delta P}{2\eta L} r$$

9. Le nombre de Reynolds est un nombre sans dimension qui caractérise l'importance relative du transport de quantité de mouvement par convection et par diffusion visqueuse. Dans un écoulement à faible nombre de Reynolds, les forces visqueuses et le transport diffusif associé sont dominants. Il s'agit d'écoulements très stables aux profils bien définis. Au contraire, dans les écoulements à grand nombre de Reynolds, le transport de quantité de mouvement par convection est dominant. Il conduit à des écoulements beaucoup moins stables, souvent turbulents. Dans la géométrie considérée ici, le terme convectif est nul, quelque soit le nombre de Reynolds tant que l'écoulement reste parallèle ou laminaire (avec une seule composante de la vitesse non nulle). Néanmoins, à fort nombre de Reynolds, ce type d'écoulement devient instable et il se développe des écoulements turbulents dont les champs de vitesse sont beaucoup plus complexes.

## 2 Analyse des résultats expérimentaux

1. On trouve  $D = 1,3 \cdot 10^{-23} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .
2. Le nombre de molécules d'eau par unité de volume de l'eau liquide vaut :

$$n = \frac{\rho \times \mathfrak{N}}{\text{masse d'une mole}} = \frac{10^3 \times 6,02 \cdot 10^{23}}{18 \cdot 10^{-3}} \approx \frac{1}{3} \cdot 10^{29} \text{ m}^{-3}$$

On en déduit la distance moyenne entre molécules d'eau dans l'eau liquide :

$$\bar{d} = \frac{1}{\sqrt[3]{n}} \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

3. Le nombre de molécules qui traversent un nanotube par unité de temps est donc :

$$\frac{D}{\bar{d}^3} = nD \approx 4,3 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$$

soit  $4,3 \cdot 10^{-4}$  molécules par nanoseconde.

Cette valeur est environ mille fois inférieure à la valeur mesurée. On peut douter de la pertinence du modèle hydrodynamique dans une situation où le diamètre du tube vaut seulement quelques distances intermoléculaires.

## 6. RAPPORT RELATIF A LA COMPOSITION DE PHYSIQUE

La composition de physique abordait trois aspects essentiels de la physique des nanotubes de carbone. Ces macromolécules, aux propriétés électriques et mécaniques fascinantes, ont été découvertes en 1991 et la liste de leurs applications potentielles ne cesse de s'enrichir.

- La partie B, concernait leurs propriétés mécaniques. Dans cette partie, on envisageait la réalisation d'un ascenseur spatial reliant la terre à un satellite géostationnaire. Même si cette réalisation, imaginée dès les années 1950, reste encore du domaine de la science fiction, elle a connu récemment un regain d'intérêt puisque seuls les nanotubes de carbone s'avèrent avoir les propriétés mécaniques nécessaires pour l'envisager.
- La partie D concernait les propriétés électriques des nanotubes de carbone, à partir desquels on sait fabriquer des transistors depuis le début des années 2000. On s'intéressait ici à l'utilisation prometteuse de tels transistors pour la détection de charge ultra-sensible et ultra-rapide.
- Enfin, la partie E concernait l'utilisation de nanotubes de carbone pour la réalisation de nanopores. On s'y intéressait en particulier à l'écoulement de fluide dans un nanotube de carbone.

Par ailleurs, deux parties avaient pour objectif d'évaluer les capacités professionnelles des candidats, la partie A intitulée *Astronomie au lycée* et la partie C intitulée *Electricité : le dipôle RC*.

### COMMENTAIRES GENERAUX

Même si le jury a eu le plaisir de corriger quelques très bonnes copies, le niveau général des copies est décevant. Les parties B, D et E, de type problème de physique, n'ont été que rarement abordées de manière satisfaisante. Pourtant, même si la physique des nanotubes de carbone est un domaine de proue de la physique de la matière condensée actuelle, les parties B, D et E faisaient respectivement intervenir des concepts simples et classiques de mécanique du point, d'électricité et d'hydrodynamique. Elles étaient dénuées de difficultés calculatoires et les étapes intermédiaires des différents raisonnements étaient largement détaillées. Le jury regrette que seul un petit nombre de candidat ait su appliquer aux problèmes posés des connaissances élémentaires, par ailleurs exigées pour la leçon de physique. Afin de faciliter la progression dans chaque partie, beaucoup de résultats intermédiaires étaient donnés par l'énoncé. Il est clair dans ces conditions que les correcteurs ont prêté une attention particulière à la rigueur avec laquelle ces résultats ont été établis. Il va aussi de soi qu'ils ont valorisé les copies faisant apparaître une progression linéaire dans les différentes parties plutôt qu'une chasse aux points sans démarche scientifique.

De manière surprenante, les parties A et C évaluant les capacités professionnelles n'ont pas connu beaucoup plus de succès. Lorsqu'il est demandé de proposer une activité ou une séquence, le jury attend du candidat qu'il explicite clairement les objectifs en termes de savoir à acquérir au cours de la séance, mais aussi les compétences que l'élève développera au cours des activités proposées par le professeur. Le jury est aussi sensible à la part d'autonomie qui est laissée à l'élève. Cette autonomie est caractérisée par le cadre de travail fixé par le professeur. Il ne s'agit pas de laisser les élèves sans consigne pour qu'ils retrouvent ce que des physiciens ont mis des siècles à construire. A contrario l'autonomie ne peut se réduire au suivi d'un protocole suivi d'un questionnaire fermé pour l'interprétation de l'expérience. Il s'agit d'identifier clairement au cours de la séance les moments au cours desquels, dans un cadre fixé par le professeur, l'élève va pouvoir développer des compétences propres au domaine scientifique.

Le jury rappelle qu'il attend de candidats une réflexion scientifique et une capacité à prendre du recul par rapport aux résultats obtenus ou aux affirmations prononcées. Que penser d'une orbite de satellite

*Document 6 Agrégation interne de sciences physiques 2009 : rapport relatif à la composition de physique*

géostationnaire de rayon 900 m ? d'un transit de Vénus associé au passage de Vénus entre la Terre et la Lune ? d'un professeur de physique situant Newton au 20<sup>ème</sup> siècle ou mieux encore Tycho Brahé au 21<sup>ème</sup> siècle ?

Le jury tient également à signaler que la qualité de la rédaction, de l'orthographe ou de l'écriture de certaines copies n'est pas acceptable de la part de professeurs en exercice, certainement très exigeants avec leurs propres élèves sur ce point.

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

Le jury propose ci-dessous quelques remarques spécifiques aux questions qui ont été les plus abordées. Il invite également les candidats à consulter le corrigé de l'épreuve joint à ce rapport.

### **QUELQUES REMARQUES PARTICULIERES**

#### **Partie A - Astronomie au lycée**

Cette partie a été régulièrement traitée par les candidats et le jury a pu lire de très bonnes copies.

**Question 1 :** De nombreux candidats placent Kepler après Newton. Certes les lois de Kepler peuvent être déduites des lois de Newton mais la force de Kepler est de les avoir écrites avant que Newton énonce les lois qui portent son nom. Le jury rappelle que Pluton fait toujours partie du système solaire, même si cet astre a été « déchu » de son statut de planète. Certains candidats annoncent en effet que Pluton a été exclu, voire éjecté, du système solaire.

**Question 2 :** Le fait que le transit de Vénus ait permis de refaire l'expérience de la mesure de l'unité astronomique est peu connu des candidats, cet aspect a pourtant été médiatisé en 2004. **Question 3 :** Cette question a été assez bien traitée ; pour le bilan de l'activité sur le mouvement de la lune, le jury attend des réponses précises, telles qu'elles doivent figurer dans le cahier de l'élève.

**Question 4 :** Cette question a été régulièrement traitée. On peut regretter que certains candidats se contentent de donner un plan de la séquence sans en préciser les objectifs ni les pré-requis. Le tableau de valeurs qui devait servir de support est peu exploité. Au mieux il est utilisé en fin de séquence pour effectuer quelques applications numériques. Lorsqu'il est demandé de faire le calcul explicite de la masse de la Terre et du Soleil, le jury attend une démonstration complète compatible avec les exigences de terminale.

#### **Partie B – Réalisation d'un ascenseur spatial**

Cette partie a été régulièrement traitée par les candidats et le jury a pu lire de très bonnes copies.

**Question 1.1 :** Si beaucoup de candidats précisent que l'orbite d'un satellite géostationnaire est circulaire, nombreux sont ceux qui oublient de la situer dans le plan équatorial.

**Question 1.2 :** Le jury a été attentif au choix du référentiel d'étude qui doit absolument être explicité dans une question de ce type.

**Question 1.3 :** La différence entre jour solaire et jour sidéral n'est pas toujours bien comprise.

**Question 2.2 :** Là encore, le choix du référentiel d'étude a posé problème à de nombreux candidats. La notion de poids apparent est rarement évoquée.

#### **Partie C : Electricité : circuit RC**

**Question 1 :** Cette partie a été assez décevante sur le plan de l'évaluation des compétences professionnelles. La lecture des copies a donné l'impression que les séances de travaux pratiques avaient pour objectif essentiel voire unique de développer des compétences manipulatoires. Tel que le sujet était formulé (*Proposer une séance de travaux pratiques **introductive** aux dipôles RC*), le jury attendait que le candidat travaille des compétences comme la capacité à concevoir un protocole expérimental pour répondre à une question précise ou la capacité à analyser et traiter des résultats expérimentaux. Les objectifs en terme de savoirs acquis restent essentiellement manipulatoires alors qu'une séance de travaux pratiques introductive sur les circuits RC permet aussi de mettre en place des savoirs (continuité de la tension aux bornes de C, dépendance de la constante de temps avec R et C, constante de temps indépendante de la tension du générateur...). Ces éléments méritent d'être soulignés en fin de séance de travaux pratiques.

Dans l'organisation de la séance de travaux pratiques, le jury veille à ce que celle-ci soit compatible avec les objectifs affichés et les compétences travaillées. Le jury est aussi sensible à la part d'autonomie (cf. commentaires généraux) laissée au candidat ainsi qu'à un travail de synthèse final qui explicite ce qui a été acquis au cours de cette séance.

**Question 2 :** L'influence des appareils sur un montage n'est pas toujours bien perçue. L'objectif essentiel de cette question était de voir l'influence de l'oscilloscope et du générateur sur les mesures faites.

**Question 3 :** Cette question a généralement bien été traitée. Le lien entre la réponse fréquentielle et la réponse temporelle (question d) est rarement bien perçu.

#### **Partie D – Transistor à effet de champ à nanotube de carbone unique**

**Question 1.1 :** Cette question a souvent été traitée. Le jury a été attentif aux problèmes de signe dans l'application du théorème de Gauss pour le calcul de la capacité.

**Question 1.2 :** Cette question a souvent été traitée correctement.

**Question 2.1 :** L'expression correcte du gain en tension n'a été que très rarement établie.

**Question 2.2 :** Les quelques candidats qui ont obtenu la bonne expression du gain en courant n'ont pas su commenter la courbe obtenue ni mentionner les applications potentielles d'un tel amplificateur de courant.

**Question 2.3 :** Cette partie a souvent été abordée, mais les résultats numériques obtenus n'ont été que rarement commentés de manière pertinente.

#### **Partie E – Ecoulement d'eau à travers un nanotube de carbone**

Cette partie était très proche d'un cours d'hydrodynamique de classe préparatoire.

**Question 1.1 :** La condition pour qu'un fluide puisse être considéré comme incompressible lors d'un écoulement n'est pratiquement jamais connue.

**Question 1.2 :** L'origine physique microscopique des forces de viscosité n'est que très rarement attribuée à la diffusion de quantité de mouvement.

**Question 1.5 :** Des difficultés techniques ont souvent été rencontrées dans la manipulation de l'opérateur  $\vec{v} \cdot \text{grad}$ .

**Questions 1.6 à 1.7 :** Ces questions ont été relativement bien traitées par les candidats qui les ont abordées.

**Question 1.9 :** La signification physique du nombre de Reynolds est rarement correctement donnée.



SESSION 2009

**CONCOURS INTERNE  
DE RECRUTEMENT DE PROFESSEURS AGRÉGÉS  
ET CONCOURS D'ACCÈS A L'ÉCHELLE DE RÉMUNÉRATION**

Section : SCIENCES PHYSIQUES  
Option : PHYSIQUE ET CHIMIE

**COMPOSITION AVEC EXERCICES D'APPLICATION**

Durée : 5 heures

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

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

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

*De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.*

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

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

## CHIMIE ET AVENIR

Omniprésente dans notre quotidien comme dans presque tous les domaines de réalisation industrielle, la chimie se doit de relever les défis environnementaux du monde actuel, pour assurer du mieux possible l'avenir de la planète. La médecine et la pharmacologie doivent aussi une partie de leurs progrès à ceux de la chimie, qui contribue donc indirectement à l'avenir des hommes.

Nous aborderons dans ce sujet quelques aspects de l'analyse de l'environnement, des procédés de recyclage ou de destruction non polluante de produits chimiques et enfin une synthèse organique d'hétérocycles présentant des applications thérapeutiques potentielles.

Ces différentes parties sont indépendantes.

### DONNEES

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

$$(RT/F)\ln 10 = 0,06 \text{ V à } 298 \text{ K}$$

$$N = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

CNTP (conditions normales de température et pression) : 0 °C et 1 bar

Les gaz seront considérés comme parfaits et les phases condensées non miscibles entre elles.

Masses molaires ( $\text{g.mol}^{-1}$ ):

H	C	O	Cl	Si	S	Br
1	12	16	35,5	28	32	80

Potentiels standard à 298 K et  $\text{pH} = 0$  :

Couple	$\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})/\text{H}_2\text{O}(\text{liq})$	$\text{O}_2(\text{g})/\text{H}_2\text{O}(\text{liq})$	$\text{O}_2(\text{g})/\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$	$\text{Hg}^{2+}(\text{aq})/\text{Hg}(\text{liq})$
$E^\circ(\text{V})$	1,77	1,23	0,69	0,85

$\text{Cd}^{2+}(\text{aq})/\text{Cd}(\text{s})$	$\text{Fe}^{2+}(\text{aq})/\text{Fe}(\text{s})$	$\text{Fe}^{3+}(\text{aq})/\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$	$\text{Ni}^{2+}(\text{aq})/\text{Ni}(\text{s})$	$\text{Sn}^{4+}(\text{aq})/\text{Sn}^{2+}(\text{aq})$
-0,40	-0,44	0,77	-0,25	0,15

$\text{MnO}_2(\text{s})/\text{Mn}^{2+}(\text{aq})$	$\text{Mn}^{2+}(\text{aq})/\text{Mn}(\text{s})$	$\text{Cu}^{2+}(\text{aq})/\text{Cu}(\text{s})$	$\text{Pb}^{2+}(\text{aq})/\text{Pb}(\text{s})$
1,23	-1,17	0,34	-0,13

Produits de solubilité à 298 K :

$$\text{pK}_{s1}(\text{Fe}(\text{OH})_2) = 15$$

$$\text{pK}_{s2}(\text{Fe}(\text{OH})_3) = 38$$

Constantes de stabilité de complexes à 298 K :

$$\log \beta_1([\text{FeSO}_4]) = 2,5$$

$$\log \beta_2([\text{FeSO}_4]^+) = 4,0$$

Constantes d'acidité à 298 K :

$\text{H}_2\text{SO}_4$  : première acidité forte puis  $\text{pK}_{a2} = 2,0$

Grandeurs thermodynamiques à 298 K :

	SiC(s)	SiO <sub>2</sub> (liq)	C(graphite)	CO(g)
$\Delta_f H^\circ (\text{kJ.mol}^{-1})$	-65	-903		-111
$S^\circ (\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1})$	17	46	6	198

## PREMIERE PARTIE ACCUMULATION DES POLLUANTS DANS LES MILIEUX NATURELS

Pour décrire l'accumulation d'une substance dans un milieu biologique déterminé, on utilise le *facteur de bioaccumulation* (FBC) défini comme le rapport (sans dimension) de la concentration ou teneur en un composé dans un être vivant sur la concentration ou teneur en ce même composé dans le milieu environnant.

### I. Cas du mercure

Le mercure est présent sous différentes formes, à l'état métallique, comme à d'autres degrés d'oxydation, sous forme de sulfures, séléniures, organométalliques.

Etres vivants	Animaux marins invertébrés	Poissons marins	Plantes marines
FBC	$10^5$	$10^4$	$10^3$

En moyenne dans l'eau de mer, la concentration en élément mercure est de  $0,03 \mu\text{g.L}^{-1}$ .  
La masse volumique moyenne de l'eau de mer est de  $1030 \text{ kg.m}^{-3}$ .

I.1. Quels sont les trois facteurs dont dépend la masse volumique de l'eau de mer ?

I.2. Calculer la teneur massique moyenne (mg/kg) en mercure dans les poissons de mer.

#### I.3. Détermination de la concentration en mercure dans l'eau

Une méthode courante est la suivante : l'échantillon contenant du mercure est décomposé dans un mélange chaud d'acide nitrique et acide sulfurique pour obtenir des sels de mercure (II) que l'on soumet ensuite à l'action des ions  $\text{Sn}^{2+}$ . Le mercure formé est vaporisé et détecté par le spectrophotomètre d'absorption atomique réglé à  $253,7 \text{ nm}$ . L'absorbance est directement proportionnelle à la concentration.

I.3.1. Donner la structure électronique fondamentale de valence de l'atome de mercure, sachant qu'il se trouve dans la dernière colonne des éléments de transition et dans la sixième période.

I.3.2. Quelle propriété physique particulière du mercure explique à la fois sa présence dans l'atmosphère et la possibilité de travailler en spectroscopie atomique à vapeur froide ?

I.3.3. Calculer la constante d'équilibre de la réaction des ions  $\text{Sn}^{2+}$  avec les ions  $\text{Hg}^{2+}$ , à  $298 \text{ K}$ . Commenter le résultat.

I.3.4. Acide nitrique, acide sulfurique et schémas de Lewis

I.3.4.1. Afin d'amener un étudiant de première année d'études post-baccalauréat à écrire correctement un schéma de Lewis de la molécule d'acide nitrique  $\text{HNO}_3$ , et sans dénombrer les paires d'électrons, on peut lui proposer de commencer par écrire une structure de Lewis du monoxyde d'azote,  $\text{NO}$ .

a. Donner la formule de Lewis du monoxyde d'azote.

b. Quelles formules de Lewis peut-on successivement demander à l'étudiant pour l'amener à écrire celle de  $\text{HNO}_3$  en n'ajoutant qu'un atome à chaque étape ? Il est demandé de rédiger à la fois les questions posées et les réponses attendues.

c. Indiquer en quoi cette démarche pourrait être l'occasion d'enrichir la notion de liaison covalente acquise en seconde et d'aborder le formalisme des flèches pour symboliser les déplacements d'électrons.

#### I.3.4.2. Acide sulfurique et dérivés soufrés

- a. Peut-on proposer une démarche similaire pour aboutir à la structure de la molécule d'acide sulfurique ? Pourquoi ?
- b. L'écriture du schéma de Lewis de l'ion thiosulfate,  $S_2O_3^{2-}$ , par les étudiants conduit parfois à des structures linéaires avec notamment des enchaînements O-O. Proposer une démarche utilisant l'étymologie du nom de cet anion pour aider les étudiants à retrouver facilement une structure de Lewis acceptable.

#### I.3.5. Afin d'éviter que le mercure ne se fixe sur les parois, les échantillons sont préparés dans des flacons en Téflon<sup>®</sup>, c'est-à-dire en polytétrafluoroéthylène (PTFE).

I.3.5.1. Rappeler le bilan, les conditions opératoires et le mécanisme de la polymérisation radicalaire du tétrafluoroéthylène.

I.3.5.2. Une polymérisation radicalaire donne lieu à de nombreuses réactions de transfert.

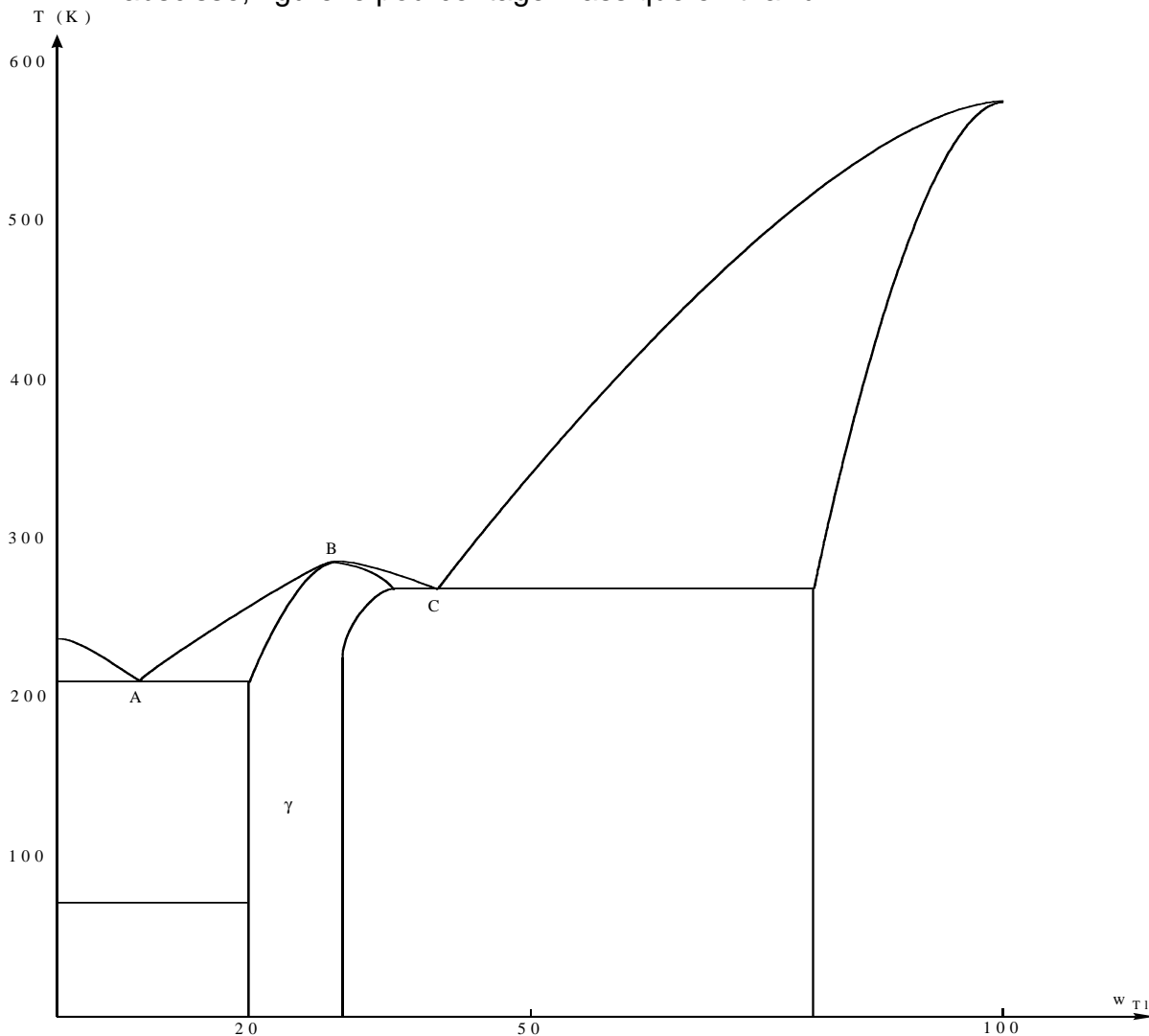
- a. Qu'appelle-t-on réaction de transfert ?
- b. Quelle est la conséquence de ces transferts sur la nature de la chaîne polymère ?
- c. La chaîne polymère de PTFE est parfaitement linéaire : que peut-on en déduire sur les réactions de transferts dans ce cas, ainsi que sur la force de la liaison C-F ?
- d. Compte tenu de cette parfaite linéarité, le PTFE est-il amorphe, faiblement cristallin ou très cristallin ? Donner l'allure de la courbe d'évolution du module d'Young en fonction de la température pour un matériau amorphe et pour un matériau semi-cristallin.
- e. Comment expliquer simplement en termes de comportement des chaînes le phénomène de transition vitreuse et le phénomène de fusion ?

#### I.4. Une origine du mercure : les alliages

Le mercure peut s'associer à de nombreux éléments, formant des alliages intéressants (semi-conducteurs, liquides pour thermomètres...).

On se propose d'étudier ici les mélanges binaires liquide-solide mercure-thallium, dont le comportement est donné dans le diagramme isobare ( $P = 1 \text{ bar}$ ) ci-dessous.

En abscisse, figure le pourcentage massique en thallium.



Coordonnées des points remarquables :

A(8,6 ; 212,0)      B(28,6 ; 287,5)      C(40,5 ; 273,5)

Fusion du thallium pur sous 1 bar : 576,7 K

Fusion du mercure pur sous 1 bar : 234,2 K

Transition de phase du mercure sous 1 bar :  $T_{\beta \rightarrow \alpha} = 70 \text{ K}$

La phase  $\gamma$  est une solution solide de mercure et thallium.

I.4.1. Une masse de dix grammes d'un mélange constitué à 15 % de thallium est amenée à la température de 150 K. Donner la nature et la masse des phases en présence.

I.4.2. On chauffe régulièrement ce mélange jusqu'à 300 K. Tracer l'allure de la courbe d'évolution de la température en fonction du temps lors de ce réchauffement, en indiquant la nature des phases en présence et des phases qui apparaissent ou disparaissent.

I.4.3. Comment appelle-t-on les mélanges dont la composition est donnée par l'abscisse du point A ? Quelle est leur caractéristique principale ?

## II. Cas des substances organiques

Dans la pratique, on manque souvent de données pour déterminer les valeurs de FBC pour des substances telles les hydrocarbures chlorés. On détermine dans ce cas les coefficients de partage octan-1-ol/eau, l'eau et l'octan-1-ol étant des liquides supposés totalement non miscibles :

$$P_{OW} = \frac{[X]_{\text{octanol}}}{[X]_{\text{eau}}}$$

Sont réunies dans le tableau ci-dessous quelques valeurs de  $\log P_{OW}$  :

Benzène	Chlorobenzène	Hexachlorobenzène	Pentachlorophénol	Acétone	Ethanol
2,13	2,84	6,18	5,01	-0,24	-0,32

II.1. En supposant que les composés organiques s'accumulent surtout dans les tissus adipeux, peut-on établir un lien qualitatif entre l'évolution du FBC et celle du coefficient de partage ?

### II.2. Etude du coefficient de partage du pentachlorophénol (PCP)

Le PCP présente des propriétés fongicides utilisées dans la protection du bois. On le retrouve donc fréquemment dans les effluents industriels. Une étude complète a été menée par des chercheurs de l'Institut National de Recherche sur l'Eau du Canada, de la manière suivante.

On prépare des mélanges de quatre types (A,B,C,D) en PCP, eau et octan-1-ol. Pour chaque mélange, on ajuste le pH de la phase à l'une des 16 valeurs choisies entre 1,2 et 13,5. On obtient donc  $4 \times 16 = 64$  mélanges différents, que l'on soumet chacun aux opérations ci-après.

Après 1 h 30 de centrifugation du mélange, on laisse reposer le système pendant 12 h. On sépare ensuite les deux phases. A la phase aqueuse, on ajoute 1,0 g de soude (NaOH) solide et, après dissolution, 1,5 mL d'anhydride acétique et 5 mL de toluène. Après réaction sous agitation pendant 1 h 15, on récupère la phase organique que l'on analyse par chromatographie en phase gaz.

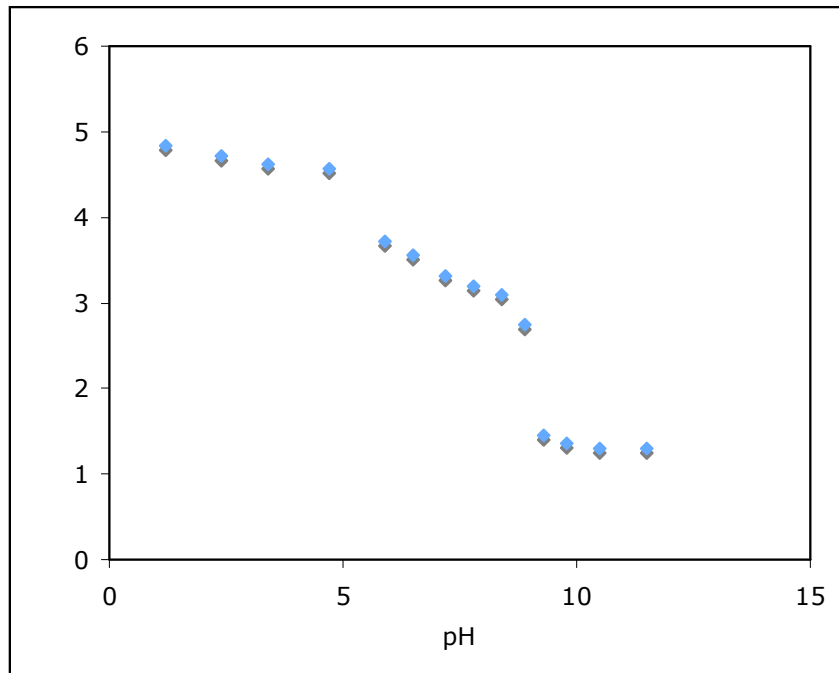
Mélange	A	B	C	D
Masse de PCP / mg	0,02	0,1	0,2	1,0
Volume d'octan-1-ol / mL	2	10	2	10
Volume d'eau / mL	200	200	200	200

II.2.1. Donner la formule semi-développée du pentachlorophénol (PCP, que l'on pourra noter ArOH).

II.2.2. Le PCP est un acide faible de  $pK_a = 4,8$ . Le phénol est un acide de  $pK_a = 9,9$ . Comment expliquer cette différence d'acidité ?

II.2.3. Dans le cas du mélange A, à  $pH = 1,2$ , on trouve une valeur de  $\log P_{OW}$  égale à 4,74. En déduire les concentrations en PCP dans chacune des phases. Pourquoi le volume d'eau est-il beaucoup plus grand que celui d'octan-1-ol ?

II.2.4. La courbe suivante montre l'évolution du coefficient de partage avec le pH de la phase aqueuse.



- a. Commenter la décroissance nette observée autour de  $\text{pH} = 5$ .
  - b. Sachant que les solutions à  $\text{pH}$  élevé sont riches en soude, proposer une explication à la deuxième phase de décroissance observée vers  $\text{pH} = 9$ .
- II.2.5.
- a. Un élève de première scientifique vous présente cette publication comme base de travail pour l'épreuve de TPE : comment lui expliquer les différentes opérations mises en jeu, de la centrifugation à l'analyse, en faisant référence à ses connaissances en chimie ?
  - b. Un étudiant de deuxième année de classes préparatoires présente dans le cadre des TIPE les résultats de cette publication. Proposer quatre questions à lui poser afin de vérifier qu'il a bien compris ces différentes opérations et qu'il a un regard critique sur ce procédé.
  - c. Proposer la réponse attendue de la part de cet étudiant aux questions concernant des notions non abordées en a.
- II.2.6. En réalité, ces 64 déterminations ont été réalisées deux fois chacune. Pour chaque valeur de  $\text{pH}$ , on a donc déterminé 8 valeurs de  $\log P_{\text{OW}}$ , dont on fait une moyenne.
- a. Définir la justesse (ou précision) d'une méthode expérimentale. Quelle grandeur permet de l'évaluer ?
  - b. Définir l'exactitude d'une mesure expérimentale. Que fait-on calculer aux élèves pour l'évaluer ?
  - c. Pour faire comprendre aux élèves la différence entre ces deux notions, on peut représenter les huit résultats par des points d'impact sur une cible, centrée sur la valeur attendue pour la grandeur mesurée. On distingue alors les quatre cas suivants :
    1. bonne justesse et bonne exactitude
    2. bonne justesse et mauvaise exactitude
    3. mauvaise justesse et bonne exactitude
    4. mauvaise justesse et mauvaise exactitudeReprésenter ces quatre cibles.

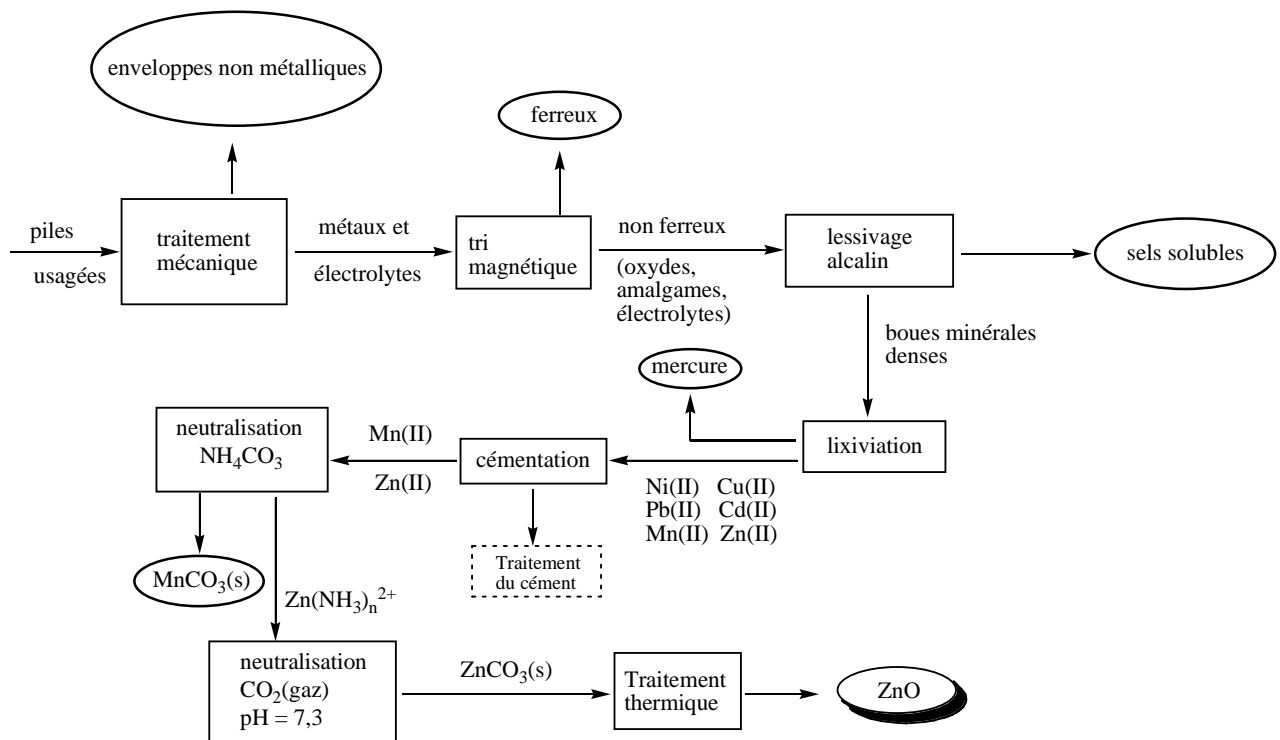
## DEUXIEME PARTIE **RECYCLAGE DES PILES USAGEES**

### I. Généralités

- I.1. a. Quel savant, et à quelle époque, a conçu le premier générateur électrochimique ? Quelle en était la conception ?
- b. Les élèves peuvent être tentés d'assimiler cette pile à la pile Daniell. Quels sont les couples effectivement mis en jeu dans chacune de ces piles? Quelles analogies et différences peut-on leur proposer entre cette première pile citée en I.1.a. et les générateurs électrochimiques qui figurent dans leur cours ?
- I.2. Piles commerciales usuelles
- a. Qu'est-ce qui distingue la pile Leclanché d'une pile alcaline ?
- b. Comment expliquer les fuites parfois observées sur les piles bâtons ?

### II. Quelques aspects d'un procédé de valorisation des piles usagées

Les principales étapes d'un procédé de traitement des piles usagées par la société française RECUPYL SA sont les suivantes :



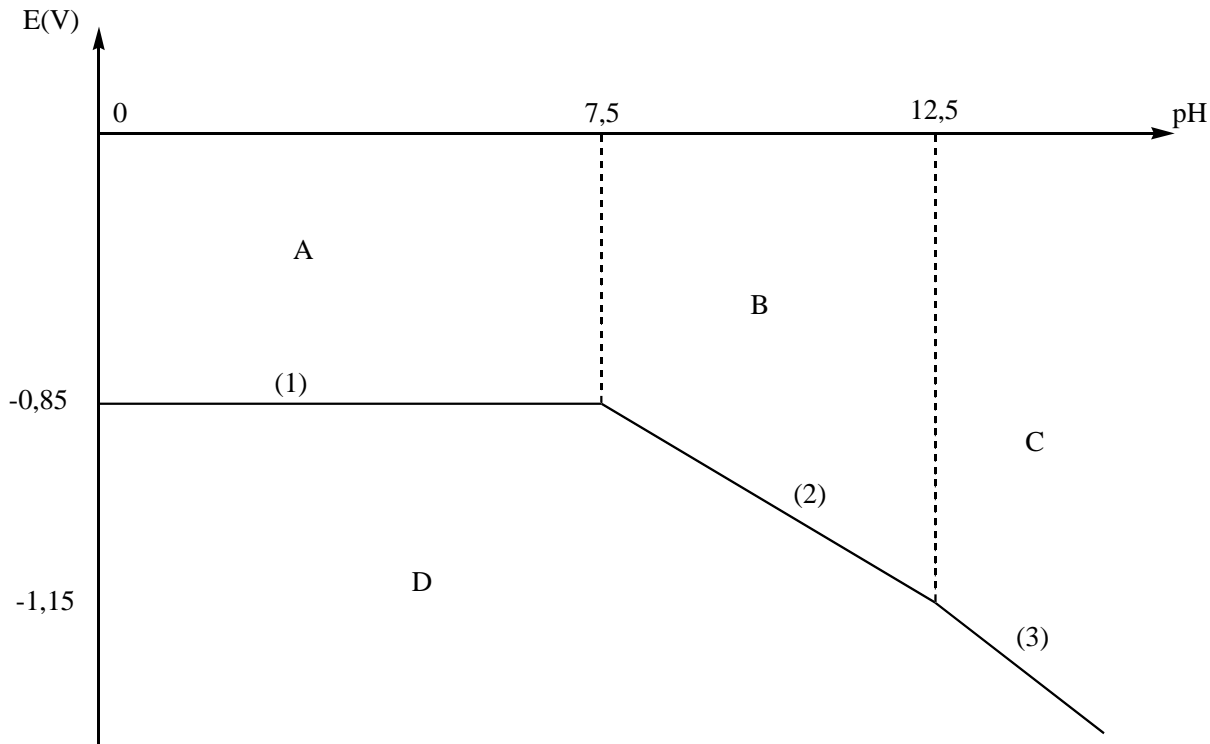


## II.1. Etape de lixiviation

Le résidu de lessivage comporte des hydroxydes métalliques ainsi que des particules métalliques fines. La lixiviation est effectuée au moyen d'acide sulfurique concentré à pH proche de 1.

### II.1.1. *Diagramme E-pH du zinc*

On donne le diagramme potentiel-pH de l'élément zinc pour une concentration totale en solution  $c = 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$ .



- Identifier les domaines de prédominance ou existence des espèces concernées :  $\text{Zn(s)}$ ,  $\text{Zn}^{2+}(\text{aq})$ ,  $\text{Zn(OH)}_2(\text{s})$  et  $[\text{Zn(OH)}_4]^{2-}(\text{aq})$ .
- A partir de ce diagramme, retrouver la valeur du potentiel standard du couple  $(\text{Zn}^{2+}(\text{aq}) / \text{Zn(s)})$  et la pente du segment (3).

### II.1.2. *Lessivage et lixiviation*

- A quelle condition sur le pH du lessivage alcalin n'élimine-t-on pas l'élément zinc au degré (II) ?
- Quelles sont les deux réactions qui se produisent lors de la lixiviation acide des boues contenant entre autres Zn et  $\text{Zn(OH)}_2$  ? On justifiera la réponse avec le diagramme tracé.

## II.2. Cémentation

II.2.1. Définir ce terme.

II.2.2. Quel réactif sera-t-il judicieux de choisir pour cette étape ? Pourquoi le choisir sous forme de poudre ?

II.2.3. Qu'est-ce que le ciment ? Que contient-il ici ?

II.2.4. Quelle expérience spectaculaire peut-on montrer aux élèves en relation avec ce procédé ?

## TROISIEME PARTIE **LE CARBURE DE SILICIUM**

On peut estimer qu'entre 20 et 30 % du PNB de la plupart des pays industrialisés sont directement issus de la catalyse, et cette part est en croissance puisque les procédés catalytiques en général sont moins consommateurs d'énergie et produisent moins de polluants. Le carbure de silicium est un matériau dont les propriétés physiques et chimiques particulières permettent l'utilisation comme support de phase active en catalyse hétérogène.

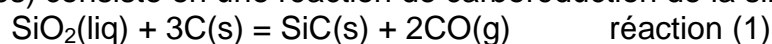
### **I. Structure cristalline du carbure de silicium**

Le carbure de silicium SiC existe sous de nombreuses formes cristallines (polytypes). La phase  $\beta$  cristallise dans le réseau CFC de type blende. On donne  $r_{\text{Si}} = 115 \text{ pm}$  et  $r_{\text{C}} = 77 \text{ pm}$ .

- I.1. Décrire et dessiner la maille cristalline représentative du solide SiC.
- I.2. Quelles sont les coordinences de Si et C dans cette structure ?
- I.3. Quel type d'interaction assure la cohésion d'un tel solide ?
- I.4. Donner la relation entre  $a$ , paramètre de maille et les rayons des deux atomes.
- I.5. Définir et calculer la compacité d'une telle structure. Commenter le résultat obtenu.
- I.6. Calculer la masse volumique du carbure de silicium ; exprimer le résultat en  $\text{g.cm}^{-3}$ .

### **II. Préparation du carbure de silicium**

Le procédé industriel courant de préparation de SiC (utilisé aussi comme abrasif ou additif dans les céramiques) consiste en une réaction de carboréduction de la silice vers  $1800 \text{ }^\circ\text{C}$  :

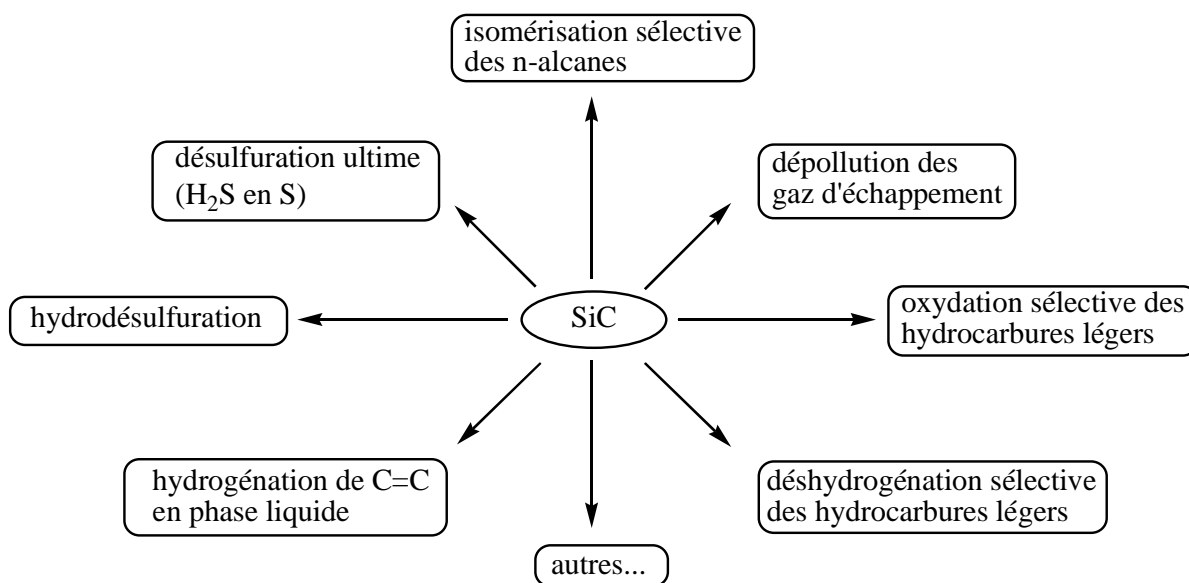


- II.1. Que signifie l'approximation d'Ellingham ? On se placera dans le cadre de cette approximation dans toute la suite.
- II.2. Quelle est l'influence d'une augmentation de température sur la constante de cet équilibre ?
- II.3. Donner l'expression de l'enthalpie libre standard de cette réaction en fonction de la température  $T$ .
- II.4. On demande souvent aux étudiants le calcul de la température d'inversion.
  - a. Définir cette température.
  - b. Que répondre à un étudiant qui s'interroge sur le sens physique de cette grandeur ?
  - c. Peut-on la relier aux conditions industrielles de température données ici pour ce procédé ?
- II.5. Calculer la variance du système à l'équilibre dans le cas général. On maintient la température constante et l'on diminue la pression. Quel est l'effet sur l'équilibre (1) ? Quel est l'intérêt de cette méthode ?

II.6. Par ce procédé, la surface spécifique du carbure de silicium obtenu est faible. Définir ce terme de surface spécifique et expliquer en quoi cela constitue un inconvénient pour son utilisation comme support de catalyseur.

### III. Utilisations

Le schéma suivant présente différentes réactions catalytiques utilisant le carbure de silicium comme support de phase active. Il pourrait être présenté à des élèves de terminale S, en fin d'année, afin de proposer une synthèse partielle de notions vues en première et en terminale.



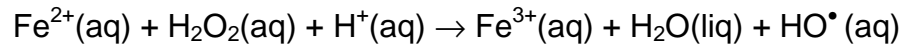
En s'appuyant sur les extraits des programmes de première et terminale scientifiques qui figurent en annexe, proposer une activité au cours de laquelle les élèves devront relier les informations de ce schéma, les connaissances acquises pendant ces deux années, en lien avec les objectifs des parties de programme concernées. On s'attachera à mettre en évidence à la fois les questions posées aux élèves et les réponses attendues.

## QUATRIEME PARTIE

### DESTRUCTION DE POLLUANTS ORGANIQUES DISSOUS DANS L'EAU PAR UN PROCÉDE D'OXYDATION AVANCÉE (POA)

Fenton a découvert en 1894 les propriétés oxydantes du mélange  $[H_2O_2 + Fe^{2+}]$ , appelé depuis « réactif de Fenton ».

En milieu acide ( $pH < 3$ ), la réaction rapide de  $H_2O_2$  avec les ions  $Fe^{2+}$  conduit à la formation des radicaux  $HO^\bullet$ , selon la réaction :

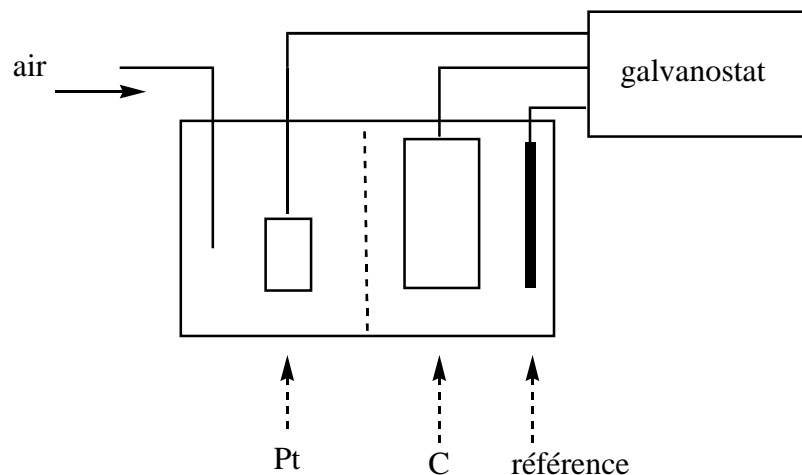


#### **I. Production des radicaux $HO^\bullet$ par le procédé électro-Fenton**

Ce procédé consiste à produire in situ et de manière catalytique le réactif de Fenton, à partir de dioxygène dissous et d'ions fer (III).

##### I.1. Dispositif expérimental

On peut schématiser le dispositif comme suit :



La cellule d'électrolyse contient une solution aqueuse contenant les polluants organiques dissous.

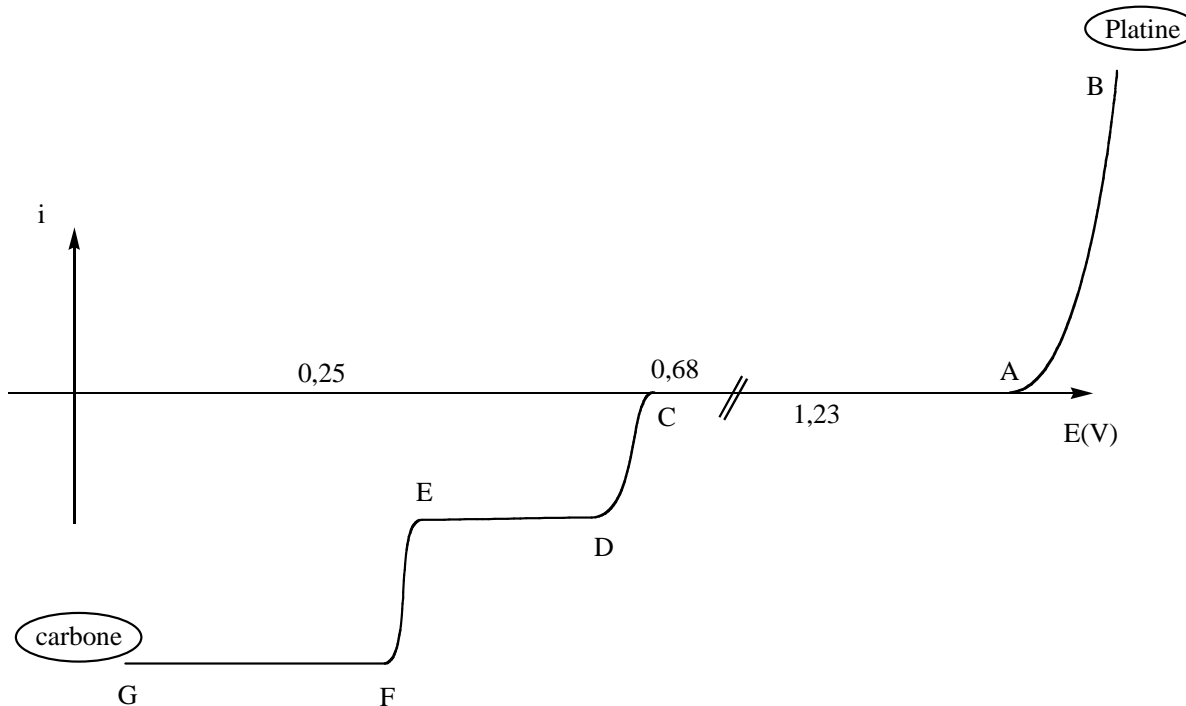
Cette solution contient de l'acide sulfurique, du sulfate de fer (III) et du sulfate de sodium.

On utilise ici un montage comparable au « montage à trois électrodes » couramment employé pour réaliser des tracés de courbes  $i = f(V)$ , afin de pouvoir fixer le potentiel de l'électrode de carbone.

- I.1.1. Schématiser complètement ce montage à trois électrodes en faisant figurer notamment les deux multimètres et leur fonction.
- I.1.2. Justifier la nécessité de l'utilisation d'une électrode auxiliaire (ou contre-électrode).
- I.1.3. Citer deux électrodes de référence couramment employées dans les séances de travaux pratiques. Expliquer, en s'appuyant sur la constitution de l'une d'entre elles, en quoi elle peut servir de référence.

## I.2. Les réactions aux électrodes

Le dispositif expérimental a été donné ci-dessus en I.1. On s'appuie sur le tracé qualitatif ci-dessous des courbes intensité-potentiel.



Le couple ( $O_2/H_2O_2$ ) de potentiel standard 0,69 V est un couple lent sur carbone. On considèrera que les ions du fer sont entièrement complexés par les ions sulfate. Le couple des ions du fer est un couple rapide.

I.2.1. Déterminer l'expression du potentiel standard  $E^\circ$  du couple ( $[FeSO_4]^+(aq)/FeSO_4(aq)$ ) en fonction de  $E^\circ(Fe^{3+}(aq)/Fe^{2+}(aq))$  et des constantes de formation  $\beta_1$  et  $\beta_2$  des complexes mis en jeu.

I.2.2. Application numérique : calculer  $E^\circ$ .

I.2.3. Donner l'équation de la réaction électrochimique anodique (portion AB).

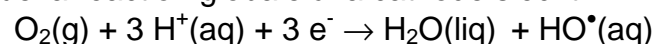
I.2.4. Donner l'équation de la réaction électrochimique relative à la portion CE.

I.2.5. Donner les équations des réactions électrochimiques relatives à la portion EG.

## I.3. Bilan de l'électrolyse

I.3.1. On impose à la cathode un potentiel de 0,25 V. Indiquer la (les) réaction(s) de réduction observée(s).

I.3.2. En déduire que la réaction globale à la cathode s'écrit :

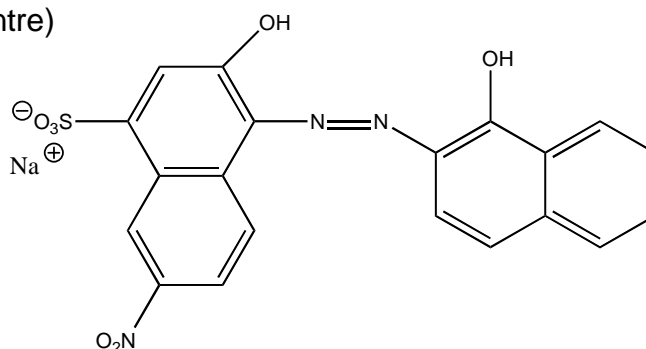


I.3.3. Ecrire alors l'équation donnant le bilan global d'électrolyse ?

I.3.4. Commenter ce procédé en termes environnementaux.

## II. Étude de la dégradation d'un colorant par le procédé électro-Fenton

Le noir d'ériochrome T (NET) (formule ci-contre) est un colorant synthétique largement utilisé dans l'industrie textile, dont la dégradation biologique est très difficile.



Nous allons étudier sa dégradation par le procédé électro-Fenton.

L'électrolyse est menée dans les conditions décrites en II. On suit l'évolution de la concentration en NET par spectrophotométrie à la longueur d'onde  $\lambda_0 = 540 \text{ nm}$ .

### III.1. Détermination de la concentration en NET

- III.1.1. En général, la longueur d'onde de travail correspond au maximum d'absorption de la substance étudiée. Justifier ce choix.
- III.1.2. Quelle grandeur mesure-t-on avec le spectrophotomètre ? Comment la relier à la concentration en NET dans le milieu ?
- III.1.3. On veut proposer à des élèves de terminale S, en travaux pratiques, la détermination d'une concentration  $c_0$  en NET d'une solution  $S_0$  fournie.
  - a. Expliquer avec concision le protocole expérimental.
  - b. La valeur  $c_0$  choisie peut-elle être quelconque ? Pourquoi ?
  - c. En quoi le protocole doit-il être adapté à cette valeur de  $c_0$  ?
  - d. Etablir la liste de matériel nécessaire à cette séance de TP.

### III.2. Étude cinétique

On obtient les résultats suivants :

t (min)	0	1	2	3	4	5
$10^5 \cdot [\text{NET}] \text{ (mol.L}^{-1}\text{)}$	5,00	2,12	0,89	0,38	0,16	0,07

L'équation relative à l'action des radicaux  $\text{HO}^\bullet$  sur le NET s'écrit :

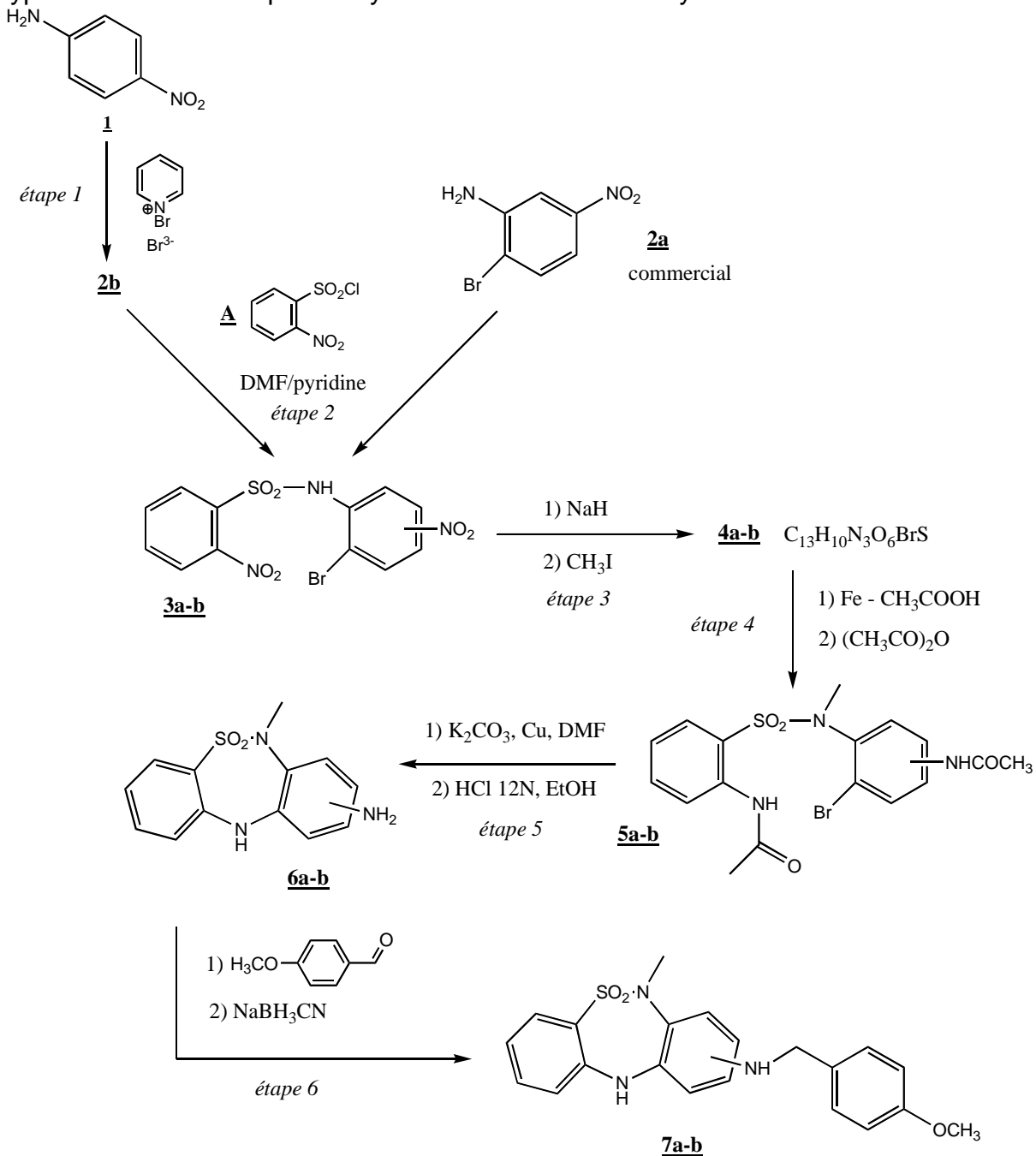


La vitesse de cette réaction peut se mettre sous la forme :  $v = k[\text{NET}]^\alpha[\text{HO}^\bullet]^\beta$

- III.2.1. Expliquer pourquoi on peut considérer comme constante la concentration en  $\text{HO}^\bullet$  au cours du traitement.
- III.2.2. Dédire des résultats expérimentaux l'ordre partiel en NET et la valeur de la constante de vitesse apparente  $k_{\text{app}}$  que l'on définira.

## CINQUIEME PARTIE SYNTHESE DE COMPOSES D'INTERET PHARMACOLOGIQUE

Beaucoup de dérivés de thiadiazépine présentent des activités pharmacologiques intéressantes (anti-dépresseur, anti-microbien, anti-fongique, analgésique, anti-inflammatoire et anti-tumoral) selon le type de substitution. Les laboratoires de Chimie thérapeutique sont donc amenés à préparer des familles de composés afin de trouver le plus efficace dans les tests de cytotoxicité. Nous nous proposons donc ici d'étudier une synthèse de dérivés de type dibenzothiadiazépine d'oxyde selon le schéma de synthèse suivant :



## I. L'étape 1 : bromation d'un cycle aromatique

Une solution de tribromure de bromopyridinium (22 mmol) dans le THF (50 mL) est ajoutée goutte à goutte à une solution de 4-nitroaniline **1** (22 mmol dans 25 mL de THF). Après 12 h d'agitation à température ambiante, le mélange réactionnel est traité, puis la phase organique est séchée et le solvant évaporé. On récupère alors une huile jaune que l'on purifie par chromatographie sur colonne (éther de pétrole/acétate d'éthyle 85/15), afin d'obtenir avec un rendement de 89 % le composé **2b** sous forme d'une poudre jaune dont la température de fusion est de 106 °C.

- I.1. Le composé **1** est aromatique. Quels critères permettent d'attribuer le caractère aromatique à un composé ?
- I.2. Rappeler les conditions opératoires usuelles de bromation du benzène, ainsi que le mécanisme de cette réaction.
- I.3. Donner la structure du composé **2b** et justifier l'orientation de la bromation de **1**. Pourquoi ne procède-t-on pas à la préparation du composé **2a** (2-bromo-5-nitroaniline) de la même manière ?
- I.4. Pourquoi est-il nécessaire de sécher la phase organique ? Comment procède-t-on ?
- I.5. a. Comment réalise-t-on une chromatographie sur colonne ? Expliquer le principe de cette opération de purification.  
b. Afin de déterminer l'éluant optimal de chromatographie sur colonne, on réalise au préalable une étude par CCM. On dispose de deux produits P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub> à séparer, de deux solvants totalement miscibles (cyclohexane et acétate d'éthyle par exemple) et du matériel pour CCM.  
Imaginer un scénario pour une séance de TP réalisable dès la classe de seconde permettant de montrer la plus ou moins grande efficacité de la séparation selon les conditions d'élution.
- I.6. Peut-on proposer une explication qualitative au fait que le produit pur soit un solide alors qu'avant chromatographie on avait un mélange huileux ? On pourra considérer le mélange étudié comme binaire et accompagner les explications d'un schéma.

## II. L'étape 2

On ajoute lentement le chlorure de sulfonyle **A** (18 mmol) à une solution de **2a** (15 mmol) dans le DMF, en présence de pyridine (base faible). Après 5 h de chauffage, on évapore le solvant, on fait précipiter par addition d'eau un solide que l'on récupère par filtration et que l'on recristallise dans l'éthanol à 95 %.



Le composé **3a** est obtenu avec un rendement de 91 % et identifié par spectroscopie : le spectre RMN  $^1\text{H}$  dans  $\text{CDCl}_3$  présente les signaux ci-dessous, tous d'intégration 1H.

$\delta$ (ppm)	7,70	7,75	7,82	7,91	7,98	8,08	8,35	8,64
multiplicité	d	td	td	dd	dd	dd	s	d
Constantes de couplage (Hz)	8,80	1,40 et 7,85	1,40 et 7,85	2,30 et 8,80	1,40 et 7,40	1,40 et 7,40		2,30

On donne les valeurs moyennes des constantes de couplage entre atomes d'hydrogène aromatiques :  $^3J_{\text{ortho}} = 7$  à  $10$  Hz et  $^4J_{\text{méta}} = 1,3$  à  $3$  Hz.

On rappelle les abréviations : s = singulet ; d = doublet ; t = triplet. Ainsi, dd correspond à un doublet dédoublé.

- II.1. En considérant que le chlorure de sulfonyle **A** présente une réactivité analogue à un chlorure d'acyle, proposer un mécanisme réactionnel pour cette transformation.
- II.2. Quel est le rôle de la pyridine ?
- II.3. Qu'est-ce qu'une recristallisation ? Comment procède-t-on ? Quels sont les critères de choix du solvant de recristallisation ?
- II.4. Quelle est la masse de composé **3a** obtenue ?
- II.5. Analyser avec soin le spectre RMN.

### III. L'étape 6

- III.1. Montrer, en proposant un mécanisme réactionnel, que l'action d'une amine primaire (notée  $\text{RNH}_2$ ) sur un aldéhyde (noté  $\text{ArCH=O}$ ) *en milieu acide* conduit à une imine ( $\text{RN=CHAr}$ ).
- III.2. Les proportions utilisées pour cette étape correspondent à un excès d'aldéhyde (rapport 10 des quantités d'aldéhyde et d'amine au départ).  
Montrer que l'on peut commenter ce choix en termes cinétiques et thermodynamiques avec les notions acquises en terminale S.
- III.3. Citer une réaction conduisant à la formation de la liaison  $\text{C=N}$  à partir de  $\text{C=O}$  et utilisée couramment en cours de chimie au lycée. Donner le bilan de cette transformation et citer une expérience couramment présentée aux élèves dans laquelle on fait appel à cette réaction.
- III.4. Citer un composé de réactivité analogue à celle de  $\text{NaBH}_3\text{CN}$ .
- III.5. Il faut isoler l'imine (obtention et filtration d'un solide) du mélange réactionnel avant de le soumettre à l'action de l'hydrure. Donner deux raisons à cette précaution opératoire.
- III.6. Proposer un mécanisme réactionnel simplifié relatif à l'action de  $\text{NaBH}_3\text{CN}$ , suivie d'une hydrolyse basique.

**II - La chimie créatrice**

(Durée indicative: 11 h de cours, 4 ou 5 TP)

**Objectifs**

L'objectif de cette partie est de faire apparaître qu'une formule chimique a du sens pour un chimiste, qu'elle évoque des propriétés physiques et chimiques, qu'elle est un outil qui lui permet de rationaliser et de prévoir le comportement des espèces chimiques. Les molécules organiques ont été choisies pour atteindre cet objectif.

L'élève met en évidence lors d'un travail expérimental complété par un travail documentaire que les molécules de la chimie organique comportent un squelette carboné et éventuellement un ou plusieurs groupes caractéristiques (groupes fonctionnels).

La démarche consiste ensuite à développer la lecture des squelettes carbonés en montrant leur diversité, leur influence sur les propriétés des molécules et à présenter des modifications possibles de ces squelettes carbonés: allonger, raccourcir, ramifier, cycliser ou déshydrogéner. Les applications industrielles choisies pour illustrer ces modifications sont empruntées tout particulièrement à la chimie du pétrole qui conduit aux carburants et aux polymères.

Dans cette partie, l'objectif est aussi d'initier à la réactivité sous deux aspects: exploration du champ de réactivité d'une famille de composés (en l'occurrence les alcools), et synthèses montrant le passage d'un groupe caractéristique à un autre. Les synthèses effectuées mettent en œuvre les techniques de base d'un laboratoire de chimie. Elles conduisent à préciser à nouveau les règles de sécurité et de protection de l'environnement. Chaque fois que possible, des applications industrielles sont présentées.

La chimie est créatrice de ses objets comme l'illustre la multitude et la diversité des molécules ainsi que la richesse de leurs applications.

Cette partie du programme permet aussi à l'élève d'élargir sa culture scientifique.

**A - LA CHIMIE ORGANIQUE : DE SA NAISSANCE À SON OMNIPRÉSENCE DANS LE QUOTIDIEN**

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
Travail documentaire*: - composition des espèces chimiques organiques (importance quantitative des éléments C et H principalement), - histoire de la chimie organique sous l'angle des découvertes et des hommes, - mise en évidence de la multitude et de la diversité des molécules en chimie organique (nombre de molécules, nombre d'espèces organiques synthétisées chaque année, etc.), - importance économique de la chimie organique.	<b>1 - Qu'est-ce que la chimie organique?</b> Cerner le champ de la chimie organique. Ressources naturelles: photosynthèse, synthèses biochimiques et hydrocarbures fossiles.	Savoir que les molécules de la chimie organique sont constituées principalement des éléments C et H.  À l'aide des règles du "duet" et de l'octet, décrire les liaisons que peut établir un atome de carbone avec ses atomes voisins.
	<b>2 - Le carbone élément de base de la chimie organique</b> Comment l'atome de carbone établit-il des liaisons avec d'autres atomes?	
	<b>3 - Quelques dates dans l'histoire de la chimie organique</b>	
	<b>4 - L'omniprésence de la chimie organique</b>	

\* Activités pouvant donner lieu à l'utilisation des technologies de l'information et de la communication

**Commentaires**

L'esprit de cette partie est de montrer, en réinvestissant le programme de la classe de seconde (en particulier la première partie), l'importance de la chimie de synthèse (l'homme reproduit des espèces naturelles et crée des espèces chimiques nouvelles).

Les représentations de Lewis des molécules permettent d'identifier les liaisons simple, double et triple et de préciser leur orientation dans l'espace.

La présentation de l'histoire de la chimie organique et la recherche documentaire correspondante se prêtent particulièrement bien à des entrées historiques en y associant les chimistes concernés: la théorie de la "force vitale", l'histoire de la détermination de la formule et de la structure du benzène, la croissance vertigineuse de la chimie organique après 1827 (date à laquelle F. Wöhler effectue la synthèse de l'urée) grâce à la synthèse de nouvelles molécules (colorants, médicaments, parfums synthétiques, etc.).

**B - APPRENDRE À LIRE UNE FORMULE CHIMIQUE**

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
<p><i>Expériences visant à montrer l'importance du squelette carboné, du groupe caractéristique et leur rôle respectif sur les propriétés physiques et chimiques: tests de solubilité, tests de caractérisation.</i></p> <p>Travail documentaire de sensibilisation aux différentes représentations de molécules (y compris des molécules biologiques en lien avec le programme de SVT) faisant apparaître différents types de squelettes et faisant émerger la notion de groupe caractéristique*. <i>Éléments de nomenclature, isomérie, (en se limitant aux alcanes comportant une chaîne de 6 atomes de carbone au plus et aux molécules de type CHA=CHB), modèles moléculaires et logiciels de simulation*.</i></p> <p>Activités documentaires, utilisation de cédéroms, vidéos et expériences de cours permettant d'illustrer les transformations des pétroles (par reformage, craquage catalytique et vapocraquage) et la polymérisation en spécifiant les produits obtenus (carburants et polymères) ainsi que leurs nombreuses applications*.</p> <p><i>Illustration expérimentale du champ de réactivité des alcools.</i></p> <p><i>Synthèses permettant de réinvestir et d'acquérir des techniques expérimentales au laboratoire et d'illustrer la réactivité de molécules sous l'angle du passage d'un groupe à un autre avec caractérisation du groupe obtenu.</i> Applications industrielles.</p>	<p><b>1 - Introduction</b></p> <p>Une molécule organique comporte un squelette carboné et éventuellement des groupes caractéristiques.</p> <p><b>2 - Le squelette carboné</b></p> <p>a) La diversité des chaînes carbonées</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Chaîne linéaire, ramifiée ou cyclique saturée et insaturée.</li> <li>Formule brute, formule semi-développée plane, approche de l'écriture topologique, isomérie de constitution mise en évidence sur quelques exemples simples de l'isomérie Z et E.</li> <li>- Influence de la chaîne carbonée sur les propriétés physiques: température d'ébullition, densité, solubilité (les exemples sont pris sur des chaînes saturées).</li> <li>- Application à la distillation fractionnée.</li> </ul> <p>b) La modification du squelette carboné</p> <p>Allonger, raccourcir, ramifier, cycliser, ou déshydrogéner à partir de quelques applications industrielles : chimie du pétrole, polyaddition des alcènes et des dérivés éthyléniques.</p> <p><b>3 - Les groupes caractéristiques: initiation à la réactivité</b></p> <p>a) Reconnaître les familles de composés: amine, composé halogéné, alcool, aldéhyde, cétone, acide carboxylique.</p> <p>b) Illustrer la réactivité des alcools: oxydation, déshydratation (élimination) passage aux composés halogénés (substitution).</p> <p>c) Passage d'un groupe caractéristique à un autre : quelques exemples au laboratoire et dans l'industrie.</p>	<p>Reconnaître une chaîne carbonée saturée linéaire ou non. Donner le nom des alcanes (en se limitant aux alcanes comportant une chaîne de 6 atomes de carbone au plus). Reconnaître la présence d'une liaison double sur une chaîne carbonée (alcènes et dérivés éthyléniques). Donner les formules brute et semi-développée d'une molécule simple. Prévoir les isomères de constitution d'une molécule à partir de sa formule brute (en se limitant aux alcanes comportant une chaîne de 6 atomes de carbone au plus).</p> <p>À partir d'un monomère CH<sub>2</sub>=CHA, écrire le motif du polymère obtenu par polyaddition:  <math display="block">\text{---}(\text{CH}_2 - \text{CHA})\text{---}_n</math></p> <p>Au vu de la formule développée plane d'une molécule, reconnaître les familles de composés suivantes : amine, composé halogéné, alcool, aldéhyde, cétone et acide carboxylique.</p> <p><i>Lors de la réaction d'un alcool, reconnaître s'il s'agit d'une réaction d'oxydation, de déshydratation (élimination) ou de substitution.</i> Connaître les familles de composés obtenus par oxydation ménagée d'un alcool. Écrire la réaction d'oxydation d'un alcool par les ions permanganate en milieu acide.</p> <p><i>Mettre en œuvre au laboratoire une extraction par solvant, un chauffage à reflux, une filtration sous vide, une CCM, une distillation en justifiant du choix du matériel à utiliser.</i> <i>Déterminer la valeur du rendement d'une synthèse.</i></p>

\* Activités pouvant donner lieu à l'utilisation des technologies de l'information et de la communication

**Commentaires**

En menant des expériences au laboratoire, l'élève prend conscience de l'importance du squelette carboné et découvre l'influence de la structure sur quelques propriétés physiques et chimiques: longueur de la chaîne carbonée, structure linéaire ou ramifiée, présence ou non de liaisons doubles, de groupes caractéristiques. L'élève manipule, puis s'interroge. En ayant connaissance des formules chimiques des produits utilisés, il relie ces formules aux propriétés physiques et chimiques observées. La manipulation est complétée par un travail documentaire visant à "apprendre à lire" différentes formules de molécules: différents types de squelettes, eux-mêmes éventuellement porteurs de divers groupes caractéristiques. Plusieurs modes de représentations sont utilisés; en lien avec le programme de SVT des molécules complexes peuvent être présentées. Le programme de la classe de première se limite à la reconnaissance des groupes caractéristiques suivants: -NH<sub>2</sub>, -X, -OH, -CO, -CO<sub>2</sub>H et aux familles de composés correspondants. Les réactifs de caractérisation utilisés: solution aqueuse de dibrome, 2,4-dinitrophénylhydrazine, réactif de Fehling ou réactif de Tollens, solution alcoolique de nitrate d'argent, ions permanganate, papier pH, permettent d'identifier expérimentalement quelques-uns de ces groupes. Ces tests peuvent donner l'occasion de spécifier les couples oxydant/réducteur mis en jeu; dans des cas simples, ils peuvent donner lieu à l'écriture des réactions chimiques correspondantes. La famille

des acides carboxyliques et celle des amines se prêtent bien à un retour sur les couples acide/base. Les amines ne doivent donner lieu à aucun développement ; il s'agit seulement, en lien avec le programme de SVT, de permettre la reconnaissance du groupe amine d'un acide aminé.

Pour illustrer un champ de réactivité d'une famille de composés, les alcools conviennent bien parce qu'ils permettent de revoir les réactions d'oxydoréduction et parce que ce groupe joue un rôle central en biochimie (en lien avec le programme de SVT). Les synthèses effectuées au laboratoire donnent quelques exemples d'aménagement fonctionnel: l'enseignant illustre sur quelques cas bien choisis, le passage d'un groupe à un autre et inversement (RX/ROH; ROH/dérivés carbonyles) et également le passage des alcools aux dérivés éthyléniques. Les tests caractéristiques précédents permettent d'identifier ces groupes.

Des exemples de modification du squelette carboné et de l'aménagement fonctionnel sont pris dans la chimie industrielle. À propos de la chimie du pétrole, l'enseignant présente les opérations industrielles de craquage catalytique, de vapocraquage et de reformage sans les développer, l'objectif étant limité à mettre en évidence les modifications du squelette carboné sur les produits obtenus. Les polymères obtenus par polyaddition d'alcènes et de dérivés éthyléniques ainsi que les carburants sont choisis comme exemples de transformations des pétroles (ces aspects seront réinvestis dans la partie III: L'énergie au quotidien). Les composés halogénés, importants pour leurs applications industrielles, donnent l'occasion de poser le problème des solvants chlorés et les précautions d'emploi au laboratoire (utilisation et déchets).

**IV - CHIMIE - ENSEIGNEMENT OBLIGATOIRE**

**INTRODUCTION : LES QUESTIONS QUI SE POSENT AU CHIMISTE (1 HCE)**

L'objectif de cette introduction est de faire apparaître aux élèves l'importance et la place des activités du chimiste dans le monde contemporain au travers de leurs apprentissages antérieurs et de la perception qu'ils ont de la chimie dans leur environnement quotidien et dans l'industrie. Il s'agit de faire prendre conscience des nombreuses questions auxquelles le chimiste est confronté. Certaines font l'objet du programme de la classe de terminale S, à savoir comprendre les processus d'évolution des systèmes susceptibles de transformations chimiques, les contrôler, maîtriser les protocoles opératoires et disposer d'outils de mesure permettant de réaliser des "contrôles de qualité".

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	COMPÉTENCES EXIGIBLES
Film vidéo, analyse d'un article, intervention d'un chimiste en vue de permettre un questionnement sur la perception des activités du chimiste.	- Inventorier les activités du chimiste et les enjeux de la chimie dans la société. - Dégager quelques questions qui se posent au chimiste dans ses activités professionnelles.	

**Commentaires**

Le travail du chimiste dans le monde contemporain peut être classé par **types d'activités** dont certaines ont déjà été vues par les élèves au laboratoire : extraire, identifier, analyser, créer, purifier, protéger, recycler, formuler, etc.

Il est envisagé dans cette introduction de dégager quelques préoccupations du chimiste dans la société à travers une réflexion sur le rendement, la durée de fabrication et donc les coûts de production en chimie industrielle (chimie lourde et chimie fine), les impacts sur l'environnement avec le recyclage et l'élimination des matériaux.

L'enseignant s'efforce d'organiser les réflexions et les réponses des élèves en les regroupant et en les classifiant en vue de faire émerger les quatre questions que le programme explore :

- La transformation d'un système chimique est-elle toujours rapide ?
- La transformation d'un système chimique est-elle toujours totale ?
- Le sens spontané d'évolution d'un système est-il prévisible ? Et son corollaire, le sens d'évolution d'un système chimique peut-il être inversé ?
- Comment le chimiste contrôle-t-il les transformations de la matière ?

Après avoir donné des éléments de réponse aux trois premières questions, la dernière partie permet de montrer quelques exemples de stratégies mises en œuvre par le chimiste pour résoudre quelques uns des problèmes qu'il rencontre ; les exemples dans cette partie sont essentiellement pris en chimie organique.

Tout comme dans les classes de seconde et de première scientifique, l'entrée par l'expérience et le questionnement des élèves continue d'être privilégiée pour l'introduction de chaque nouveau concept.

**D - Comment le chimiste contrôle-t-il les transformations de la matière ?**

**Exemples pris dans les sciences de l'ingénieur et dans les sciences de la vie (4 TP, 7 HCE)**

L'objectif de cette partie est de montrer que le chimiste peut, dans le cas d'une transformation spontanée, en contrôler la vitesse et le rendement. L'exemple des réactions d'estérification et d'hydrolyse sert de support à cette partie et permet de réinvestir les connaissances de l'élève sur la cinétique et sur l'état d'équilibre des systèmes chimiques. Le chimiste peut en particulier déplacer l'état d'équilibre dans un sens choisi, pour améliorer le rendement d'une synthèse.

Le contrôle de l'évolution des systèmes chimiques est illustré par des exemples pris dans l'industrie des parfums, des arômes, des savons et des médicaments et dans le domaine des sciences de la vie.

L'enseignant aborde quelques domaines de la chimie contemporaine dans lesquels les chimistes contrôlent la vitesse et le rendement d'une synthèse en utilisant une espèce plus réactive et un catalyseur.

Quelques exemples de catalyse sont proposés. La catalyse enzymatique, en particulier, contrôle les systèmes chimiques dans les milieux biologiques ; l'élève découvre que ces systèmes obéissent aussi aux lois physico-chimiques.

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	COMPÉTENCES EXIGIBLES
<p><i>Découvrir que les transformations faisant intervenir des réactions d'estérification et d'hydrolyse sont lentes, qu'elles conduisent à un état d'équilibre et qu'il est possible de modifier la vitesse et/ou le taux d'avancement final de ces réactions.</i></p>	<p><b>1. Les réactions d'estérification et d'hydrolyse</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Formation d'un ester à partir d'un acide et d'un alcool, écriture de l'équation de la réaction correspondante, appelée réaction d'estérification.</li> <li>- Hydrolyse d'un ester, écriture de l'équation de la réaction correspondante.</li> <li>- Mise en évidence expérimentale d'un état d'équilibre lors des transformations faisant intervenir des réactions d'estérification et d'hydrolyse.</li> <li>- Définition du rendement d'une transformation.</li> <li>- Définition d'un catalyseur.</li> <li>- Contrôle de la vitesse de réaction : température et catalyseur.</li> <li>- Contrôle de l'état final d'un système : excès d'un réactif ou élimination d'un produit.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reconnaître dans la formule d'une espèce chimique organique les groupes caractéristiques : - OH, - CO<sub>2</sub>H, - CO<sub>2</sub>R, - CO - O - CO -.</li> <li>- Écrire l'équation des réactions d'estérification et d'hydrolyse.</li> <li>- À partir de la formule semi-développée d'un ester, retrouver les formules de l'acide carboxylique et de l'alcool correspondants.</li> <li>- Savoir nommer les esters comportant cinq atomes de carbone au maximum.</li> <li>- Savoir que les réactions d'estérification et d'hydrolyse sont inverses l'une de l'autre et que les transformations associées à ces réactions sont lentes.</li> <li>- Savoir qu'un catalyseur est une espèce qui augmente la vitesse d'une réaction chimique sans figurer dans l'équation de la réaction et sans modifier l'état d'équilibre du système.</li> <li>- Savoir que l'excès de l'un des réactifs et/ou l'élimination de l'un des produits déplace l'état d'équilibre du système dans le sens direct.</li> </ul>
<p><i>Synthèse de l'aspirine à partir d'un anhydride d'acide. Identification par chromatographie sur couche mince.</i></p> <p><i>Synthèse et propriétés d'un savon.</i></p> <p><i>Choix des conditions expérimentales permettant, lorsque plusieurs réactions chimiques interviennent dans une transformation, d'en privilégier une. Exemple d'application : titrage direct de l'aspirine.</i></p> <p><i>Expériences qualitatives sur la catalyse. Recherche documentaire sur la catalyse et ses applications.</i></p>	<p><b>2. Des exemples de contrôle de l'évolution de systèmes chimiques pris dans l'industrie chimique et dans les sciences de la vie</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Changement d'un réactif</li> <li>Synthèse d'un ester à partir d'un anhydride d'acide et d'un alcool.</li> <li>Hydrolyse basique des esters : applications à la saponification des corps gras (préparations et propriétés des savons, relations structure-propriétés).</li> <li>- Utilisation de la catalyse</li> <li>Catalyse homogène, hétérogène, enzymatique : sélectivité des catalyseurs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Calculer le rendement d'une transformation.</li> <li>- Mettre en œuvre au laboratoire, en justifiant le choix du matériel à utiliser : chauffage à reflux, distillation fractionnée, cristallisation, filtration sous vide, chromatographie sur couche mince.</li> <li>- Respecter les consignes de sécurité.</li> <li>- Justifier les étapes d'un protocole</li> <li>- Écrire l'équation de la réaction d'un anhydride d'acide sur un alcool et de l'hydrolyse basique d'un ester.</li> <li>- Savoir que l'action d'un anhydride d'acide sur un alcool est rapide, qu'elle donne un ester et que l'avancement maximal est atteint.</li> <li>- Savoir que l'hydrolyse basique d'un ester est rapide et que l'avancement maximal est atteint.</li> <li>- Identifier la partie hydrophile et la partie hydrophobe d'un ion carboxylate à longue chaîne.</li> <li>- Savoir qu'un catalyseur agit sélectivement lors d'une transformation.</li> </ul>

### Commentaires

En chimie organique, deux nouvelles familles de composés sont introduites : les esters et les anhydrides d'acide. Ceci est l'occasion de développer quelques applications industrielles et de réinvestir les connaissances de la classe de première scientifique concernant les groupes caractéristiques.

La reconnaissance de ces groupes et la nomenclature qui s'y rapporte se fait au fur et à mesure de l'introduction des familles de composés correspondantes, en cours ou en travaux pratiques.

Concernant le contrôle de l'évolution du système, un raisonnement qualitatif permet d'amener l'élève à concevoir que l'ajout d'un des réactifs ou l'élimination d'un des produits entraîne la diminution du quotient de réaction  $Q_r$ , ce qui met le système dans une situation où la valeur de  $Q_r$  est inférieure à  $K$ . Le système évolue donc spontanément dans le sens direct.

Seul l'anhydride d'acide est proposé comme exemple de réactif pour améliorer le rendement de la synthèse d'un ester. Il n'est pas donné de justification sur la réactivité de l'anhydride d'acide comparée à celle d'un acide carboxylique.

Les savons illustrent la réaction d'hydrolyse des esters en milieu basique et ouvrent la porte à un réinvestissement des relations structures-propriétés abordées en classe de première scientifique lors de l'étude des solutions électrolytiques et de l'influence de la chaîne carbonée sur les propriétés physiques.

Il est exceptionnel de rencontrer des situations réelles où une seule réaction est associée à une transformation, ce qui est l'unique situation connue de l'élève jusqu'alors. Sur un exemple, l'enseignant montre que dans des conditions expérimentales appropriées (température,

concentration des réactifs, pH, etc.), il est possible de privilégier une réaction et donc d'obtenir de façon majoritaire un produit de synthèse ou de faire un contrôle de qualité : il est possible par exemple de vérifier par titrage direct la quantité d'aspirine dans un comprimé en évitant la saponification.

Contrairement aux deux facteurs cinétiques -température et concentration- étudiés dans la première partie, qui agissent sur la probabilité de chocs efficaces entre entités réactives, le catalyseur modifie le mécanisme réactionnel (les mécanismes réactionnels ne sont pas abordés avec les élèves dans ce programme). Un catalyseur est spécifique à une réaction, il ne modifie pas l'état d'équilibre du système car il accélère à la fois les réactions directe et inverse. Enfin, dans l'industrie, le choix d'un catalyseur spécifique permet d'orienter une synthèse vers un produit particulier lorsque plusieurs produits sont susceptibles de se former. L'autocatalyse n'est pas évoquée.

**AGREGATION INTERNE DE SCIENCES PHYSIQUES – SESSION 2009**  
**COMPOSITION DE CHIMIE**  
**Solution proposée par Mme Anne SZYMCZAK**

**PREMIERE PARTIE : accumulation des polluants dans les milieux naturels**

**I. Cas du mercure**

I.1. La masse volumique de l'eau de mer dépend essentiellement de la température, la pression et la salinité.

I.2. FBC = teneur (mg/kg) dans le poisson / teneur (mg/kg) dans l'eau  
 donc teneur dans le poisson =  $10^4 \times (0,03 \cdot 10^{-3} / 1,03) = 0,29$  mg/kg

I.3.1. Dernière colonne des métaux de transition :  $s^2 d^{10}$   
 Sixième période :  $n=6$  donc  $6s^2 5d^{10}$

I.3.2. La forte pression de vapeur saturante du mercure est ici mise en jeu.

I.3.3. Il s'agit d'une réduction du mercure au degré II par l'étain (II) :



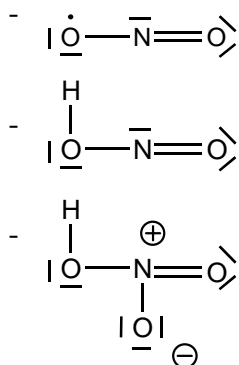
AN :  $K^\circ = 2,15 \times 10^{23}$  c'est une réaction quantitative bien adaptée à un dosage



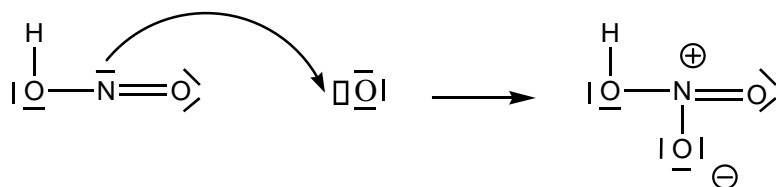
I.3.4.1.b. Questions à poser à l'étudiant :

- Déduire de cette formule de Lewis de NO une formule de Lewis de NO<sub>2</sub>
- Proposer alors une formule de Lewis pour HNO<sub>2</sub>.
- En déduire un schéma de Lewis pour HNO<sub>3</sub>.

Réponses attendues :



I.3.4.1.c. On peut à cette occasion montrer qu'une liaison covalente ne se forme pas toujours par apport d'un électron par chaque partenaire (définition vue en secondaire et construction de NO, NO<sub>2</sub> et HNO<sub>2</sub>) mais parfois par effet donneur-accepteur entre un atome possédant un doublet non liant et un atome possédant une orbitale vacante : cas du passage HNO<sub>2</sub> à HNO<sub>3</sub>, avec illustration possible par un déplacement d'électrons :





I.3.4.2.a. Il est difficile d'adopter la même démarche pour construire pas à pas le schéma de Lewis de la molécule d'acide sulfurique : on doit partir de  $\text{SO}_2$  car  $\text{SO}$  n'a pas de réalité, et faire apparaître l'hypervalence du soufre pour fixer dans une même étape les deux groupes OH. C'est donc une démarche moins « initiatique ».

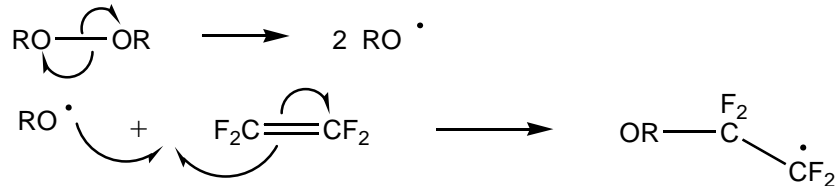
I.3.4.2.b. Il faut identifier le préfixe « thio- » pour montrer que le « thiosulfate » est un « sulfate soufré ». Faire écrire la structure de Lewis de l'ion sulfate pour la modifier en remplaçant un atome d'oxygène par un atome de soufre est une bonne démarche.

I.3.5.1. La polymérisation radicalaire d'une oléfine se fait par action d'un rayonnement UV adapté en présence d'une petite quantité d'initiateur de radicaux (peroxyde, AIBN...)

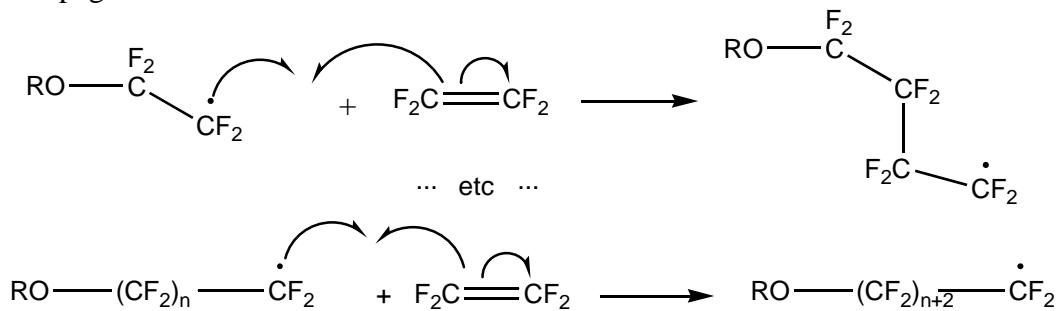
Le bilan peut s'écrire :  $n \text{F}_2\text{C}=\text{CF}_2 = \text{---}(\text{CF}_2\text{-CF}_2)_n\text{---}$

Le mécanisme se décompose en trois phases :

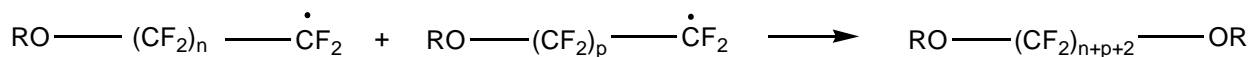
- Initiation :



- Propagation :



- Terminaison :

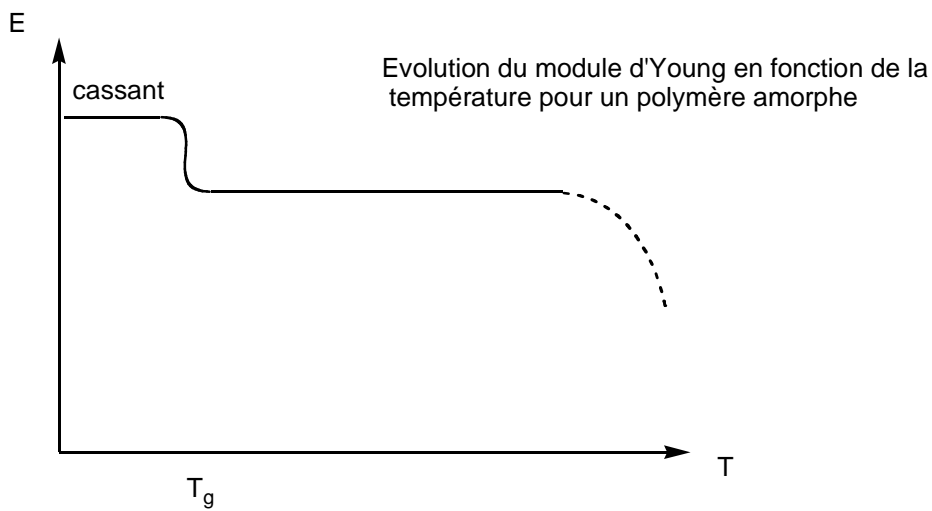
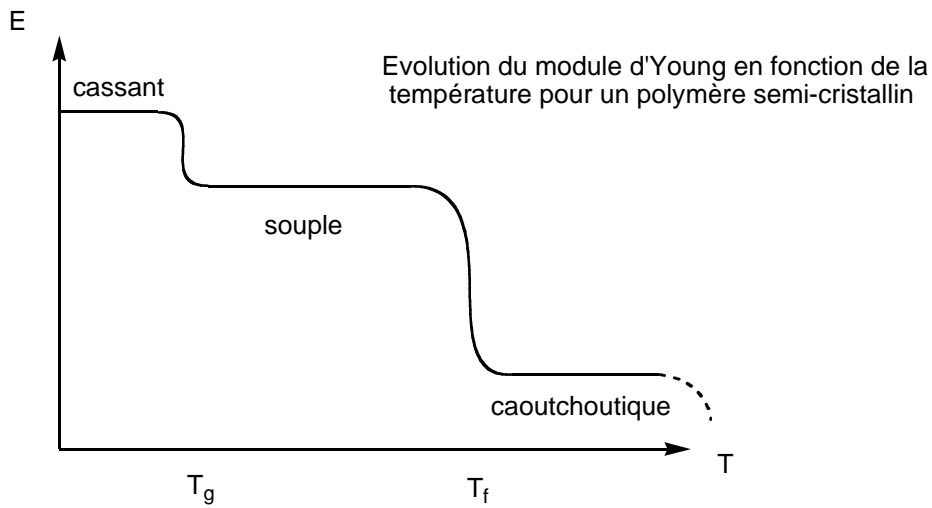


I.3.5.2.a. Une réaction de transfert peut être schématisée de la manière suivante (T est appelé agent de transfert) :  $\text{PM}_n^* + \text{T} = \text{PM}_n + \text{T}^*$ . Il s'agit de l'arrêt de la croissance de la chaîne par génération d'un nouveau centre actif permettant une autre croissance de chaîne.

I.3.5.2.b. Si des réactions de transferts se produisent, on obtient des chaînes plus courtes et (plus) ramifiées.

I.3.5.2.c. Si la chaîne est linéaire, c'est que l'on n'observe pas de réaction de transfert ; la liaison CF est trop forte pour être rompue.

I.3.5.2.d. Vraisemblablement, le PTFE est très cristallin puisque les chaînes sont parfaitement régulières. Qualitativement, on peut donner les courbes suivantes :



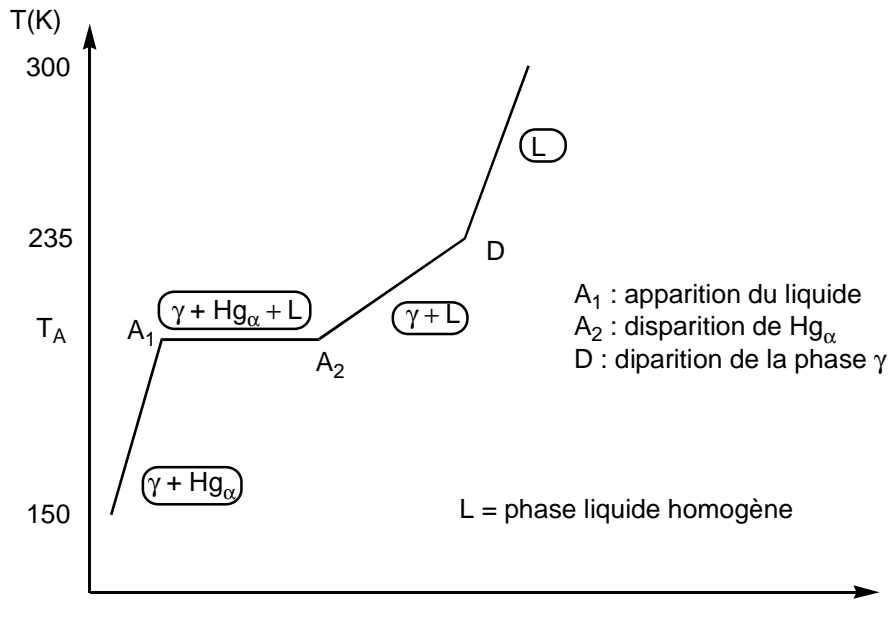
I.3.5.2.e. Lorsque T atteint et dépasse  $T_g$ , on observe une mobilité accrue des zones amorphes. Les chaînes sont en mouvement les unes par rapport aux autres car l'énergie thermique est suffisante pour rompre quelques liaisons de van der Waals.

Lorsqu'on dépasse  $T_f$ , on observe la fusion des zones cristallines : les chaînes sont alors en moindre interaction sur toute leur longueur et davantage de mouvements relatifs sont possibles par affaiblissement du taux de liaisons intermoléculaires.

1.4.1. Le point représentatif du mélange considéré, de coordonnées (15 ; 150) se trouve dans un domaine représentatif d'un état diphasé : mercure solide  $\alpha$  et phase  $\gamma$  (solution solide à 20 % en masse de thallium). Par application du théorème des moments chimiques, on obtient :

$m(\text{Hg}_\alpha)/m_{\text{totale}} = (20-15)/20 = 0,25$  ce qui donne une masse de mercure  $m(\text{Hg}_\alpha) = 2,5$  g et une masse de phase  $\gamma$   $m_\gamma = 7,5$  g

1.4.2. Courbe d'échauffement :

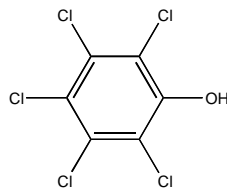


1.4.3. Les mélanges de composition égale à l'abscisse du point A sont des mélanges eutectiques : leur particularité est de fondre à température et composition constantes.

**II. Cas des substances organiques**

II.1. Plus le coefficient de partage est élevé, plus le composé est soluble dans l'alcool à chaîne longue ; c'est donc un composé à tendance hydrophobe, donc soluble dans les graisses, donc donnant un FBC élevé.

II.2.1. pentachlorophénol :



II.2.2.  $\text{ArO}^-$  est fortement stabilisé par les effets inductifs attracteurs des atomes de chlore, c'est donc une base plus forte que  $\text{PhO}^-$ .

II.2.3.  $M(\text{PCP}) = 6 \times 12 + 5 \times 35,5 + 16 + 1 = 266,5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Nombre de moles initial en PCP :  $n_0 = 2,0 \cdot 10^{-5} / M(\text{PCP}) = 7,5 \times 10^{-8} \text{ mol}$

On écrit la conservation de la matière en PCP et le coefficient de partage :

$$n_0 = [\text{PCP}]_{\text{eau}} \times V_{\text{eau}} + [\text{PCP}]_{\text{ol}} \times V_{\text{ol}} \quad \text{et} \quad [\text{PCP}]_{\text{ol}} / [\text{PCP}]_{\text{eau}} = P_{\text{OW}}$$

On en déduit :  $[\text{PCP}]_{\text{eau}} = n_0 / (V_{\text{eau}} + P_{\text{OW}} \times V_{\text{ol}})$

AN :  $[\text{PCP}]_{\text{eau}} = 6,7 \times 10^{-10} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

$$[\text{PCP}]_{\text{ol}} = 3,7 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Le volume d'eau est très largement supérieur au volume d'octanol pour compenser la valeur élevée du coefficient de partage et avoir suffisamment de PCP dans l'eau pour la détection.

II.2.4.a. Décroissance du coefficient de partage autour de  $\text{pH} = \text{pK}_a$  car la forme basique devient prédominante ; elle est plus soluble dans l'eau grâce à sa plus grande polarité et à son caractère ionique.

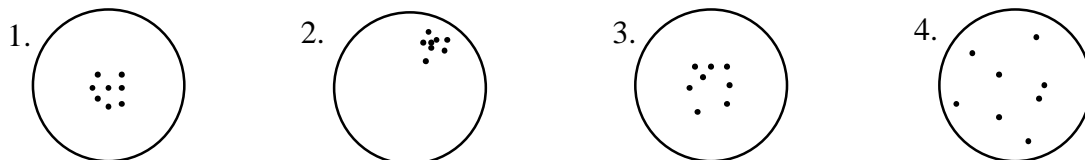
II.2.4.b. On peut penser à une nouvelle augmentation de la solubilité par un effet de complexation de la base conjuguée par les ions  $\text{Na}^+$  dont la concentration augmente nettement dans cette zone de pH élevé.

II.2.5.a. On peut expliquer à cet élève les différentes phases :

- repos : pour une bonne décantation ;
- soude et anhydride acétique : réaliser la transformation du PCP en un ester analysable ;
- toluène : pour réaliser une extraction de l'ester, plus soluble en phase organique qu'en phase aqueuse ;

- CPV : méthode d'analyse dont on pourra montrer l'analogie avec la CCM déjà pratiquée, en indiquant que les résultats peuvent être quantitatifs alors que la CCM en lycée est toujours utilisée qualitativement.
- II.2.5.b. - Question 1 : quelles sont les réactions qui se produisent sous l'effet de la soude et de l'anhydride acétique ?
- Question 2 : Quel est le rôle du toluène ?
- Question 3 : Que faut-il connaître concernant ces opérations pour déterminer la concentration en PCP présente dans la phase aqueuse après centrifugation ?
- Question 4 : Pourquoi ne pas analyser directement la phase aqueuse ?
- II.2.5.c. - Réponse 1 : formation du phénolate, bon nucléophile, pour une addition-élimination sur l'anhydride.
- Réponse 2 : extraction de l'ester formé
- Réponse 3 : il faut connaître le rendement de l'estérification et l'efficacité de l'extraction de l'ester par le toluène.
- Réponse 4 : le PCP peut être présent sous plusieurs formes selon le pH et l'eau peut éventuellement être gênante (liaisons H notamment).
- II.2.6.a. Une méthode expérimentale est *précise (juste)* lorsque les mesures qu'elle permet de réaliser sont reproductibles et donnent toujours un résultat suffisamment proche de la moyenne obtenue. On évalue cette précision par l'écart-type calculé sur un ensemble de mesures.
- II.2.6.b. Une mesure est *exacte* si elle conduit à une valeur proche de la valeur attendue. On évalue cette exactitude en calculant l'écart relatif entre la valeur mesurée et la valeur attendue.

II.2.6.c



## DEUXIEME PARTIE : recyclage des piles usagées

### **I. Généralités**

- I.1.a. Volta, au 19<sup>ème</sup> siècle, a conçu la pile qui porte son nom : il s'agit d'un empilement de disques de zinc et cuivre et de disques de carton ou tissu mouillés.
- I.1.b. On peut donc concevoir la présence d'ions  $Zn^{2+}$  et de  $O_2$  dissous ainsi que Zn et Cu. Il s'agit donc d'un fonctionnement par réduction de  $O_2$  (le plus oxydant) sur le cuivre (qui joue un rôle d'électrode inerte) et oxydation de Zn (le plus réducteur). En terminale S, on se contente des systèmes basés sur les couples  $M^{n+}/M$ , donc l'analogie avec la pile Daniell peut être faite pour l'anode en Zn mais pas pour la cathode en cuivre.
- I.2.a. La pile Leclanché contient un électrolyte acide : chlorure d'ammonium  $NH_4Cl$ , et la cathode est constituée d'une lame de zinc alors que la pile alcaline contient un électrolyte basique et que le zinc y est sous forme de poudre dans l'enveloppe en acier.
- I.2.b. On minimise en milieu basique les risques d'autodécharge par oxydation de la carcasse en zinc par  $H^+(aq)$  mais le zinc peut tout de même s'oxyder au contact de l'électrolyte aqueux et faire gonfler l'enveloppe de la pile par formation de solides à base de Zn(II), d'où le risque de fuite.

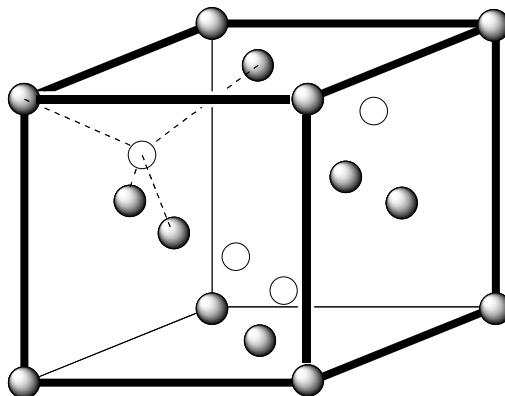
### **II. Quelques aspects d'un procédé de valorisation des piles usagées**

- II.1.1.a.      A                              B                              C                              D  
 $Zn^{2+}(aq)$                $Zn(OH)_2(s)$                $Zn(OH)_4^{2-}(aq)$                $Zn(s)$
- II.1.1.b. Frontière (1) : couple  $Zn^{2+}(aq)/Zn(s)$  de potentiel standard  $E^\circ_1$  tel que  $-0,85 = E^\circ_1 + 0,03 \cdot \log c/c^\circ$   
AN :  $c = 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$  donc  $E^\circ_1 = -0,76 \text{ V}$   
Frontière (3) :  $Zn(OH)_4^{2-}(aq) + 4H^+(aq) + 2e^- = Zn(s) + 4 H_2O(l)$   
La pente est donc de  $-0,06 \cdot 4/2 = -0,12 \text{ V/unité pH}$
- II.1.2.a. En milieu très basique, l'ion tétrahydroxozincate (II) se forme et donc le zinc au degré (II) passe en solution. Il faut maintenir le pH à une valeur supérieure au pH d'apparition de l'hydroxyde de zinc (II) et inférieure au pH de disparition de ce solide.
- II.1.2.b. - en milieu acide, on dissout le précipité  $Zn(OH)_2$  (passage du domaine B au domaine A) selon :  
 $Zn(OH)_2(s) + 2H^+(aq) = Zn^{2+}(aq) + 2 H_2O(l)$   
- le pouvoir oxydant de l'eau augmente par diminution du pH :  $E = -0,06 \cdot \text{pH}$  est une droite située hors du domaine D ;  $Zn(s)$  et  $H_2O(l)$  ont donc deux domaines disjoints sur le diagramme E-pH, ce qui montre qu'ils réagissent selon :  $Zn(s) + 2 H^+(aq) = Zn^{2+}(aq) + H_2(g)$  (passage de D vers A).
- II.2.1. La cémentation est l'action d'un réducteur provoquant la formation d'un dépôt solide (le ciment) contenant les espèces à éliminer à l'état métallique.
- II.2.2. On élimine Ni(II), Cu(II), Pb(II) et Cd(II) et conservant Zn(II) et Mn(II). On choisira donc Zn(s), qui est suffisamment réducteur et n'introduit pas de nouvelle espèce ; Mn(s) réduirait aussi Zn(II). On choisira le solide pulvérulent pour une plus grande vitesse de réaction (plus grande surface active).
- II.2.3. Le ciment est le dépôt résiduel ; il contient ici Ni, Cu, Pb et Cd solides.
- II.2.4. Toute mise en oeuvre d'une réaction de type  $nM_1 + p M_2^{n+} \rightarrow pM_2 + n M_1^{p+}$  comme par exemple la décoloration d'une solution de cuivre (II) par addition de poudre de zinc ou la formation d'un arbre de Saturne en réduisant les ions plomb(II) par du zinc.

## TROISIEME PARTIE : le carbure de silicium

### *I. Structure du carbure de silicium*

- I.1. Les atomes de silicium occupent les positions d'un réseau CFC et les atomes de carbone occupent la moitié des positions des sites tétraédriques, ce qui donne :



- I.2. Chaque atome de cette structure est lié à quatre voisins de nature différente de la sienne : le carbone, dans un site tétraédrique est entouré de quatre atomes de silicium ; le silicium est entouré de huit sites tétraédriques, dont la moitié seulement sont occupés.
- I.3. La cohésion d'une telle structure est assurée par les liaisons covalentes qui lient les atomes.
- I.4.  $a(\sqrt{3}/4) = r_{Si} + r_C$  puisqu'il y a contact sur un quart de diagonale de cube.
- I.5. La compacité  $C$  est le rapport du volume occupé par les atomes ( $V_{occ}$ ) sur le volume de la maille ( $V_{maille}$ ).
- $$V_{occ} = 4 \cdot (4/3) \cdot \pi \cdot r_{Si}^3 + 4 \cdot (4/3) \cdot \pi \cdot r_C^3$$
- $$V_{maille} = a^3 = [(4/\sqrt{3}) \cdot (r_{Si} + r_C)]^3$$
- Enfinement, après calcul,  $C = 0,38$  ;  $c'$  est une structure non compacte.
- I.6. Masse volumique :  $\rho = 4 \cdot M_{SiC} / \mathcal{N} a^3$  AN :  $\rho = 3,05 \text{ g.cm}^{-3}$

### *II. Préparation du carbure de silicium*

- II.1. L'approximation d'Ellingham consiste à considérer que l'enthalpie standard de réaction  $\Delta_r H^\circ$  et l'entropie standard de réaction  $\Delta_r S^\circ$  sont indépendantes de la température.
- II.2. D'après la loi de Van't Hoff, puisque  $\Delta_r H^\circ = 616 \text{ kJ.mol}^{-1} > 0$ ,  $K^\circ$  est une fonction croissante de la température.
- II.3.  $\Delta_r S^\circ = 349 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$  donc  $\Delta_r G^\circ = \Delta_r H^\circ - T \cdot \Delta_r S^\circ = 616 \cdot 10^3 - 349 \cdot T \text{ (J.mol}^{-1}\text{)}$
- II.4.a. La température d'inversion  $T_i$  est la valeur de  $T$  pour laquelle  $\Delta_r G^\circ$  s'annule.
- II.4.b.  $T_i$  est la limite entre la zone de température où la réaction est thermodynamiquement favorisée ( $\Delta_r G^\circ < 0$ ) et la zone où elle est thermodynamiquement défavorisée ( $\Delta_r G^\circ > 0$ ).
- II.4.c. Ici,  $T_i = 1765 \text{ K}$  ; puisque  $\Delta_r G^\circ$  est une fonction décroissante de  $T$ , la réaction est thermodynamiquement favorisée à des températures supérieures à  $T_i$ , zone où se trouve la valeur de température choisie dans le procédé indiqué.
- II.5. Par la règle de Gibbs, on obtient  $v = 4 + 2 - 4 - 1 = 1$ .  
En maintenant  $T$  constante, une diminution de pression conduit donc à une rupture de l'équilibre dans le sens de production de gaz, c'est-à-dire dans le sens direct. A terme, on a donc consommation totale du réactif limitant ( $\text{SiO}_2$ ) ; la transformation est alors totale.
- II.6. La surface spécifique est le rapport de la surface active sur la masse de catalyseur. Les réactions en catalyse hétérogène se déroulant à la surface du catalyseur, celle-ci doit être la plus grande possible pour présenter un grand nombre de sites actifs et permettre une augmentation notable de la vitesse de réaction.

## Utilisations

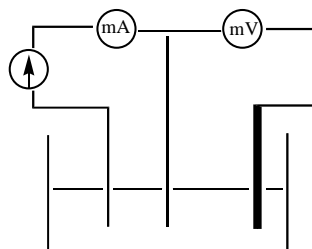
On peut penser à partir de ce schéma, à une activité mélangée de révision des notions connues et de recherche (encyclopédies, ouvrages de chimie industrielle, Internet) sur des réactions non connues. Il est important dans ce type d'activité de montrer que les connaissances acquises en première et terminale permettent de discuter de réactions utilisées dans l'industrie chimique et trouvant des applications dans la vie courante (monomères, carburants, dépollution, élaboration de composés organiques fonctionnalisés utilisés en chimie fine...)

- Rappeler les définitions des termes suivants :
  - o Hydrocarbure, hydrocarbure léger, alcane
  - o Isomérisation, oxydation
- Identifier après recherche les réactions suivantes (définition et/ou principe et bilan) :
  - o Hydrogénation et déshydrogénation
  - o Hydrodésulfuration et désulfuration ultime
- A partir des groupes fonctionnels oxydés connus (que l'on nommera), proposer des équations de réaction pour les réactions d'oxydation des hydrocarbures.
- Proposer un exemple d'isomérisation d'alcane (équation de réaction) et expliquer l'intérêt de ce type de transformation (penser à des utilisations courantes de produits directement issus de la chimie du pétrole).
- En s'appuyant sur le fonctionnement d'un pot catalytique automobile, expliquer le principe, les difficultés et la nécessité d'une telle catalyse.

## QUATRIEME PARTIE : destruction de polluants organiques dissous dans l'eau par un procédé d'oxydation avancée (POA)

### I. Production des radicaux HO• par le procédé électro-Fenton

I.1.1. Montage à trois électrodes :



aux. mesure réf

Le voltmètre permet de mesurer le potentiel de l'électrode de travail (par rapport à la référence) et l'ampèremètre permet de mesurer l'intensité du courant qui circule dans l'électrode de travail.

I.1.2. La contre-électrode autorise la circulation d'un courant, ce qu'on ne peut pas faire par l'électrode de référence, qui verrait sa composition évoluer par production d'une demi-équation redox en son sein.

I.1.3. On peut citer l'électrode au calomel saturée, l'électrode argent/chlorure d'argent, l'électrode au sulfate mercurieux.

Ex :  $\text{Ag(s)}/\text{AgCl(s)}/\text{K}^+(\text{aq}), \text{Cl}^-(\text{aq}), \text{KCl(s)}$   $E = E^\circ(\text{Ag}^+/\text{Ag}) + 0,06 \cdot \log(\text{K}_{\text{S}(\text{AgCl})}/\sqrt{\text{K}_{\text{S}(\text{KCl})}})$  : le potentiel est constant car la concentration en ions  $\text{Cl}^-$  est fixée par la saturation en  $\text{KCl}$ , à  $T$  donnée.

I.2.1.  $E^\circ(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}) + 0,06 \cdot \log([\text{FeSO}_4^+]\beta_1/\beta_2[\text{FeSO}_4]) = E^\circ(\text{FeSO}_4^+/\text{FeSO}_4) + 0,06 \cdot \log([\text{FeSO}_4^+]/[\text{FeSO}_4])$  donc  $E^\circ(\text{FeSO}_4^+/\text{FeSO}_4) = E^\circ(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}) + 0,06 \cdot \log(\beta_1/\beta_2)$

I.2.2. AN :  $E^\circ = 0,68 \text{ V}$

I.2.3. La portion AB correspond à l'oxydation de l'eau :  $2 \text{H}_2\text{O(l)} = \text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 4 \text{e}^-$

I.2.4. La portion CE correspond à la réduction de  $\text{FeSO}_4^+$  :  $\text{FeSO}_4^+(\text{aq}) + \text{e}^- = \text{FeSO}_4(\text{aq})$

I.2.5. Sur la portion EG, la réduction de  $\text{FeSO}_4^+$  continue, avec celle du dioxygène dissous : on observe donc  $\text{FeSO}_4^+(\text{aq}) + \text{e}^- = \text{FeSO}_4(\text{aq})$  et  $\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^- = \text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$

- I.3.1. Dans la portion FG, donc par exemple à 0,25 V, on observe donc les deux réactions données ci-dessous :
- génération du fer au degré +II selon :  $\text{FeSO}_4^+(\text{aq}) + \text{e}^- = \text{FeSO}_4(\text{aq})$
  - production de peroxyde d'hydrogène selon :  $\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^- = \text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$
- I.3.2. La présence concomitante du peroxyde d'hydrogène et du fer (II) permet la réaction de Fenton ; en la combinant avec les deux réductions données ci-dessus, on obtient au final la réduction de  $\text{O}_2$  en  $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{HO}\bullet$  :  $\text{O}_2(\text{g}) + 3\text{H}^+(\text{aq}) + 3 \text{e}^- = \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{HO}\bullet$
- I.3.3. Bilan global d'électrolyse :
- |           |  |
|-----------|--|
| Anode :   | $2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) = \text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 4 \text{e}^-$                  |
| Cathode : | $\text{O}_2(\text{g}) + 3\text{H}^+(\text{aq}) + 3 \text{e}^- = \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{HO}\bullet$ |
|           | $2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{O}_2(\text{g}) = 4 \text{HO}\bullet$                                     |
- I.3.4. La génération du réactif  $\text{HO}\bullet$  se fait simplement avec l'eau et le dioxygène, sous l'effet d'un apport d'énergie électrique. C'est un procédé non polluant.

## II. Etude de la dégradation d'un colorant par le procédé électro-Fenton

- II.1.1. On travaille à  $\lambda_{\text{max}}$  parce que la sensibilité de la mesure à une faible modification de concentration est alors la plus grande (coefficient d'extinction molaire maximal) et pour minimiser les écarts de détermination d'absorbance, car à cet endroit,  $dA/d\lambda = 0$ .
- II.1.2. On mesure l'absorbance  $A$  de la solution :  $A = \log(I_0/I) = \sum_i (\epsilon_i \cdot l \cdot c_i)$  avec  $I$  (respectivement  $I_0$ ) intensité en sortie (respectivement en entrée) de cuve,  $l$  la longueur traversée par le faisceau,  $\epsilon_i$  le coefficient d'extinction molaire de l'espèce absorbante  $i$  et  $c_i$  sa concentration dans la solution étudiée. Ici, seul le NET absorbe à cette longueur d'onde donc  $A = \epsilon \cdot l \cdot [\text{NET}]$
- II.1.3.a. - Etablissement d'une droite étalon  $A = f(c)$  par mesure de  $A$  pour des solutions contenant seulement l'espèce absorbante à différentes concentrations.  
 - Mesure de  $A$  pour la solution  $S_0$  et report sur la droite afin de déterminer  $c_0$ .
- II.1.3.b.  $c_0$  est choisie de telle sorte que l'absorbance de cette solution soit inférieure à 2.
- II.1.3.c.  $c_0$  doit être idéalement placée sur la droite étalon, donc *incluse* dans le domaine des concentrations choisies pour les solutions ayant servi à tracer la droite étalon.
- II.1.3.d. - solutions de NET de concentrations  $c_1$  à  $c_5$  connues (25 mL de chacune par binôme)  
 - solution de NET de concentration  $c_0$  inconnue pour les élèves (25 mL par binôme)  
 - spectrophotomètre et cuves  
 - pipettes Pasteur  
 - 6 béchers de 25 mL  
 - eau distillée  
 - si on veut faire faire une dilution pour obtenir une des solutions de la gamme étalon ou si la solution d'étude est à diluer pour correspondre à la gamme étalon, on demandera en plus une ou des fioles jaugées de 20 ou 25 mL avec bouchon, une ou des pipettes jaugées de contenance adaptée, un bécher de 25 mL.
- II.2.1. L'apport de radicaux hydroxyde se fait continûment et régulièrement si le courant est constant grâce à l'électrolyse.
- II.2.2.  $v = k_{\text{app}}[\text{NET}]^\alpha = -d[\text{NET}]/dt$   
 Si  $\alpha = 1$ , alors  $\ln[\text{NET}] - \ln [\text{NET}]_0 = -k_{\text{app}}t$ . Le tracé de  $\ln[\text{NET}]$  en fonction de  $t$  confirme cette hypothèse et on détermine  $k_{\text{app}} = 0,86 \text{ min}^{-1}$ .

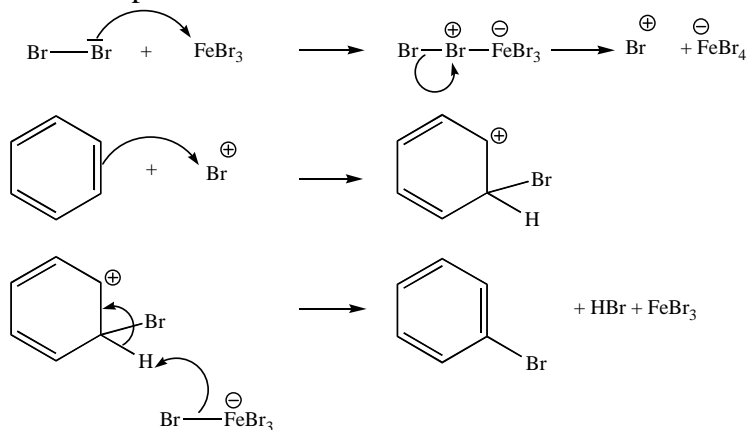


## CINQUIEME PARTIE : synthèse de composés d'intérêt pharmacologique

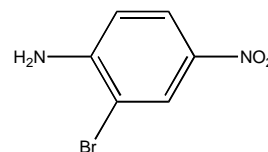
### I. L'étape 1 : bromation d'un cycle aromatique

I.1. Les critères permettant d'attribuer le caractère aromatique à un composé sont le critère de Hückel (délocalisation totale sur un cycle plan de  $4n + 2$  électrons) ou le déplacement chimique des protons du cycle ( $\delta$  entre 7 et 8,5 ppm pour des H à l'extérieur du cycle et/ou négatif pour des H à l'intérieur du cycle).

I.2. L'action de dibrome en présence de  $\text{FeBr}_3$  ou en présence de fer permet la bromation d'un cycle. Cette substitution électrophile suit le mécanisme ci-dessous :

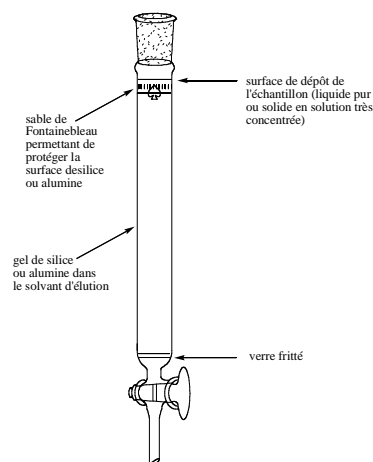


I.3. Le composé **1** présente un groupement nitro (inductif et mésomère attracteur) qui oriente donc une substitution électrophile aromatique en méta (position 2 ou 6 ici) et un groupe amino (inductif attracteur mais mésomère donneur) qui oriente donc la  $\text{SE}_{\text{Ar}}$  en ortho (position 2 ou 6 ici) ou para (position 4, déjà occupée), d'après les règles empiriques de Holleman. En conséquence, on observera une substitution majoritairement en position 2 ou 6, pour obtenir le composé **2a** de formule : L'orientation de la bromation sur la molécule de 5-bromoaniline serait moins sélective car les deux groupes en place ne favoriseraient pas la même position. Le rendement en composé **2b** serait donc bien moindre.



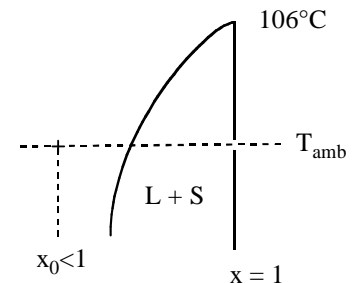
I.4. Il est nécessaire de sécher la phase organique car la solubilité de l'eau dans le THF n'est pas nulle ; les traitements du brut réactionnel laissent donc des traces d'eau. On utilise un solide hygroscopique de type ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  anhydres) qui fixe l'eau et se dépose. Il suffit ensuite de filtrer pour récupérer une phase organique séchée.

I.5.a. Chromatographie sur colonne :  
Après dépôt du mélange, on procède à l'élution, par gravité ou sous pression pour une chromatographie flash. On récupère en sortie différentes fractions selon la vitesse d'élution des constituants : plus la polarité est grande, plus la vitesse d'élution est faible (forte rétention sur le support solide).



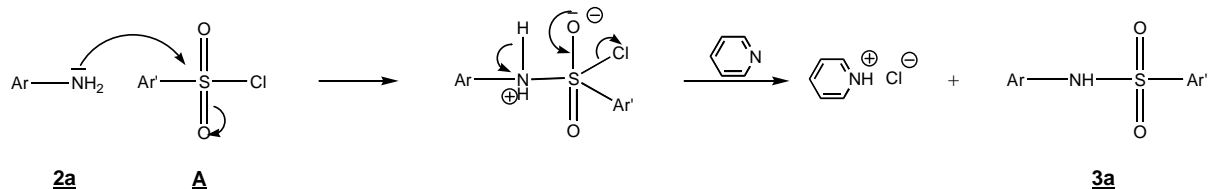
- I.5.b. On peut proposer un TP consistant à préparer d'une part un mélange des deux produits disponibles et d'autre part des éluants différents (x % de cyclohexane et 100-x % d'acétate d'éthyle, avec x variant de 0 à 100 par pas de 10 ou 20) puis à réaliser des CCM avec dépôt de P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> et du mélange par élution dans les différents solvants préparés.  
Scénario : les préparations des mélanges sont réparties sur les différents groupes de TP, ainsi que les CCM correspondantes, et l'exploitation se fait en travail collectif (commentaire des plaques obtenues et conclusion quant au meilleur éluant).
- I.6. Il s'agit d'un effet d'abaissement cryoscopique : un mélange impur présente souvent une température de fusion plus faible, comme l'indique la portion de diagramme binaire liquide-solide ci-dessous :

$x_0$  est la fraction molaire en composé 2b :  
c'est un mélange liquide à température ambiante.  
Après purification  $x = 1$ , il s'agit alors du solide à température ambiante.



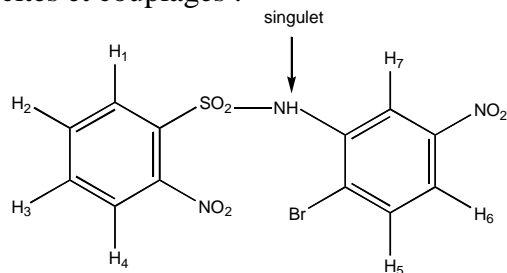
## II. L'étape 2

- II.1. Il s'agit d'une addition-élimination :



- II.2. La pyridine permet de capturer l'acide formé afin d'éviter une diminution du pouvoir nucléophile de l'amine par protonation.
- II.3. Une recristallisation est une méthode de purification d'un produit solide. Elle est fondée sur la différence de solubilité du produit et des impuretés dans le solvant choisi. Par exemple, on choisira un solvant dans lequel les impuretés sont solubles à chaud comme à froid, alors que le produit n'y est soluble qu'à chaud. Ainsi, on dissout l'ensemble produit + impuretés à chaud et en laissant refroidir l'ensemble, on obtient la cristallisation du produit purifié, les impuretés restant en solution.
- II.4.  $n_{3a} = 0,91 \times 15 = 13,65$  mmol  
 $M_{3a} = 402$  g.mol<sup>-1</sup>  
 Donc  $m_{3a} = 5,49$  g

## II.5. Prévision des multiplicités et couplages :



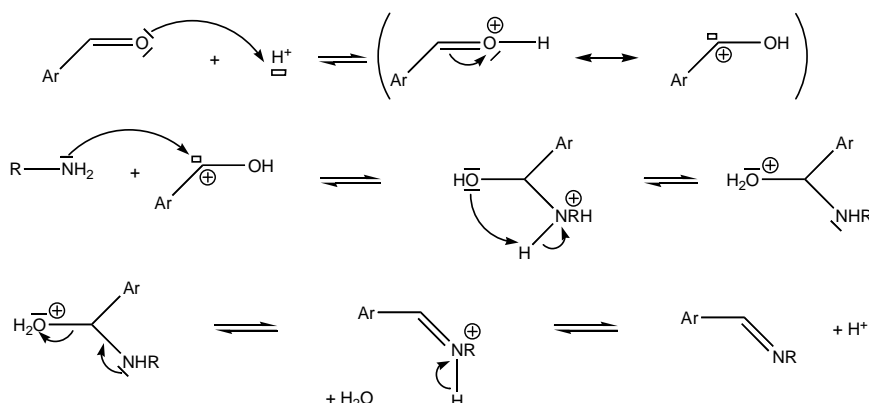
	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>4</sub>	H <sub>5</sub>	H <sub>6</sub>	H <sub>7</sub>
<sup>3</sup> J(H <sub>2</sub> )		<sup>3</sup> J(H <sub>1</sub> )=	<sup>3</sup> J(H <sub>2</sub> )=	<sup>3</sup> J(H <sub>3</sub> )	<sup>3</sup> J(H <sub>6</sub> )	<sup>3</sup> J(H <sub>5</sub> )	<sup>4</sup> J(H <sub>6</sub> )
<sup>4</sup> J(H <sub>3</sub> )		<sup>3</sup> J(H <sub>3</sub> )	<sup>3</sup> J(H <sub>4</sub> )	<sup>4</sup> J(H <sub>2</sub> )		<sup>4</sup> J(H <sub>7</sub> )	
		<sup>4</sup> J(H <sub>4</sub> )	<sup>4</sup> J(H <sub>1</sub> )				
dd		td	td	dd	d	dd	d

Affectation des signaux :

- H<sub>7</sub> : 8,64 ppm (doublet avec couplage en <sup>4</sup>J)
  - H<sub>5</sub> : 7,70 ppm (doublet avec couplage en <sup>3</sup>J)
  - H<sub>6</sub> : 7,91 ppm (on retrouve les couplages avec H<sub>5</sub> et H<sub>7</sub>)
  - H<sub>1</sub> et H<sub>4</sub> : 7,98 et 8,08 ppm (les deux dd restants)
  - H<sub>2</sub> et H<sub>3</sub> : 7,75 et 7,82 ppm (les deux td restants)
- | si l'on considère l'effet -M de NO<sub>2</sub> le plus fort,  
| alors H<sub>2</sub> et H<sub>4</sub> sont les plus déblindés

## III. L'étape 6

### III.1. Mécanisme d'action d'une amine primaire sur un dérivé carbonyle en milieu acide : formation d'une imine

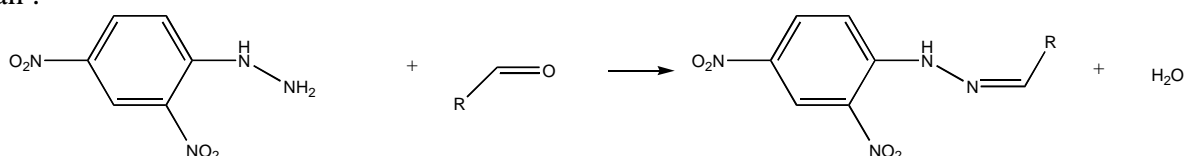


III.2. - Effet thermodynamique : il s'agit de déplacer l'équilibre thermodynamique dans le sens direct par un excès de réactif ; en TS, on peut proposer un exercice de comparaison de quotients et constante.

- Effet cinétique : on accroît la vitesse de réaction par excès de réactif (concentration plus grande)

III.3. Il s'agit du test à la 2,4-DNPH, de présence d'un groupe carbonyle, effectué par exemple lors de l'expérience de la lampe sans flamme.

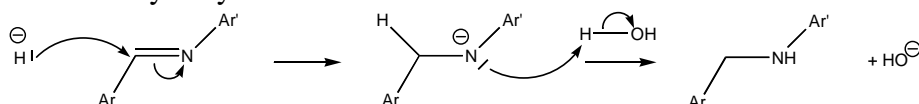
Bilan :



III.4. Tétrahydroborate (III) de sodium : NaBH<sub>4</sub>

III.5. En présence de l'imine, il subsiste l'excès d'aldéhyde, qui peut réagir avec l'hydrure. De plus, la formation de l'imine se fait en milieu acide, incompatible avec l'hydrure.

III.6. Mécanisme simplifié : action nucléophile de l'ion hydrure issu de l'anion trihydrocyanoborate (III), suivie d'une hydrolyse :



# RAPPORT RELATIF A LA COMPOSITION DE CHIMIE

Le sujet, intitulé « Chimie et Avenir », était composé de cinq parties indépendantes, pouvant être traitées dans un ordre quelconque. Comme pour les épreuves de la session précédente, une part importante des questions concernait la pratique pédagogique et les connaissances en histoire des sciences, afin de valoriser les compétences professionnelles des candidats.

## Observations générales

Il est nécessaire de formuler à nouveau quelques remarques d'ensemble.

### - *la rédaction des copies :*

- Sur la forme, il n'est jamais inutile de rappeler que les copies doivent être propres, lisibles, et que la numérotation des questions doit être respectée et clairement mise en évidence.
- Sur le fond, la rédaction doit être claire, précise et concise, mais pas laconique : une réponse limitée à un ou deux mots-clés, même judicieux, ne saurait être récompensée ; le jury n'a pas à deviner ou traduire les intentions ou les connaissances du candidat. On attend implicitement pour toute réponse qu'elle soit accompagnée d'un minimum de justifications. Les valeurs numériques, données avec le bon nombre de chiffres significatifs, ne seront valides qu'accompagnées de leur unité. Dans les questions relatives à des calculs (constantes thermodynamiques, potentiels d'oxydo-réduction, concentrations, etc.) beaucoup d'erreurs sont commises sans être remarquées par les candidats qui, avec un peu d'esprit critique sur la valeur numérique, pourraient les corriger.

### - *les questions relatives aux compétences professionnelles :*

- Ces questions étaient de plusieurs types : proposer une démarche de réflexion à un élève ou étudiant (formalisme de Lewis), commenter un protocole expérimental issu d'une publication, au niveau secondaire puis au niveau supérieur, proposer une activité réfléchie autour des notions de catalyse, chimie du pétrole, chimie industrielle, en lien avec les programmes de première et de terminale scientifiques, discuter de protocoles de travaux pratiques courants en lycée (spectrophotométrie et synthèse organique).
- Dans tous les cas, le jury attend des réponses suffisamment développées pour qu'elles puissent correspondre à ce que l'on répondrait à un élève ou proposerait à une classe. Il est indéniable qu'une rédaction soignée prend du temps, mais le barème prend évidemment cet aspect en considération. Les rares candidats qui ont pris le temps de répondre à ces questions se sont vus attribuer un nombre significatif de points.
- Le jury recommande donc aux futurs candidats d'apporter un soin tout particulier à ce type de questions dans leur préparation au concours. Une bonne connaissance des programmes du collège à la terminale représentera notamment un atout majeur pour traiter ces questions avec plus d'efficacité.

### - *lecture et analyse de l'énoncé*

Nombres de questions nécessitaient simplement une lecture soignée et rigoureuse de l'énoncé. Cette rigueur dans la lecture manque à beaucoup de candidats, qui ne parviennent pas à trouver un lien entre protocoles ou schémas proposés et formulation des questions qui s'y rapportent (voir les remarques qui suivent, notamment sur les deuxième et quatrième parties).

Il faut savoir resituer la question dans un cadre plus général pour montrer qu'on a du recul sur la finalité des questions posées, ce qui fait aussi partie des compétences professionnelles attendues et valorisées.

Rappelons enfin que les programmes des épreuves paraissent au Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, constituant ainsi la référence à partir de laquelle les candidats sont invités à se préparer au concours. Le jury les incite à profiter des

aides précieuses proposées par les centres de préparation académiques et le C.N.E.D. (Centre National d'Enseignement à Distance). La composition sur les épreuves des années précédentes constitue en outre un entraînement efficace à la rédaction de réponses complètes et soignées et une vérification du niveau de connaissances requis.

## Observations particulières

### Première partie : accumulation des polluants dans les milieux naturels

#### *Cas du mercure*

Le lien entre la place de l'élément dans la classification périodique et la configuration électronique de valence n'est quasiment jamais fait, et nombre de candidats donnent une configuration électronique complète et pas seulement la configuration électronique de valence.

Le calcul de la constante d'équilibre de la réaction des ions étain (II) avec les ions mercure (II) devait s'accompagner d'un « commentaire ». Conclure simplement que la réaction est thermodynamiquement favorisée à cette température ne peut suffire : cette réaction permet de transformer le mercure au degré +II en mercure au degré 0, dont la quantité est ensuite mesurée. La réaction considérée doit donc être totale puisqu'il s'agit d'un titrage ; le calcul de la constante montre que le choix de cette réduction par l'étain (II) est judicieux dans le protocole. Par ailleurs, ce calcul relève de la thermodynamique, tout comme les conclusions qui en découlent : on ne peut rien conclure ici sur la cinétique.

Les questions suivantes concernaient le formalisme de Lewis : il s'agissait de montrer que l'écriture d'un schéma de Lewis pour un édifice polyatomique un peu complexe peut se faire simplement par construction pas à pas de liaisons covalentes issues soit d'une mise en commun d'un électron par atome, soit d'une interaction entre un doublet non liant d'un atome et une orbitale vacante de l'autre atome. Cette dernière possibilité préfigure les déplacements de doublet formalisés en chimie organique, d'un nucléophile vers un électrophile. On peut regretter par ailleurs que des structures proposées dépassent trop souvent la règle de l'octet pour l'atome d'azote.

Les réactions de polymérisation et le comportement thermomécanique des polymères constituent une part importante du programme de deuxième année de classes préparatoires, tout comme ces matériaux revêtent une importance économique non négligeable, mais très peu de candidats ont abordé ces questions.

De la même manière, le faible taux de réponses correctes aux trois questions relatives au diagramme binaire montrent une insuffisance de connaissances et compétences dans ce domaine, pourtant essentiel au chimiste qui ne travaille que très rarement sur des corps purs !

#### *Cas des substances organiques*

On constate beaucoup d'erreurs sur la formule semi-développée du pentachlorophénol (PCP), qui ne présentait cependant aucune difficulté. Il est pourtant important pour les candidats de maîtriser les règles fondamentales de nomenclature.

La détermination des concentrations en PCP dans chacune des phases a posé problème à beaucoup de candidats qui, souvent, n'ont pas cherché à écrire la simple relation de conservation de matière.

Il s'agissait ensuite de commenter les différentes étapes d'un protocole opératoire :

- à un élève de première scientifique, dans le cadre des TPE, il est important de montrer que les connaissances acquises jusque là permettent de comprendre le principe de cette analyse, et que l'on peut *réfléchir* sur des notions nouvelles, utiliser ses compétences et pas seulement les restituer.

- un élève de CPGE, en TIPE, doit témoigner d'une maîtrise complète des expériences présentées, non seulement dans la compréhension des techniques mais aussi dans l'analyse du protocole (tenir compte des rendements d'estérification et d'extraction par le toluène par exemple).

Cette première partie se terminait par une discussion sur la précision d'une *méthode* (en lien avec la reproductibilité des mesures) et l'exactitude d'une *mesure*. Il s'avère que peu de candidats savent discerner et donner une représentation de ces deux notions.

### Deuxième partie : recyclage des piles usagées

Si presque tous les candidats connaissent la pile Volta, peu d'entre eux savent expliquer son fonctionnement et le confondent avec celui d'une pile Daniell.

Le procédé décrit est très proche du mode d'obtention de la solution électrolytique de sulfate de zinc destinée à l'élaboration du zinc par hydrométallurgie, à quelques différences près que la lecture attentive et rigoureuse du schéma permettait de cerner...

L'ensemble de cette partie a été convenablement traité.

### Troisième partie : le carbure de silicium

Ce composé est un matériau dont les propriétés permettent son usage comme support de phase active en catalyse hétérogène (et non comme catalyseur lui-même contrairement à ce que nombre de candidats ont écrit).

#### *Cristallographie*

Il semble que les structures ioniques de type AB soient mal connues des candidats, qui ont souvent confondu la structure de la blende avec celle du chlorure de sodium.

La notion de coordinence est méconnue de beaucoup de candidats : une confusion apparaît entre coordinence et multiplicité. Les deux valeurs étant égales dans cette structure de type blende, il est par ailleurs nécessaire de justifier le résultat donné, tout au moins en rappelant ce qu'est la coordinence.

Beaucoup de candidats semblent ignorer que la cohésion des solides ioniques, covalents, métalliques et moléculaires n'est pas assurée par le même type d'interactions, ce qui génère par ailleurs des propriétés spécifiques qui font l'intérêt de l'étude de ces solides. La proximité des deux éléments silicium et carbone dans le tableau périodique permet ici de conclure sur le caractère covalent de la liaison Si-C dans le solide.

Même si la compacité et la masse volumique sont définies et formulées correctement, les applications numériques correspondantes sont trop rarement exactes. Ici encore, beaucoup de candidats proposent des valeurs pour la masse volumique que le simple bon sens devrait éliminer.

#### *Thermodynamique*

Il est chaque année rappelé dans les rapports de jury qu'une attention toute particulière doit être portée sur les chapitres de thermodynamique. Une extrême rigueur dans les définitions et l'utilisation des grandeurs est nécessaire pour la description thermodynamique des systèmes chimiques. On remarque à la lecture des copies :

- une confusion fréquente entre  $\Delta_f H^\circ$  et  $\Delta_r H^\circ$ ; entre  $S^\circ$  et  $\Delta_r S^\circ$ ; entre  $c_p^\circ$  et  $\Delta_r c_p^\circ$
- une utilisation inadaptée et fautive de  $\Delta_r G^\circ$  pour conclure sur l'effet de la température sur la constante d'équilibre, au lieu de l'application de la loi de Van't Hoff

- une absence de distinction entre une réaction thermodynamiquement *favorisée* ( $\Delta_r G^\circ < 0$ ) et une réaction thermodynamiquement *possible* ( $\Delta_r G < 0$ ), qui se traduit par une mauvaise compréhension de ce que peut représenter la température d'inversion.
- une absence d'utilisation de la valeur de la variance (ici,  $v = 1$ , résultat à justifier), qui conduit à conclure sur le *déplacement* d'équilibre alors qu'on provoquait une *rupture* par diminution de pression à température constante.

Cette partie se terminait par une question relative à la surface spécifique d'un catalyseur, qui n'a presque jamais été correctement définie.

### *Utilisation d'un schéma synoptique d'applications*

On peut regretter que peu de candidats aient consacré du temps à la proposition d'une activité réfléchie basée sur le schéma donnant quelques exemples de réactions catalytiques.

L'ensemble des transformations évoquées, excepté les désulfurations qui donneront lieu à une recherche encyclopédique ou sur internet, peuvent être rattachées aux aspects évoqués dans le programme de première S (modification du squelette carboné, aménagement fonctionnel et réactions d'oxydo-réduction, chimie du pétrole) et du programme de terminale S (caractères généraux de la catalyse). Une telle activité est l'occasion de réinvestir des compétences (repérage des groupes fonctionnels en chimie organique, aptitude à écrire une équation de réaction ou une demi-équation d'oxydo-réduction permettant les interconversions entre ces fonctions...), des connaissances (spécificité et sélectivité du catalyseur, isoméries...) et de montrer l'intérêt économique et industriel de la chimie (produits de base de l'industrie, polymères et plastiques, dépollution des gaz d'échappement automobile et des effluents industriels gazeux...). Encore une fois, une connaissance préalable des programmes du secondaire permet d'avoir davantage de recul sur les compétences exigibles et les liens que l'on peut établir avec de nombreuses applications de la chimie.

### Quatrième partie : destruction de polluants organiques dissous par un procédé d'oxydation avancée

#### *Production électrolytique des radicaux HO\**

Le montage à trois électrodes couramment utilisé pour établir le tracé de courbes intensité-potential est mal maîtrisé, et le rôle et la nécessité d'une contre-électrode n'apparaît pas clairement dans les réponses formulées.

De même, la constitution des électrodes couramment employées comme référence n'est pas présentée de manière claire et efficace. Il s'agit finalement d'une application particulière de la formule de Nernst, qui rejoint d'ailleurs la question I.2.1 de détermination d'un potentiel standard d'un couple d'ions complexés à partir du potentiel standard du couple d'ions libres, et pour laquelle nombre de candidats écrivent plus d'une page de calculs (souvent pour aboutir à une réponse fautive) quand trois lignes suffisent. La manipulation de grandeurs relatives aux réactions (constantes d'équilibre) ou aux demi-équations d'oxydo-réduction ( $\Delta_r G^\circ = \pm nFE^\circ$  ou formule de Nernst) doit être maîtrisée et rapide.

Faut-il rappeler que l'électrode standard à hydrogène n'est pas couramment employée en séance de travaux pratiques ?

La lecture des courbes intensité-potential montre que beaucoup de candidats n'analysent pas avec assez de pertinence les informations données dans l'énoncé : nature des espèces présentes initialement, potentiels standard d'oxydoréduction, rapidité des couples mis en jeu. La formulation des questions I.2.5. et I.3.1. devait amener les candidats à ne pas oublier le caractère additif de la mesure des intensités.

Beaucoup n'ont pas saisi le principe de production simultanée des ions fer (II) et de l'eau oxygénée par électrolyse, c'est à dire des deux réactifs nécessaires à la formation des radicaux HO\* selon la réaction de Fenton ; là encore, une lecture réfléchie de l'énoncé permettait de ne pas se tromper...

Enfin, ce procédé est particulièrement non polluant puisqu'il n'utilise qu'eau et dioxygène ; les candidats évoquant une pollution par les radicaux formés n'ont donc pas lu correctement l'énoncé et pas saisi qu'ils étaient ensuite consommés par la destruction du colorant organique.

## *Étude de la dégradation du NET*

Là encore, le lien avec la partie précédente est trop rare : les radicaux HO<sup>•</sup> sont produits de manière continue par électrolyse donc leur concentration est considérée comme constante ; ce ne sont pas ici des intermédiaires réactionnels. L'exploitation des données cinétiques est tout à fait satisfaisante, mais quelques commentaires sont nécessaires sur les questions relatives à la détermination de la concentration en NET en solution. En effet, la limite de linéarité de la loi de Beer-Lambert dépend de l'espèce étudiée, il ne suffit pas de dire que  $c$  doit être inférieure à  $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$  mais il faut apporter une explication : saturation du spectrophotomètre, solution trop opaque, limite de détection et nécessité d'établir une courbe d'étalonnage avec des valeurs de concentration extrêmes qui encadrent la valeur  $c_0$  à déterminer. Enfin, lorsqu'il est demandé d'établir une liste de matériel de travaux pratiques, le jury attend une réponse rédigée et complète, et non une énumération approximative et incomplète de matériel envisageable finalement pour toute séance de TP...

### Cinquième partie : synthèse organique

La notion d'aromaticité (caractère cyclique de la molécule et de la délocalisation complète des électrons) est très mal connue, ainsi que les conditions usuelles de bromation d'un aromatique, qui ne saurait avoir lieu sans un acide de Lewis permettant la formation d'un électrophile suffisamment puissant pour permettre la rupture de l'aromaticité.

Lorsqu'une justification de régiosélectivité est demandée, le jury attend qu'elle soit complète et s'appuie sur des règles à citer : on attendait ici les règles de Holleman et pas seulement une simple mention des effets électroniques de chaque substituant.

Les techniques usuelles de la chimie organique (chromatographie, séchage, recristallisation) sont correctement décrites mais leur principe ou leur nécessité sont trop rarement explicités.

On attendait, pour l'étude CCM demandée, un scénario de TP qui mette clairement en commun tous les résultats des binômes auxquels on aura demandé un travail différent. Le mode opératoire d'une CCM n'était pas demandé dans cette question.

Le passage d'un mélange impur huileux à un produit pur solide peut intriguer des élèves ou des étudiants, qui peuvent donc être amenés à poser cette question à l'enseignant : il est intéressant de savoir donner cette explication en relation avec les propriétés particulières des mélanges binaires en termes de changement d'état.

En ce qui concerne l'écriture des mécanismes, un soin tout particulier doit être apporté au respect du formalisme des flèches : elles doivent partir des doublets et non des charges. Une compréhension des mécanismes courants par une bonne analyse de la réactivité des espèces doit permettre d'écrire des mécanismes analogues sur des substrats différents ; il s'agissait ici, d'écrire une addition-élimination sur le groupement  $-S(=O)_2Cl$ , semblable à  $-C(=O)Cl$ , par action nucléophile de l'amine aromatique 2a. Cette transformation libère HCl, qui peut réagir sur l'amine et limiter son pouvoir nucléophile. La pyridine est donc ajoutée pour capter l'acide formé et ainsi éviter une perte de réactivité de l'amine : puisque l'énoncé rappelait le caractère de base faible de la pyridine, la réponse du type « la pyridine réagit avec l'acide formé » ne pouvait suffire...

Une bonne prévision des multiplicités des signaux RMN permettait l'analyse rapide du spectre fourni.

Le traitement satisfaisant de la partie III n'amène que quelques remarques :

- si une réaction est menée en milieu acide, c'est que la réactivité du substrat s'en trouve accrue : il faut donc envisager la réaction acide-base dès le début du mécanisme ;



- on demandait en III.3. une réaction conduisant à la formation de C=N à partir de C=O (il s'agissait de la formation d'une hydrazone par action de la 2,4-DNPH) et une expérience dans laquelle on fait appel à cette réaction (toute expérience conduisant à la formation d'un dérivé carbonyle que l'on veut identifier, le test à la 2,4-DNPH n'étant pas considéré comme une expérience à part entière).

## **Conclusion générale**

Le sujet était de longueur raisonnable, et certains candidats l'ont intégralement traité. Sur l'ensemble des copies, chaque question a reçu au moins une réponse correcte. Le jury conseille cependant aux futurs candidats de se préparer tout particulièrement aux questions concernant les compétences et la pratique professionnelles (élaboration d'exercices, de séances de TP, d'activités de synthèse ou de découverte...).

Si ce rapport souligne essentiellement les erreurs commises, il faut mentionner tout de même la qualité des meilleures copies qui témoignent d'un bon niveau dans la discipline. Puissent ces réussites encourager les futurs candidats dans une préparation certes difficile à mener de front avec leur activité professionnelle mais qui leur apportera les clés de la réussite.

# 10 DÉROULEMENT DES ÉPREUVES ORALES

## SESSION 2009

### Conditions matérielles et généralités

Les épreuves d'admission se sont déroulées au Lycée Saint Louis à Paris du 17 au 25 avril 2009. Le jury a délibéré immédiatement après la fin des épreuves. Les résultats ont été proclamés le 27 avril 2009.

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 :

- leçon de physique (coefficient 1) et montage de chimie (coefficient 1) ou bien
- leçon 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 2009, 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 leçons, et un sujet à choisir parmi deux proposés pour le montage ;
- 4 h de préparation à l'épreuve
- 1 h 20 d'épreuve, dont 50 min pour l'exposé d'une leçon ou la présentation du montage, le reste du temps pouvant être utilisé par le jury pour les questions.

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

Les épreuves sont publiques.

Il est demandé aux candidats de se munir d'une pièce d'identité en cours de validité ainsi que d'une blouse pour les épreuves de chimie.

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

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

## Les équipes techniques

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

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

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

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

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

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

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

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

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

# 11. SUJETS DES EPREUVES ORALES DE LA SESSION 2009

## Leçons de physique

Les leçons de physique de la session 2008 sont à traiter au niveau des classes préparatoires scientifiques ou aux niveaux des deux premières années (niveaux L1 et L2) de la licence de physique ou de la licence de physique chimie.

1. Caractère galiléen approché du référentiel géocentrique et du référentiel terrestre. Champ de pesanteur terrestre.
2. Energie mécanique d'un point matériel. Petits mouvements au voisinage d'une position d'équilibre stable. Exemples. Approche du portrait de phase.
3. Energie mécanique d'un système matériel. Théorème de l'énergie cinétique. Exemples d'utilisation de l'intégrale première de l'énergie.
4. Oscillateur harmonique à un degré de liberté. Oscillateur à un degré de liberté amorti par frottement visqueux. Applications.
5. Mouvement dans un champ de forces centrales newtonien. Énoncé des lois de Kepler. Applications.
6. Système isolé de deux points matériels en interaction. Lois de conservation. Masse réduite, mobile équivalent. Application à l'interaction newtonienne.
7. Rotation d'un solide autour d'un axe dont la direction est fixe dans un référentiel galiléen. Applications.
8. Actions de contact entre deux solides. Lois de Coulomb relatives au frottement de glissement ; aspect énergétique. Exemples.
9. Éléments de statique des fluides dans le champ de pesanteur. Exemples. Poussée d'Archimède.
10. Dynamique des écoulements parfaits : équation d'Euler et relation de Bernoulli pour les écoulements incompressibles et homogènes. Applications.
11. Premier principe de la thermodynamique. Transferts d'énergie. Exemples de bilans énergétiques.
12. Deuxième principe de la thermodynamique. Identité thermodynamique pour un fluide homogène  $dU = TdS - pdV$ . Entropie du gaz parfait. Exemples de bilans entropiques.
13. Application du premier principe et du deuxième principe de la thermodynamique aux machines thermiques cycliques dithermes.
14. Diffusion thermique. Loi de Fourier. Équation de la diffusion thermique. Applications.
15. Dipôle électrostatique. Potentiel et champ créés. Action d'un champ électrostatique extérieur.
16. Le champ électrostatique ; symétries ; propriétés ; théorème de Gauss. Analogie avec le champ de gravitation.
17. Le champ magnétostatique ; symétries ; propriétés ; théorème d'Ampère. Exemples.
18. Induction électromagnétique : cas d'un circuit fixe dans un champ magnétique dépendant du temps. Applications.
19. Induction électromagnétique : cas d'un circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire. Exemple de couplage électro-mécanique, conversion d'énergie.
20. Étude du circuit RLC série en régime sinusoïdal forcé. Résonances. Aspects énergétiques.
21. Énergie du champ électromagnétique. Bilan local d'énergie électromagnétique. Applications.
22. Propagation de vibrations transversales sur une corde. Corde de Melde : ondes stationnaires, résonance.

23. Propagation des ondes sonores dans les fluides dans le cadre de l'approximation acoustique. Aspects énergétiques.
24. Propagation d'une onde dans un milieu dispersif à une dimension. Vitesse de phase, vitesse de groupe. Exemples.
25. Rayonnement dipolaire électrique (les composantes du champ électromagnétique rayonné à grande distance seront admises). Puissance rayonnée. Applications.
26. Réflexion-réfraction d'une onde électromagnétique plane progressive polarisée rectilignement à l'interface entre deux diélectriques linéaires homogènes et isotropes ; lois de Descartes ; coefficients de réflexion et de transmission de l'amplitude du champ électrique et de la puissance dans le cas de l'incidence normale.
27. Miroirs sphériques et lentilles minces dans l'approximation de Gauss. Relations de conjugaison et de grandissement. Applications.
28. Interférences non localisées entre deux ondes totalement cohérentes. Application à l'interféromètre de Michelson éclairé par une source ponctuelle.
29. Optique ondulatoire. Principe de Huygens-Fresnel. Diffraction à l'infini d'une onde plane par une pupille rectangulaire ; cas de la fente. Applications.
30. Réseaux plans en optique. Applications.

### **Montages de physique**

Chaque candidat a le choix entre deux sujets.

Pour chacun des sujets de la liste ci-dessous, il conviendra, dans la mesure du possible, de présenter des applications. L'utilisation de l'ordinateur interfacé, pour l'acquisition et le traitement des données expérimentales, est à privilégier.

1. Dynamique newtonienne.
2. Transitions de phase.
3. Ondes acoustiques.
4. Formation des images en optique.
5. Présentation du goniomètre.
6. Spectrométrie optique.
7. Polarisation de la lumière.
8. Condensateurs.
9. Bobines ; transformateurs.
10. Capteurs.
11. Induction, auto-induction.
12. Production et mesure de champs magnétiques.
13. Transducteurs électromécaniques.
14. Régimes transitoires en électricité.
15. Filtres actifs et passifs.
16. Conversions alternatif-continu et continu-alternatif en électricité.
17. Amplification en électronique.
18. Oscillations électriques entretenues.
19. Analyse harmonique et synthèse d'un signal périodique.
20. Modulation d'amplitude et modulation de fréquence.
21. Filtres linéaires en électrocinétique.
22. Oscillateurs couplés.
23. Mesure de longueurs d'onde.
24. Mesure d'impédances.

25. Interférences.
26. Diffraction.
27. Spectroscopie à réseau.
28. Ondes stationnaires.
29. Résonance.
30. Propagation d'une onde.

## **Leçons de chimie**

Les leçons de chimie de la session 2008 sont à traiter au niveau des classes préparatoires scientifiques ou aux niveaux des deux premières années (niveaux L1 et L2) de la licence de chimie ou de la licence de physique chimie.

1. Mécanismes réactionnels en cinétique homogène. Processus élémentaires, molécularité d'un processus, intermédiaires réactionnels, état de transition. Approximation de l'état quasi-stationnaire (AEQS).
2. Caractères généraux de la catalyse homogène. Catalyse enzymatique.
3. Construction et utilisation des diagrammes d'Ellingham. Application à la pyrométallurgie.
4. Réactions de complexation ; applications en analyse quantitative.
5. Lois de déplacement des équilibres : influence de la température et de la pression, de l'introduction d'un constituant actif et d'un constituant inactif.
6. Applications des diagrammes binaires liquide/vapeur isobares, avec miscibilité totale ou nulle à l'état liquide.
7. Aspect thermodynamique des réactions d'oxydoréduction en solution aqueuse.
8. Réactions de précipitation ; applications en analyse quantitative.
9. Réactions acido-basiques ; applications en analyse quantitative.
10. Assemblages compacts ; coordinence, compacité, sites interstitiels. Assemblage pseudo-compact cubique centré.
11. Cristaux ioniques.
12. Diagrammes binaires solide/liquide isobares avec miscibilité totale à l'état liquide et miscibilité totale, partielle ou nulle à l'état solide.
13. Classification périodique des éléments.
14. Structure électronique des molécules : liaisons covalentes localisées et délocalisées dans les modèles de Lewis et de Gillespie.
15. Applications des diagrammes potentiel-pH.
16. Applications des courbes intensité-potentiel.
17. Applications de la spectroscopie RMN du proton.
18. Réaction de Diels-Alder : caractéristiques et modélisation.
19. Stéréochimie des molécules organiques.
20. Liaison carbone-halogène : réactions de substitution.
21. Liaison carbone-halogène : réactions d'élimination.
22. Alcools et alcoolates : réactions de substitution et d'élimination.
23. Préparation et réactivité des organomagnésiens mixtes.
24. Alcènes : réduction et oxydation.
25. Hydrocarbures aromatiques : aromaticité. Substitution électrophile aromatique sur le benzène.
26. Substitution électrophile sur le benzène substitué.
27. Polymérisation en chaîne : polymérisation radicalaire, polymérisation anionique. Structure moléculaire des polymères en chaîne, conséquences.
28. Composés carbonyles : préparations, réactions d'addition nucléophile.

29. Réactivité spécifique des composés carbonylés énolisables et des  $\alpha$ -étones.
30. Synthèses et réactivité des dérivés d'acide.

### **Montages de chimie**

Chaque candidat a le choix entre deux sujets.

Pour chacun des sujets de la liste ci-dessous, il conviendra, dans la mesure du possible, de présenter des applications.

1. Dosages de produits de la vie courante.
2. Piles électrochimiques et électrolyses.
3. Constante de formation d'ions complexes.
4. Produit de solubilité.
5. Constante d'acidité.
6. Vitesse de réaction et catalyse.
7. Indicateurs de fin de dosage.
8. Influence du pH, de la complexation, de la solubilité sur le pouvoir oxydant ou réducteur.
9. Diagramme potentiel-pH du fer.
10. Spectrophotométrie UV-visible.
11. L'azote et ses composés en chimie inorganique.
12. Le zinc et ses composés.
13. Notion d'équilibre chimique.
14. Le dichlore et l'eau de Javel.
15. Le dioxygène et l'eau oxygénée.
16. Oxydants minéraux.
17. Réducteurs minéraux.
18. Alcènes et alcynes (éthylène et acétylène exclus).
19. Aldéhydes.
20. Cétones.
21. Alcools.
22. Amines.
23. Organométalliques.
24. Substitutions électrophiles.
25. Substitutions nucléophiles.
26. Acides carboxyliques et dérivés.
27. Acides aminés, amides, polypeptides, polyamides.
28. Méthodes de séparation des constituants d'un mélange en chimie organique.
29. L'eau en chimie organique.
30. Produits organiques contenus dans les substances naturelles. Séparation et identification.

## 12 - Rapport sur les épreuves orales de Physique

Les remarques qui suivent visent à faciliter le travail des futurs candidats et candidates qui désirent présenter le concours de l'agrégation interne. Le jury est parfaitement conscient de l'effort important que représente la phase de préparation au concours : les candidats, pour la plupart en poste, devant à la fois assurer leurs missions auprès de leurs élèves et préparer le concours exigeant de l'agrégation interne de sciences physiques. Le jury tient à les féliciter pour cet investissement important et ceci d'autant plus qu'il a eu le plaisir d'assister à des leçons ou des montages remarquables où les candidats ont su démontrer leurs compétences professionnelles tant sur le plan pédagogique que sur le plan scientifique.

Le rapport comporte deux parties : leçons de physique et montages de physique ; il consigne à la fois des conseils généraux et des remarques plus spécifiques à certains thèmes de leçons ou de montages. Il ne se veut pas exhaustif et nous invitons vivement les futurs candidats à consulter ceux des années précédentes qui sont toujours d'actualité.

L'évaluation de la prestation d'un candidat est collégiale et se fonde sur des observables variées comme la maîtrise de la discipline et la culture générale connexe, la maîtrise de la mise en œuvre d'une situation d'enseignement : choix d'une stratégie pédagogique, qualité de l'expression orale, utilisation raisonnée des outils de communication...Le jury cherche donc à évaluer les compétences d'un professeur de physique-chimie dans un contexte disciplinaire ambitieux qu'est celui des thèmes proposés à l'oral de physique de l'agrégation interne de physique-chimie.

### L'épreuve de leçon

Les candidats disposent d'un champ de liberté relatif au niveau de référence auquel ils situent la leçon traitée : celui des classes préparatoires aux grandes écoles ou des deux premières années du cycle universitaire licence (L). Quelle que soit l'option choisie, il faut veiller à situer son exposé à un niveau post-bac.

Une leçon n'est pas une conférence où le candidat expose ses connaissances sur un thème imposé, mais un acte pédagogique de construction et de transmission de savoir dans le cadre d'une situation d'enseignement. Il est donc souhaitable de positionner la leçon de manière cohérente dans une progression, d'en dégager quelques points forts, de souligner l'apparition de notions nouvelles et de veiller à ce que les objectifs annoncés soient atteints au cours de l'exposé.

Les leçons sont parfois trop formelles et les applications souvent rejetées en fin d'exposé, donc régulièrement sacrifiées par manque de temps. Celles-là mériteraient d'être davantage présentes et ceci dès le début de la leçon. Un questionnement initial de nature expérimentale ou lié à une application peut parfaitement constituer une introduction et un fil directeur.

Le thème des leçons est souvent large, le candidat ne doit pas viser l'exhaustivité au prix d'une leçon conduite à un rythme excessif, même si celui-ci doit être soutenu. Il est conduit à faire des choix à la fois dans le contenu et dans les modes de présentation et ceci en valorisant les aspects physiques des phénomènes abordés. Il peut ainsi être amené à justifier ses choix au cours de l'entretien avec le jury. Le candidat doit aussi démontrer au jury qu'il est capable de conduire avec agilité des calculs sans se référer à ses notes.

Le jury apprécie et valorise la présentation d'expériences de cours pour introduire et illustrer une leçon ou pour servir de support à une application concrète en lien avec le thème abordé. Le candidat doit



cependant veiller à présenter des expériences effectivement pertinentes et à procéder à une exploitation méthodique de celles-ci.

Le jury a constaté cette année une utilisation parfois peu adaptée de la flexcam. Si son utilisation est particulièrement intéressante pour améliorer la visibilité d'une expérience de cours, elle ne doit pas être utilisée pour la projection de figures simples on encore, comme le jury l'a parfois vu, pour la conduite de calculs qui peuvent avantageusement être faits au tableau.

L'exposé est suivi d'une séance de questions qui visent à faire préciser par le candidat d'une part certains aspects scientifiques de son exposé et d'autre part des éléments de nature pédagogique en lien avec la leçon comme l'insertion de celle-ci dans une progression, son illustration par des activités expérimentales et des aspects liés aux difficultés potentielles et à l'évaluation des acquis des élèves.

#### Remarques particulières :

Leçon 1 : *Caractère galiléen approché du référentiel géocentrique...*

Les candidats sont invités à être particulièrement rigoureux sur les référentiels utilisés au cours de l'exposé.

Leçon 3 : *Energie mécanique d'un système matériel...*

Il est conseillé d'éviter une présentation trop abstraite et de laisser une place suffisante à la présentation d'exemples pertinents illustrant l'efficacité de l'approche énergétique d'un problème de mécanique.

Leçon 8 : *Actions de contact entre deux solides...*

Il est souhaitable de ne pas se limiter à l'étude d'un mouvement de translation d'un solide sur un autre solide et d'aborder des situations plus générales où la rotation est présente.

Leçon 9 : *Éléments de statique des fluides dans le champ de pesanteur...*

Si le modèle isotherme est présenté, il convient d'en discuter la pertinence.

Leçon 11 : *Premier principe de la thermodynamique...*

Il faut éviter de procéder à la présentation d'une « collection » de formules et chercher à illustrer la leçon par des exemples mettant en jeu un travail des forces de pression et un transfert thermique.

Leçon 13 : *Application du premier principe et du deuxième principe de la thermodynamique aux machines thermiques...*

Rappelons que le rendement maximum n'est pas égal à un.

Leçon 15 : *Dipôle électrostatique...*

Il est souhaitable d'illustrer expérimentalement cette leçon.

Leçon 21 : *Énergie du champ électromagnétique...*

Il est intéressant de commenter en détail l'équation locale de Poynting en soulignant la signification physique de chaque terme.

Leçon 23 : *Propagation des ondes sonores dans les fluides...*

Elle donne lieu régulièrement à des présentations trop formelles utilisant un formalisme parfois mal maîtrisé. L'aspect physique mérite d'être mis en avant en particulier dans l'étude des aspects énergétiques.

Leçon 24 : *Propagation d'une onde dans un milieu dispersif...*

Son exposé ne peut pas se réduire à la présentation de quelques situations particulières. Il faut dégager quelques idées fortes et générales.

Leçon 25 : *Rayonnement dipolaire électrique...*

Si le titre invite à admettre les expressions des champs rayonnés, il est souhaitable de présenter les approximations faites et de connaître leur utilité.

Leçon 26 : *Réflexion-réfraction d'une onde électromagnétique...*

Il faut éviter les dérives calculatoires et bien réfléchir à une stratégie de présentation qui valorise les aspects physiques du thème traité. Une illustration expérimentale est vivement souhaitée.

Leçon 27 : *Miroirs sphériques et lentilles minces...*

Il faut résolument placer cette leçon au niveau post bac.

Leçon 28 : *Interférences non localisées entre deux ondes totalement cohérentes...*

Comme le mentionne le titre, il n'est pas forcément utile d'étudier systématiquement la notion de cohérence dans cette leçon car l'étude de l'interféromètre de Michelson est assez longue à conduire même si l'on s'appuie sur des documents préparés à l'avance.

Leçon 30 : *Réseaux plans en optique...*

Le jury a eu le bonheur d'assister à un exposé remarquable par son efficacité pédagogique, sa rigueur et son illustration expérimentale toujours bien choisie et parfaitement valorisée.

## Montages

Le montage de physique de l'agrégation interne de physique-chimie permet au candidat de faire la preuve de ses compétences expérimentales au sens le plus large : aptitude à choisir un dispositif expérimental, à analyser de manière critique et raisonnée des résultats expérimentaux, à les confronter à un modèle et à utiliser pour cela différents logiciels d'acquisition et de traitement des données.

Cette épreuve est aussi l'occasion pour le candidat de montrer qu'il est capable de présenter avec clarté et conviction des expériences, d'en modifier certains paramètres au cours de l'exposé et de dialoguer avec le jury. Notons qu'il n'est pas souhaitable de consacrer du temps aux développements théoriques.

Il est recommandé de placer le montage à un niveau suffisant ; en effet, même s'il présente un aspect quantitatif marqué, mais qu'il ne dépasse pas le niveau d'une classe de terminale S, il sera peu valorisé par le jury.

Il est souhaitable de ne pas se limiter à des expériences qualitatives et donc de consacrer du temps à la présentation d'expériences quantitatives. Dans tous les cas, l'exploitation d'une expérience, même simple, doit être la plus complète possible. Il faut également faire preuve d'honnêteté, ainsi si un phénomène pourtant prévisible n'est objectivement pas observable, il faut le constater et essayer d'analyser les causes possibles des difficultés rencontrées pour sa mise en évidence.

Soulignons que le jury est très sensible à la qualité des mesures. Les candidats procèdent très fréquemment à des estimations des incertitudes faites sur la mesure d'une grandeur physique ;

rappelons que l'évaluation de l'incertitude tient compte non seulement de la lecture, mais aussi le cas échéant du pointé. La signification des indications fournies par les logiciels d'acquisition dans les phases de modélisation doit être mieux connue, et par exemple il convient de savoir donner du sens à l'incertitude affichée sur la détermination d'une grandeur physique. Enfin le candidat doit avoir une idée des méthodes numériques d'optimisation utilisées par les logiciels pour la détermination des paramètres des modèles.

*Remarque sur l'alignement des montages optiques.*

Le jury tient à rappeler les conseils formulés dans un précédent rapport et relatifs à l'alignement d'un dispositif optique. Pour optimiser le réglage des systèmes centrés il convient :

- de placer la source de lumière (lampe, laser, etc.) de sorte que le faisceau soit parallèle à la table,
- de placer le récepteur, écran, caméra ou photodiode, en le centrant sur le faisceau désormais fixe,
- d'insérer ensuite successivement chaque élément optique, en commençant par les plus transparents, en centrant chacun individuellement de manière à ramener à chaque fois le faisceau centré sur le récepteur.

Si l'on prend soin de ne jamais déplacer un élément déjà aligné, on obtient à la fin un système très proche d'un alignement idéal.

Pour terminer, le jury tient à souligner que les candidats maîtrisent de mieux en mieux les outils informatiques.

Remarques particulières :

Montage 2 : *Transition de phase.*

Le jury a eu l'occasion d'assister à un excellent montage proposant des expériences variées, bien exploitées avec des mesures quantitatives pertinentes.

Montage 4 : *Formation des images en optique.*

Les aberrations géométriques sont rarement bien présentées, les limitations liées à la diffraction peuvent être abordées de manière quantitative.

Montage 6 : *Spectrométrie optique.*

A l'occasion de l'utilisation de l'interféromètre de Michelson, le candidat doit être en mesure de justifier les caractéristiques du montage : conditions d'observation, choix des lentilles...

Montage 8 : *Condensateurs.*

Les candidats doivent connaître les différents types de condensateurs couramment utilisés.

Montage 9 : *Bobines ; transformateurs.*

Il faut consacrer du temps à l'étude du transformateur et ne pas se limiter à la mesure du rapport de transformation.

Montage 10 : *Capteurs.*

Soulignons une nouvelle fois que les caractéristiques métrologiques des capteurs comme le temps de réponse et la sensibilité spectrale sont importantes dans le choix d'un capteur, et donc méritent d'être évoquées.

Montage 26 : *Diffraction.*

Les expériences sur la diffraction des ondes ultrasonores sont rarement bien conduites.

# RAPPORT SUR LES EPREUVES ORALES DE CHIMIE

Le jury constate que les candidats ne tiennent pas tous compte des conseils indiqués dans les précédents rapports qui restent tout à fait d'actualité et en particulier celui de la session 2008 qui donne beaucoup de commentaires spécifiques sur les leçons et les montages.

## L'épreuve de leçon

Le sujet de la leçon est tiré de la liste publiée au Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale. Le niveau est choisi et signalé par le candidat ; il doit se situer dans le cadre des programmes des classes préparatoires aux grandes écoles ou bien au niveau L1 ou L2. La leçon est censée s'adresser à des étudiants qui auraient assimilé les leçons précédentes et qui sont aptes à acquérir rapidement des notions nouvelles. Il ne s'agit donc pas d'indiquer ce que l'on pourrait exposer à une classe, mais bien d'exposer et d'expliquer les notions importantes comme on le ferait devant des étudiants.

Le candidat doit préciser, en début d'exposé, la situation de la leçon dans la progression du programme ainsi que les pré-requis nécessaires. Les objectifs peuvent être précisés au début de la leçon, ressortir en cours d'exposé ou être confirmés dans la conclusion. Cependant, une attention toute particulière doit être donnée non seulement aux notions présentées ou utilisées mais aussi aux liens qu'elles imposent entre les différentes parties de la leçon.

Dans le contenu de la leçon, une certaine latitude est laissée au choix du candidat, cependant certaines parties sont indispensables et un temps suffisant doit y être consacré.

Une bonne leçon est présentée à un rythme soutenu (plus rapide qu'avec des élèves) qui permet de traiter de façon approfondie le sujet proposé ; les explications sont claires et s'appuient sur un contenu scientifique rigoureux. Ces points ne sont pas les seuls critères d'évaluation mais sont les qualités incontournables pour donner une leçon vivante qui saurait intéresser les élèves ou les étudiants et atteindre les objectifs pédagogiques affichés.

Plusieurs titres de leçon sont libellés : "Applications de ...". Ces leçons ne peuvent pas se limiter à un cours magistral. Un bref rappel des pré-requis est toujours le bienvenu mais la quasi-totalité de l'exposé doit être consacrée à l'utilisation et l'application de ces notions à des exemples bien choisis dans les différents domaines de la chimie.

La plupart du temps, la leçon doit être illustrée par des résultats expérimentaux tirés de la littérature ou par des expériences. Des exemples concrets de la vie courante, de l'actualité scientifique ou de l'industrie chimique donnent du sens à un enseignement de chimie.

Le jury apprécie l'utilisation des outils de projection (vidéo-projecteur, caméra flexible, tableau interactif, rétroprojecteur), mais ils doivent être employés à bon escient. Ces outils permettent de gagner du temps en évitant de recopier des tableaux de données ou de longues phrases de définitions ou de résultats du cours. Cependant, une leçon, tout comme un cours devant une classe, ne saurait être menée sans l'utilisation du tableau et de la craie, avec une certaine distance par rapport aux notes écrites, ce qui permet de montrer comment le candidat s'est approprié le sujet présenté.

Il est rappelé que le candidat gère le tableau comme il l'entend et peut effacer tout ou partie à sa convenance.

Le jury note parfois des fautes dans l'usage de la langue française. Un professeur, quelle que soit sa discipline, doit être sur ce point un exemple pour les élèves.

En conclusion, la leçon à l'agrégation est une épreuve difficile qui doit être mûrement réfléchie et ne s'improvise pas au dernier moment. À ce propos, le jury voudrait souligner une erreur commise par beaucoup de candidats cette année. Leur préparation à l'épreuve semble ne reposer que sur l'usage d'un nombre très restreint de livres des collections de grande diffusion en CPGE. La construction d'une leçon dont le plan et tous les exemples sont strictement extraits d'un seul livre donne souvent une mauvaise prestation.

## L'épreuve de montage

### Remarques générales

Le candidat doit choisir au mieux les expériences qu'il présentera devant le jury pour illustrer le sujet du montage en suivant un fil directeur. La cohérence entre le titre du montage et les manipulations prévues doit être précisée, de même que les relations éventuelles existant entre les différentes propriétés ou notions présentées dans les expériences choisies. Il est conseillé au candidat de faire une rapide introduction au montage en présentant rapidement le contenu prévu.

Le candidat fournit au personnel technique une liste précise du matériel, des produits et des solutions titrées, et peut lui demander de l'aider dans la réalisation des expériences à condition de lui donner un protocole opératoire détaillé et placé sous l'entière responsabilité du candidat.

Certains montages recouvrent des sujets au programme du lycée et peuvent donner une impression de facilité aux candidats. Il est rappelé que le niveau de cette épreuve est celui des classes post-bac. Des expériences étudiées dans le secondaire peuvent bien sûr être présentées mais leur interprétation doit être faite spontanément à un niveau supérieur, sans attendre l'intervention du jury. Trop souvent, ces montages donnent lieu à des présentations de médiocre qualité.

Pendant le temps de préparation (4 heures), le candidat dispose des ouvrages de la bibliothèque dans lesquels il trouve les modes opératoires. Il faut avoir un regard critique sur les protocoles proposés. Le candidat doit être capable de justifier les conditions expérimentales. S'il ne le fait pas spontanément, le jury ne manquera pas de l'interroger sur ce point. On constate que beaucoup de candidats n'y ont pas réfléchi à l'avance, la qualité des explications fournies dans ces conditions est très variable et a un fort impact sur la note obtenue. Le candidat n'oubliera pas de réfléchir aussi aux questions concernant le risque chimique (solvants et réactifs utilisés, produits formés...), en chimie organique comme en chimie générale.

Beaucoup de montages donnent lieu à l'utilisation d'un ordinateur pour l'acquisition ou le traitement des données expérimentales. Il existe des logiciels plus adaptés aux sciences expérimentales que les tableurs généralistes. Leur maîtrise fait partie des compétences normales pour un professeur de physique-chimie. Il est conseillé d'imprimer les courbes obtenues afin d'éviter de perdre du temps à les rechercher sur l'ordinateur pendant l'exposé.

Comme en leçon, un bon montage est présenté de façon dynamique, le déroulement de l'exposé suit un fil conducteur, les transitions sont l'occasion de montrer que le candidat a réfléchi aux aspects théoriques, les expériences quantitatives sont exploitées en détail, les principales réactions mises en jeu et les montages correspondants sont indiqués au tableau.

L'entretien avec le jury a lieu tout au long de l'exposé. C'est l'occasion de tester la réactivité du candidat et son aptitude à répondre à une question qu'il n'a pas prévue. Le jury en profite aussi pour envisager des situations d'enseignement. S'il le juge nécessaire, le candidat peut donner une explication par écrit, sur une feuille ou au tableau. Dans ce cadre, la préparation de documents (diagrammes E-pH, courbes I-E ...) peut être utile pour répondre à ces questions.

### Remarques sur les montages de chimie organique

Il est normal de ne pas reproduire toutes les étapes d'une synthèse un peu longue. Dans ce cas, le candidat peut commenter le dispositif expérimental et réaliser devant le jury une étape qui présente un moment caractéristique de la réaction en cours (changement de couleur, apparition d'un précipité, augmentation importante de la température...) et/ou les étapes de séparation-extraction, de purification et de caractérisation du produit obtenu. Souvent, ce type de synthèse peut être réalisé de façon quantitative et doit conduire à un calcul de rendement. Dans ce cas, le candidat veillera bien à déterminer le réactif effectivement limitant. Lorsque plusieurs synthèses sont proposées, le jury apprécie que les méthodes de caractérisation mises en œuvre soient diversifiées. Pour les réactions caractéristiques de certains groupes fonctionnels, les candidats doivent connaître la composition exacte des réactifs qui sont utilisés.

## 14. SUJETS DES ÉPREUVES ORALES DE LA SESSION 2010

Les sujets des leçons et montages de physique et de chimie de la session 2010 sont précisées ci-dessous ; le lecteur notera que des modifications ont été apportées par rapport aux sujets de la session 2009.

Il est rappelé que :

- les leçons de physique seront à traiter au niveau des classes préparatoires scientifiques ou aux niveaux des deux premières années (niveaux L1 et L2) de la licence de physique ou de la licence de physique chimie ;
- les leçons de chimie seront à traiter au niveau des classes préparatoires scientifiques ou aux niveaux des deux premières années (niveaux L1 et L2) de la licence de chimie ou de la licence de physique chimie.

### Leçons de physique

Les leçons de physique de la session 2010 sont à traiter au niveau des classes préparatoires scientifiques ou aux niveaux des deux premières années (niveaux L1 et L2) de la licence de physique ou de la licence de physique chimie.

Le libellé de chaque titre n'implique pas que le candidat traite le sujet de la leçon de manière exhaustive, il lui est cependant demandé d'en présenter les résultats essentiels au niveau requis ; il est invité à justifier les choix faits et à aborder les applications inhérentes au sujet de la leçon.

1. Caractère galiléen approché du référentiel géocentrique et du référentiel terrestre.
2. Énergie mécanique d'un point matériel.
3. Énergie mécanique d'un système matériel.
4. Mouvement dans un champ de forces centrales newtonien.
5. Système isolé de deux points matériels en interaction.
6. Rotation d'un solide autour d'un axe dont la direction est fixe.
7. Actions de contact entre deux solides.
8. Statique des fluides.
9. Dynamique des écoulements parfaits.
10. Premier principe de la thermodynamique.
11. Deuxième principe de la thermodynamique.
12. Machines thermiques.
13. Diffusion thermique.
14. Dipôle électrostatique.
15. Le champ électrostatique.
16. Le champ magnétostatique.
17. Induction électromagnétique : cas d'un circuit fixe dans un champ magnétique dépendant du temps.
18. Induction électromagnétique : cas d'un circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire.
19. Énergie du champ électromagnétique.
20. Vibrations transversales sur une corde.
21. Ondes sonores dans les fluides.
22. Ondes dans un milieu dispersif.

23. Rayonnement dipolaire électrique (les composantes du champ électromagnétique rayonné à grande distance seront admises).
24. Réflexion-réfraction d'une onde électromagnétique à l'interface entre deux diélectriques. Lois de Descartes.
25. Miroirs sphériques et lentilles minces.
26. Interférences en optique. Notion de cohérence.
27. Diffraction de Fraunhofer.
28. Réseaux plans en optique.
29. Oscillateur harmonique, avec ou sans amortissement.
30. Résonance.

### **Montages de physique**

Rappel : Chaque candidat a le choix entre deux sujets.

Pour chacun des sujets de la liste ci-dessous, il conviendra, dans la mesure du possible, de présenter des applications. L'utilisation de l'ordinateur interfacé, pour l'acquisition et le traitement des données expérimentales, est à privilégier.

1. Dynamique newtonienne.
2. Transitions de phase.
3. Ondes acoustiques.
4. Formation des images en optique.
5. Spectrométrie optique.
6. Polarisation de la lumière.
7. Condensateurs.
8. Bobines ; transformateurs.
9. Capteurs.
10. Induction, auto-induction.
11. Production et mesure de champs magnétiques.
12. Transducteurs électromécaniques.
13. Régimes transitoires en électricité.
14. Oscillateurs électriques auto-entretenus.
15. Filtres actifs et passifs.
16. Amplification en électronique.
17. Analyse harmonique. Synthèse d'un signal périodique.
18. Modulation d'amplitude et modulation de fréquence.
19. Conversions alternatif-continu et continu-alternatif en électricité
20. Moteurs électriques.
21. Oscillateurs couplés.
22. Mesure de longueurs d'onde.
23. Mesure de fréquences.
24. Mesure d'impédances.
25. Mesure de puissance et d'énergie.
26. Interférences.
27. Diffraction.
28. Ondes stationnaires.
29. Résonance.
30. Propagation d'une onde.

## Leçons de Chimie

Les leçons de chimie de la session 2010 sont à traiter au niveau des classes préparatoires scientifiques ou aux niveaux des deux premières années (niveaux L1 et L2) de la licence de chimie ou de la licence de physique chimie.

Le libellé de chaque titre n'implique pas que le candidat traite le sujet de la leçon de manière exhaustive, il lui est cependant demandé d'en présenter les résultats essentiels au niveau requis ; il est invité à justifier les choix faits et à aborder les applications inhérentes au sujet de la leçon.

1. Mécanismes réactionnels en cinétique homogène.
2. Caractères généraux de la catalyse (catalyse hétérogène exclue).
3. Lecture et utilisation des diagrammes d'Ellingham. Applications.
4. Réactions de complexation ; applications en analyse quantitative.
5. Lois de déplacement des équilibres : influence de la température et de la pression, de l'introduction d'un constituant actif et d'un constituant inactif.
6. Lecture et utilisation des diagrammes binaires liquide/vapeur isobares.
7. Aspect thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction en solution aqueuse.
8. Réactions de précipitation ; applications en analyse quantitative.
9. Réactions acido-basiques ; applications en analyse quantitative.
10. Cristaux métalliques : description, propriétés.
11. Cristaux ioniques.
12. Lecture et utilisation des diagrammes binaires solide/liquide.
13. Classification périodique des éléments : construction, évolution de quelques propriétés.
14. Structure électronique et géométrique des molécules : liaisons covalentes localisées et délocalisées dans les modèles de Lewis et de Gillespie.
15. Applications des diagrammes potentiel-pH.
16. Applications des courbes intensité-potentiel.
17. Applications de la spectroscopie RMN du proton.
18. Réaction de Diels Alder : caractéristiques et modélisation.
19. Stéréochimie des molécules organiques.
20. Liaison carbone-halogène : réactions de substitution.
21. Liaison carbone-halogène : réactions d'élimination.
22. Alcools et alcoolates : réactions de substitution et d'élimination.
23. Préparation et réactivité des organomagnésiens mixtes.
24. Alcènes : réduction et oxydation.
25. Hydrocarbures aromatiques : aromaticité. Substitution électrophile aromatique sur le benzène.
26. Substitution électrophile aromatique : benzène substitué, cas d'un hétérocycle.
27. Polymérisation en chaîne : polymérisation radicalaire, polymérisation anionique. Structure moléculaire des polymères en chaîne, conséquences.
28. Composés carbonylés : préparations, réactions d'addition nucléophile.
29. Réactivité spécifique des composés carbonylés énolisables et des  $\alpha$ -énones.
30. Synthèses et réactivité des dérivés d'acide.

## Montages de chimie

Rappel : Chaque candidat a le choix entre deux sujets.

Pour chacun des thèmes de la liste ci-dessous, il conviendra, dans la mesure du possible, de présenter des applications.



1. Dosages de produits de la vie courante.
2. Piles électrochimiques et électrolyses.
3. Constante de formation d'ions complexes.
4. Produit de solubilité.
5. Equilibres acido-basiques en solution aqueuse.
6. Vitesse de réaction et catalyse.
7. Indicateurs de fin de dosage.
8. Influence du pH, de la complexation, de la solubilité sur le pouvoir oxydant ou réducteur.
9. Diagramme potentiel-pH du fer.
10. Spectrophotométrie UV-visible.
11. L'azote et ses composés en chimie inorganique.
12. Le zinc et ses composés.
13. Notion d'équilibre chimique.
14. Les halogènes (fluor exclu)
15. Le dioxygène et l'eau oxygénée.
16. Oxydants minéraux.
17. Réducteurs minéraux.
18. Alcènes et alcynes (éthylène et acétylène exclus).
19. Aldéhydes.
20. Cétones.
21. Alcools.
22. Amines.
23. Organométalliques.
24. Substitutions électrophiles.
25. Substitutions nucléophiles.
26. Acides carboxyliques et dérivés.
27. Acides aminés, amides, polypeptides, polyamides.
28. Méthodes de séparation des constituants d'un mélange en chimie organique.
29. L'eau en chimie organique.
30. Produits organiques contenus dans les substances naturelles. Séparation et identification.