

---

## Plans de leçons et de montages

---

Ce document contient les plans de leçons et montages que j'ai préparés pour l'agrégation de physique-chimie option physique 2014. Chaque fiche contient une bibliographie, le plan prévu pour la leçon, et éventuellement certains commentaires ou démonstrations supplémentaires. Une description rapide des manipulations effectuées lors des montages est ajoutée. Ces plans ne sont pas tous bons et sont personnels : ils présentent un point de vue, partial et discutable, sur chaque leçon. Il peut rester quelques coquilles, et certaines leçons ont été faites trop rapidement, ou en manquant de recul.

Charles-Edouard LECOMTE

<http://perso.ens-lyon.fr/charlesedouard.lecomte>  
charlesedouard.lecomte@ens-lyon.fr

# Table des matières

<b>I Leçons de physique</b>	<b>5</b>
1. Contact entre deux solides. Frottement	6
2. Caractère non-galiléen du référentiel terrestre	8
3. Approximation gyroscopique : effets dans les domaines macroscopiques et microscopiques	10
4. Lois de conservation en dynamique des systèmes	12
5. Cinématique relativiste	14
6. Dynamique relativiste	16
7. Notion de viscosité d'un fluide. Écoulements visqueux	18
8. Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide	20
9. Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides	22
10. Gaz parfait, gaz réels	24
11. Premier principe de la thermodynamique	26
12. Évolution et condition d'équilibre d'un système thermodynamique fermé	28
13. Application des deux principes de la thermo. au fonctionnement des machines thermiques	30
14. Étude thermodynamique d'un système constitué par un corps pur sous plusieurs phases	32
15. Étude statistique d'un système en contact avec un thermostat. Probabilité canonique	34
16. Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir	36
17. Phénomènes de transport	38
18. Flux conductifs, convectifs, radiatifs, bilans thermiques	40
19. Conversion de puissance électromécanique	42
20. Induction électromagnétique	44
21. Résonance magnétique nucléaire	48
22. Rétroaction et oscillations	50
23. Traitement analogique d'un signal électrique – Étude spectrale	52
24. Ondes progressives, ondes stationnaires	54
25. Ondes acoustiques	56
26. Propagation dans un milieu dispersif	58
27. Propagation guidée des ondes	60
28. Ondes électromagnétiques dans les milieux diélectriques	62
29. Ondes électromagnétiques dans les conducteurs	64
30. Propriétés et applications du rayonnement dipolaire électrique	66
31. Présentation de l'optique géométrique à l'aide du principe de Fermat	68
32. Interférences à deux ondes en optique	70
33. Interféromètres à division d'amplitude	72
34. Diffraction de Fraunhofer	74
35. Diffraction par des structures périodiques dans différents domaines de la physique	76
36. Émission et absorption de la lumière	78
37. Aspects corpusculaires du rayonnement. Notion de photon	80
38. Aspects ondulatoires de la lumière. Notion de fonction d'onde	82
39. Confinement de l'électron et quantification de l'énergie	84
40. Effet tunnel	86
41. Fusion, fission	88
42. Oscillateurs à deux degrés de liberté en mécanique classique et en mécanique quantique	90
43. La molécule : stabilité, énergie	92
44. Capacités thermiques : description, interprétations microscopiques	94
45. Paramagnétisme, ferromagnétisme : approximations de champ moyen	96
46. Propriétés microscopiques des corps ferromagnétiques	98
47. Mécanisme de la conduction électrique dans les solides	100
48. Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique	102
49. Oscillateurs, portraits de phase et non-linéarités	104

<b>II</b>	<b>Leçons de chimie</b>	<b>106</b>
1.	Chimie et couleur (L)	110
2.	Stéréochimie (L)	112
3.	Solubilité (L)	115
4.	Conversion d'énergie chimique (L)	118
5.	Séparations, purifications, et contrôle de pureté (L)	120
6.	Matériaux polymères (L)	122
7.	Chimie et développement durable (L)	124
8.	Synthèses inorganiques (L)	126
9.	Stratégie en synthèse organique (L)	128
10.	Dosage par étalonnage (L)	130
11.	Dosage par titrage (L)	132
12.	Optimisation des cinétiques de réaction (L)	134
13.	Synthèse organique : caractérisation par spectroscopie (L)	136
14.	Relation structure-réactivité en chimie organique (L)	138
15.	Réaction chimique par échange de proton (L)	140
16.	Capteurs électrochimiques (L)	142
17.	Molécules de la santé (L)	144
18.	Structure et propriétés des molécules du vivant (L)	146
19.	Solvants (CP)	150
20.	Classification périodique (CP)	152
21.	Solides cristallins (CP)	154
22.	Réactions d'oxydoréduction (CP)	156
23.	Réactions de précipitation (CP)	158
24.	Dosage par potentiométrie (CP)	160
25.	Dosage acido-basiques (CP)	162
26.	Cinétique homogène (CP)	164
27.	Évolution et équilibre chimique (CP)	166
28.	Optimisation d'un processus de synthèse industrielle (CP)	168
29.	Hydrométallurgie (CP)	170
30.	Diagrammes potentiel-pH (construction exclue) (CP)	172
31.	Corrosion humide des métaux (CP)	174
32.	Conformations et configurations (CP)	176
<b>III</b>	<b>Montages de physique</b>	<b>178</b>
1.	Dynamique newtonienne	180
2.	Surfaces et interfaces	182
3.	Dynamique des fluides	184
4.	Capteurs de grandeurs mécaniques	186
5.	Mesures de température	188
6.	Transitions de phase	190
7.	Instruments d'optique	192
8.	Interférences lumineuses	194
9.	Diffraction des ondes lumineuses	196
10.	Spectrométrie optique	198
11.	Émission et absorption de la lumière	200
12.	Photorécepteurs	202
13.	Biréfringence, pouvoir rotatoire	204
14.	Polarisation des ondes électromagnétiques	206
15.	Production et mesure de champs magnétiques	208
16.	Milieux magnétiques	210
17.	Métaux	212
18.	Matériaux semi-conducteurs	216
19.	Effets capacitifs	218
20.	Induction, auto-induction	220
21.	Production et conversion d'énergie électrique	222
22.	Amplification de signaux	224
23.	Mise en forme, transport et détection de l'information	226
24.	Acquisition, analyse et traitement des signaux	228
25.	Mesure de fréquences temporelles (domaine de l'optique exclu)	230

26. Mesure de longueurs . . . . .	232
27. Systèmes bouclés . . . . .	234
28. Instabilités et phénomènes non-linéaires . . . . .	236
29. Ondes, propagation et conditions aux limites . . . . .	238
30. Acoustique . . . . .	240
31. Résonance . . . . .	242
32. Couplage des oscillateurs . . . . .	244
33. Régimes transitoires . . . . .	246
34. Phénomènes de transport . . . . .	248
35. Moteurs. . . . .	250

# Conseils relatifs aux leçons

**Pour une expérience préparée ou décrite**, faire un schéma **propre** et **complet** du dispositif sur transparent, explicitant toutes les notations utilisées et laissé à la vue du jury tout le temps de la description et de la discussion de l'expérience.

**Écrire à gauche, ou sur un tableau séparé**, sans jamais effacer, le titre, les pré-requis (complets et précis, pas trop généraux), l'objectif de la leçon, le niveau et le plan, au fur et à mesure. Si le tableau est trop petit, mettre le plan sur transparent. Dans ce cas, recopier au tableau au fur et à mesure les titres des parties.

Si possible, les expériences présentées, les simulations, etc. doivent être **visibles** par une hypothétique classe entière, pas seulement par le jury.

Les expériences illustratives et les simulations numériques sont **bienvenues**. Il convient de ne pas les bacler et de bien les interpréter.

Il faut :

- faire ressortir **clairement** les idées fortes de la leçon ;
- illustrer le propos avec des **arguments physiques**, des **ordres de grandeur**, des **exemples** et des **applications** tout au long de la leçon ; le jury attend que l'on donne de l'intuition ;
- être rigoureux (unités, homogénéités, scalaire/vecteur, etc.) ;
- expliciter clairement **toutes** les hypothèses avant un calcul.

Recopier les numéros des parties au tableau au fur et à mesure et marquer la différence entre les sous-parties.

**Attention à certaines maladresses** ("mon" oscilloscope, dire longueur d'onde et non  $\lambda$ , etc.).

**Être dynamique**, si possible ne pas tenir ses notes à la main. Il faut avoir un **rythme soutenu**, mais la rapidité ne doit pas se faire au détriment de la clarté. Le jury n'attend pas un vrai cours, mais plutôt essaye d'évaluer votre capacité à faire un vrai cours.

**Passer assez de temps sur l'introduction et la conclusion** (au moins deux minutes) pour introduire le problème, les objectifs de la leçon, et le plan, puis pour conclure, résumer précisément les principales idées de la leçon.

Mettre le rétroprojecteur à l'écart pour ne pas gêner la vue du tableau (de même pour les dispositifs expérimentaux).

**Les couleurs sont bienvenues** pour mettre en valeur les définitions et équations importantes, pour réaliser des schémas clairs, sur transparent comme au tableau. Attention à ne pas en abuser non plus. Éviter les couleurs non visibles (bleu foncé par exemple).

**Préférer montrer des schémas tout fait**, proprement sur transparent, sauf si la construction du schéma présente un intérêt pédagogique (ou pour épater le jury en faisant des cercles parfaits).

**Utiliser la banque de diapo sur PC**, en particulier pour des animations .gif éclairantes.

Connaître au moins dans les grandes lignes le fonctionnement des appareils utilisés.

**Pour la chimie**, prendre deux minutes pour **contextualiser** la leçon et l'inclure dans une démarche pédagogique. Faire également des choix et dûment les expliquer.

Les leçons font avancer la compréhension, cela doit ressortir clairement dans la conclusion.

**Surtout, bien lire les rapports du jury.**

Première partie  
Leçons de physique

## Contact entre deux solides. Frottement

OBJECTIF – Comprendre les lois et les mécanismes à l'œuvre dans le frottement solide.

NIVEAU – Première année de CP

PRÉ-REQUIS :

- Mécanique du solide (cinématique et dynamique)
- Mécanique du point

### Bibliographie

- [1] B. Andreotti, Y. Forterre, and O. Pouliquen. *Les milieux granulaires, entre fluide et solide*. CNRS Éditions, 2011.
- [2] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Mécanique II : Mécanique du solide et notions d'hydrodynamique*. Dunod, 1989.
- [3] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Mécanique du solide PC-PC\**. Hachette, 1998.
- [4] B. Portelli and J. Barthes. *La physique par la pratique*. H&K éditions, 2005.
- [5] J. P. Pérez. *Mécanique, fondements et applications*. Dunod, 2001.
- [6] M. N. Sanz and B. Salamito. *Tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2009.

### Introduction

On connaît des notions de cinématique du solide, de dynamique. On a souvent négligé les frottements solides, parfois pris en compte des frottements fluides. Mais si ces frottements sont parfois nuisibles (rendement des machines mécaniques), il sont parfois très utiles (pour marcher). Ici, une étude détaillée est trop complexe, on base donc l'étude sur des lois phénoménologiques simples mais rendant bien compte des phénomènes.

## 1 Contact entre deux solides

### 1.1 Aspect mécanique et géométrie du contact [3]

- On considère deux solides toujours en contact en mouvement l'un par rapport à l'autre : trois types de contact, caractère approximatif des deux derniers.
- Modèle du contact ponctuel. Définition du glissement. Vitesse de glissement.
- Roulement de pivotement. Vecteur rotation relatif. Rotation de pivotement et de roulement.

### 1.2 Lois d'Amontons-Coulomb [1, 3]

EXPÉRIENCE – Les trois cubes de bois. Superposés, l'un à côté de l'autre. Faire du quantitatif simple avec un dynamomètre.

- Hypothèse simplificatrice. Résultante des forces. Résultante des moments.
- On impose le frottement de pivotement ou de roulement.
- Énoncé des lois de Coulomb. Ordres de grandeur. Cône de frottement.

### 1.3 Approche énergétique : puissance des actions de contact [3]

- Cas général. Cas ponctuel. Un commentaire sur le signe.

EXPÉRIENCE – Se frotter les mains. Ça chauffe. Ordre de grandeur : 1 K.

## 1.4 Aspect microscopique [1]

- Potentiel périodique en dent de scie. Retombée brutale dans les puits causant une perte d'énergie.
- La proportionnalité est due à l'augmentation de la surface de contact.
- Arrachement d'électrons, formation de liaisons.
- Dissipation d'énergie vers les phonons : augmentation de la température.

## 2 Glissement et frottement de glissement

### 2.1 Rupture d'équilibre [3, 5, 2]

EXPÉRIENCE – Plan incliné avec le bois. Angle de glissement.

- Principe fondamental de la dynamique. Faire le calcul. Application à l'arc boutement : pas de vis d'une vis métal et d'une vis bois.

EXPÉRIENCE – Illustration du fait que le coefficient de frottement statique est supérieur au dynamique : on donne une pichenette alors que le cube est au repos : il accélère alors qu'il ne démarrait pas seul.

### 2.2 Mouvement stick-slip [6, 2]

EXPÉRIENCE – Faire l'expérience du stick-slip, seulement de façon qualitative. Observer l'alternance des phases de collement et de glissement.

- Faire le calcul dans le cas simplifié suggéré par le BFR.
- Application utile : faire crisser la craie pour effrayer les élèves.

## 3 Roulement et glissement

### 3.1 Démarrage d'un cycliste [3]

- Condition de roulement sans glissement.
- Théorème de la résultante cinétique et théorème du moment cinétique à l'ensemble.
- Théorème du moment cinétique aux roues.
- Conclusions : possibilité de dérapage (rapport  $T_2/N_2$ ) et de wheeling (annulation de  $N_1$ )
- Aspect énergétique

### 3.2 Autres applications [4]

À mentionner ou à étudier, selon l'envie : 4×4, traction avant,...

## Conclusion

- Résumé précis et détaillé des idées fortes de la leçon. Modélisation relativement simple expliquant beaucoup.
- Ouverture sur l'aspect microscopique, encore mal compris.

NOTES : Leçon assez longue, aller assez vite sur la première partie. Le jury demande de différencier les différents types de contact, de s'intéresser à la réalité microscopique et à l'aspect énergétique.

## Caractère non-galiléen du référentiel terrestre

**OBJECTIF** – Quantifier le caractère galiléen d'un référentiel et voir quelques effets du caractère non-galiléen.

**NIVEAU** – Première année de CP

**PRÉ-REQUIS :**

- Forces d'inertie
- Mécanique en référentiel galiléen
- Mouvement des planètes

### Bibliographie

- [1] T. Alhalel. Dynamique de l'atmosphère terrestre. *BUP*, 939, 2011.
- [2] P. Brasselet. *Mécanique MPSI-PCSI*. Presses universitaires de France, 2000.
- [3] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Mécanique MPSI-PCSI-PTSI*. Hachette, 2004.
- [4] J. P. Faroux and J. Renault. *Mécanique*. Dunod, 1998.
- [5] J. Pérez, É. Bellanger, X. Ducros, V. Renvoizé, and P. Roux. *Physique MPSI-PCSI-PTSI*. Cap prépa – Pearson, 2009.
- [6] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

### Introduction [2, 3]

- On a jusqu'ici toujours considéré le référentiel terrestre comme galiléen.
- Aucune raison pour le faire pourtant. Expérience historique du pendule de Foucault.
- On va envisager plusieurs référentiels, et on considérera la validité des hypothèses nécessaires pour supposer un référentiel galiléen.

## 1 À la recherche d'un référentiel galiléen [2, 4]

### 1.1 Les trois référentiels usuels [5, 3, 6]

- Description générale du mouvement de la Terre autour du soleil. Jour sidéral et jour solaire.
- Définition du référentiel de Copernic. Remarque à propos de son caractère galiléen et sur les étoiles fixes.
- Définition du référentiel géocentrique.
- Définition du référentiel terrestre. Vecteur rotation  $\vec{\omega}_T$  incliné. Remarque sur sa précession au cours du temps, sur les variations de sa norme.

### 1.2 Le principe fondamental de la dynamique dans le référentiel terrestre

- Définition d'une base locale dans le référentiel terrestre.
- Écriture du principe fondamental de la dynamique dans le référentiel terrestre.
- Distinguer les trois termes : pesanteur vulgaire, force de Coriolis et terme de Marée.

## 2 Le phénomène de marée [2, 4]

- Écriture de la force de marée qui apparaît dans le principe fondamental de la dynamique.

### 2.1 Champ de force de marée dû à un astre

- Champ exercé sur la Terre : ordre de grandeur.
- Schéma et calcul. Ordre de grandeur.

- Explication des marées océaniques. Théorie statique. Variations de l'amplitude. Compensation ou addition des effets de la Lune et du Soleil.
- Quelques idées à propos d'une théorie dynamique.

## 2.2 Marées planétaires – Limite de Roche

- Faire le calcul simplifié des deux sphères en contact dont la cohésion n'est due qu'à la gravité. Limite de Roche.
- Anneaux de Jupiter, de Saturne.

# 3 Conséquences de la rotation propre de la Terre [2, 4]

## 3.1 Définition du poids

- Condition de définition du poids.
- Composantes du poids. Ordres de grandeur.
- Direction de la verticale.

## 3.2 Effet de la force de Coriolis [1]

- Effet de cette force. Ordres de grandeur.
- Déviation vers l'Est.
- Analyse qualitative du mouvement du pendule de Foucault.
- Quelques mots sur les vents géostrophiques.

## Conclusion

- Résumé. Condition pour considérer le référentiel terrestre galiléen.
- Relatif à la précision désirée.

NOTES : Attention à être très rigoureux et à avoir les idées claires sur ce que l'on dit. [4] et [2] se complètent bien et permettent de traiter presque toute la leçon.

## LP 3

# Approximation gyroscopique : effets dans les domaines macroscopiques et microscopiques

OBJECTIF – Comprendre l'intérêt de l'approximation gyroscopique et ses nombreuses applications.

NIVEAU – L3

PRÉ-REQUIS :

- Mécanique du solide (cinématique et dynamique)
- Matrice d'inertie
- Magnétisme, atome de Bohr

## Bibliographie

- [1] G. Asch. *Les capteurs en instrumentation industrielle*. Dunod, 2010.
- [2] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Mécanique II : Mécanique du solide et notions d'hydrodynamique*. Dunod, 1989.
- [3] J. Boutigny. *Mécanique tome 2 : mathématiques spéciales*. Vuibert, 1984.
- [4] P. Brasselet. *Mécanique MPSI-PCSI*. Presses universitaires de France, 2000.
- [5] C. Cohen-Tanoudji, B. Diu, and F. Laloë. *Mécanique quantique tome 1*. Hermann, 1995.
- [6] J. P. Pérez. *Mécanique, fondements et applications*. Dunod, 2001.
- [7] J. C. Radix. Aspects modernes des gyroscopes. *BUP*, 587, 1976.
- [8] S. Strelkhov. *Mécanique*. Éditions de Moscou, 1978.

## Introduction [2, 8]

- Six degrés de liberté d'un solide : trois de translation, trois de rotation.
- Problème d'un corps qui effectue une rotation rapide autour d'un axe.

EXPÉRIENCE – Toupie qui tourne, toupie qui ne tourne pas.

## 1 Mouvement de la toupie et approximation gyroscopique

### 1.1 Angles d'Euler [6, 3]

- Définition des angles d'Euler : précession, nutation et rotation propre.

EXPÉRIENCE – Montrer sur la toupie pour mieux voir.

- Vecteur rotation de la toupie.
- Bien définir à chaque fois les référentiels.
- Expression du vecteur rotation dans la base dite de résal.

### 1.2 Équation du mouvement [6]

- Absence de translation. Définition du moment cinétique et du moment des forces. Théorème du moment cinétique. Difficulté à exploiter.

### 1.3 Approximation gyroscopique [3, 2]

- Expression de la matrice moment d'inertie et du moment cinétique.
- Écriture de l'approximation gyroscopique.

## 1.4 Retour sur le mouvement de la toupie [2, 6]

- Équation du mouvement. Vitesse de précession et vérification de l'approximation gyroscopique.

## 2 Effets dans le domaine macroscopique et applications

### 2.1 Construction d'un gyroscope et intérêt [6, 8, 7]

- Présentation du gyroscope et des liaisons. Application du théorème du moment cinétique.

EXPÉRIENCE – Présentation du gyroscope, mise en rotation et direction fixe du vecteur rotation.

### 2.2 Couple gyroscopique [6, 1, 7]

- Présentation du phénomène.

EXPÉRIENCE – Roue de vélo.

- Construction de tachymètres. Ordres de grandeur.

### 2.3 Gyroscope anti-roulis et stabilisation de trajectoires [6, 7]

- Intérêt et ordres de grandeur industriels.

### 2.4 Gyroscope non équilibré et précession [6, 8, 4, 7]

EXPÉRIENCE – Précession du gyroscope.

- Couple du poids. Effet paradoxal.
- Précession des équinoxes.

## 3 Effets dans le domaine microscopique et magnétisme

### 3.1 Interaction entre un moment magnétique et un champ magnétique [6, 5]

- Origine du moment magnétique rapidement avec le modèle de Bohr.
- Théorème du moment cinétique.

### 3.2 Précession du moment magnétique [6]

- Calcul. Ordre de grandeur des vitesses et vérification de l'approximation gyroscopique.

### 3.3 Champ tournant et RMN [6, 5]

- Faire le calcul du Cohen. Ordres de grandeur avec le Pérez. Conclusion sur le phénomène.

## Conclusion [6]

- Résumé de ce qui a été dit. Importance des gyroscopes.
- Nécessité d'un traitement quantique de la RMN.

NOTES : Leçon préparée en oral blanc, de longueur correcte. Il est inutile de faire trop de calculs. Être rigoureux dans la définition des référentiels. Introduire le plus d'ordres de grandeur possibles. Garder assez de temps pour le côté microscopique.

## Lois de conservation en dynamique des systèmes

**OBJECTIF** – Montrer l'intérêt des lois de conservation sur plusieurs exemples.

**NIVEAU** – L3

**PRÉ-REQUIS :**

- Mécanique du point
- Problème à deux corps
- Cinématique relativiste

### Bibliographie

- [1] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Mécanique I : Mécanique classique des systèmes de points et notions de relativité*. Dunod, 1990.
- [2] P. Brasselet. *Mécanique MPSI-PCSI*. Presses universitaires de France, 2000.
- [3] B. Cagnac, L. Tchang-Brillet, and J. C. Pebay-Péroula. *Physique atomique tome 1*. Dunod, 2005.
- [4] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Mécanique MPSI-PCSI-PTSI*. Hachette, 2004.
- [5] E. Hecht. *Physique*. De Boeck, 2009.
- [6] J. Sivardière. *La symétrie en mathématiques, physique et chimie*. Presses universitaires de Grenoble, 1995.

### Introduction

- On a vu les lois de la mécanique classique : voir une autre formulation par le biais des lois de conservation.
- Avantage des lois de conservation pour la résolution de certains problèmes, comme les chocs, que nous allons étudier avec le cas de l'effet Compton.

## 1 Origine, énoncé et illustrations des lois de conservation

[2, 4] pour la formulation, [6] pour l'origine.

### 1.1 Quantité de mouvement

- Loi en lien avec le principe fondamental de la dynamique. Expression de la loi de conservation.
- Origine, invariance par translation. Conséquence sur l'expression de la loi.
- Exemple du pistolet (voir ordre de grandeur dans le [5]). Intérêt de la loi de conservation.

### 1.2 Conservation de l'énergie

- Loi en lien avec le théorème de l'énergie mécanique. Expression de la loi de conservation.
- Origine : invariance par translation temporelle. Conséquences.

**EXPÉRIENCE** – Pendule pesant : calcul de l'énergie.

- Présentation de ce système par son côté énergétique. Équation du mouvement. Donner quelques ordres de grandeur.

### 1.3 Conservation du moment cinétique

- Loi en lien avec le théorème du moment cinétique. Expression de la loi de conservation.
- Origine : invariance par rotation autour d'un axe. Conséquence.

**EXPÉRIENCE** – Tabouret avec poids dans les mains.

- Faire le calcul, intérêt des lois de conservation.

## 2 Mouvement à force centrale conservative

[4] surtout, [1, 2, 6] pour des compléments.

### 2.1 Position du problème

- Plusieurs types d'interaction possibles. Quelques exemples.
- Mentionner la généralité du problème avec la réduction du problème à deux corps.

### 2.2 Conservation du moment cinétique

- Démonstration. Expression du moment cinétique. Constante des aires.
- Conséquence sur la planéité du mouvement.
- Conséquence sur la loi des aires.
- Bilan : on a obtenu facilement des données importantes.

### 2.3 Conservation de l'énergie : nature du mouvement

- Expression de l'énergie avec énergie potentielle effective.
- Cas des interactions newtoniennes, attractives et répulsives.
- Bilan.

### 2.4 Nature de la trajectoire : vecteur de Runge-Lenz

- Démonstration de la conservation du vecteur de Runge-Lenz. Conséquence sur la trajectoire.

## 3 Application des lois de conservation aux collisions : cas de l'effet Compton [3, 1]

### 3.1 Position du problème

- Présentation rapide de l'expérience historique de Compton.
- Position du problème considéré.

### 3.2 Observations expérimentales et applications

- Bilan des équations et des inconnues. Hypothèses.
- Bilan de la collision (tableau du Cagnac).
- Utilisation des lois et calcul du  $\delta\lambda$ .

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur la généralité du théorème de Noether, et l'importance des symétrie et lois de conservation en physique.

NOTES : Leçon reprise sur celle présentée pendant l'année, très bien. Insister sur l'intérêt des lois de conservation. Être rigoureux sur les hypothèses.

# Cinématique relativiste

**OBJECTIF** – Comprendre les origines de la relativité restreinte et en voir quelques conséquences.

**NIVEAU** – L3

**PRÉ-REQUIS :**

- Mécanique classique
- Électromagnétisme
- Interférences lumineuses

## Bibliographie

- [1] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Mécanique I : Mécanique classique des systèmes de points et notions de relativité*. Dunod, 1990.
- [2] J. P. Pérez and E. Anterrieu. *Relativité et invariance, fondements et applications*. Dunod, 2005.
- [3] C. Semay and B. Silvestre-Brac. *Relativité restreinte : bases et applications*. Dunod, 2010.

## Introduction [1, 2]

- État de la physique à partir du XIX<sup>e</sup> siècle : deux problèmes listés par Kelvin.
- Bien laisser apparaître que les problèmes autour des spectres de raies et de la catastrophe ultraviolette souciaient plus les physiciens que cette obscure histoire d'éther.

## 1 Insuffisances de la cinématique classique [1]

### 1.1 Principe de relativité et notion d'évènement

- Objectif du physicien expérimentateur : faire des observations objectives : invariants.
- Définition d'un évènement. Exemple.
- Constatations expérimentales : principe de relativité.

### 1.2 Transformation de Galilée et insuffisances

- Définition de la transformation de Galilée. Importance en mécanique classique.
- Problème avec l'électromagnétisme : deux solutions au problème. Nécessité de l'expérience.

### 1.3 Expérience de Michelson et Morley [3]

- Présentation de l'expérience. Bien expliquer.
- Faire le calcul des différences de marche au tableau, puis du déplacement des franges. Applications numériques. Conclusion.
- Autres expériences plus tardives qui ont mis en exergue les insuffisances de la mécanique classique.

## 2 Bases de la relativité restreinte [1]

### 2.1 Postulat de relativité restreinte [3]

- Énoncer les trois postulats. Les expliquer et montrer leurs rôles respectifs.

### 2.2 Transformation de Lorentz

- Transformation de Lorentz : définition. Origine historique (invariance des équations de Maxwell). Formulation du BFR.
- Démonstration de la satisfaction des trois postulats.

## 2.3 Composition des vitesses

- Calcul complet des formules de compositions à partir de l'expression de la transformation de Lorentz. Commentaire par rapport à la cinématique classique.

## 2.4 Expérience de Fizeau [3, 2]

- Explication détaillée de l'expérience.
- Calcul de la différence de marche en relativité galiléenne et en relativité restreinte. Comparaison avec l'expérience.

# 3 Conséquences de la relativité restreinte [1]

## 3.1 Perte de simultanéité [3]

- Illustration sur l'exemple du train avec un passager à bord envoyant un signal lumineux et un passager sur le quai.

## 3.2 Invariance de l'intervalle

- Définition de l'intervalle. Intervalle de genre temps et intervalle de genre espace. Cône de lumière.
- Caractère fondamental de cette invariance.

## 3.3 Dilatation du temps et contraction des longueurs [3]

- Démonstration de la dilatation à partir de l'invariance de l'intervalle. Bien définir les référentiel. Notion de temps propre. Illustration sur l'exemple des muons.
- Contraction des longueurs : démonstration à partir de la transformation de Lorentz. Bien insister sur le côté symétrique de la dilatation.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes de la leçon.
- Ouverture sur le GPS, sur la nécessité de principe dynamiques.

NOTES : Leçon préparée pendant l'année, légèrement modifiée compte-tenu des observations du jury. Être rapide, si besoin, passer les calculs de l'expérience de Fizeau. Être rigoureux dans la définition des référentiels, faire attention aussi au côté pédagogique.

# Dynamique relativiste

**OBJECTIF** – Introduire les lois de la dynamique relativiste et étudier quelques mouvements de particules chargées.

**NIVEAU** – L3

**PRÉ-REQUIS :**

- Mécanique classique
- Cinématique relativiste
- Mouvement classique de particules chargées

## Bibliographie

- [1] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Mécanique I : Mécanique classique des systèmes de points et notions de relativité*. Dunod, 1990.
- [2] B. Cagnac, L. Tchang-Brillet, and J. C. Pebay-Péroula. *Physique atomique tome 1*. Dunod, 2005.
- [3] C. Grossetête. *Relativité restreinte et structure atomique de la matière*. Ellipses, 1985.
- [4] J. P. Pérez and E. Anterrieu. *Relativité et invariance, fondements et applications*. Dunod, 2005.
- [5] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

## Introduction [3, 1, 5]

- On a vu les principes de la cinématique relativiste, que l'on résume rapidement, on va maintenant voir les principes dynamiques. Définition des termes puis on s'inscrit dans le cadre de la relativité restreinte.
- Quelles sont les lois qui succèdent au PFD sachant que l'on doit le retrouver pour  $v \ll c$  ?

## 1 De la dynamique classique à la dynamique relativiste [3]

### 1.1 Principe fondamental de la dynamique

- On reconduit le PFD en gardant une formulation très proche.

### 1.2 Quadri-vecteur énergie-impulsion

- Invariant. Faire le lien avec l'invariance de l'intervalle  $(ct, \vec{r})$  vue en cinématique.
- Conséquence : ce quadri-vecteur s'écrit dans un autre référentiel selon la transformation de Lorentz.
- Relation entre  $\vec{p}$  et  $E$  pour une particule de masse non nulle.
- Conclusion sur la définition de  $\vec{p}$  et  $E$ . Remarque sur la masse comme invariant.
- Vitesse. Formule  $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$ .
- Énergie cinétique. Retrouver la formulation classique.

### 1.3 Quadri-vecteur force

- Définition du travail élémentaire. Expression du théorème de l'énergie cinétique.
- Formulation quadridimensionnelle du principe fondamental de la dynamique, en partant du quadri-vecteur  $(E, \vec{p})$ . Définition du quadri-vecteur force.

## 2 Applications aux collisions [1]

### 2.1 Chocs élastiques et chocs inélastiques

- Position du problème. Chocs élastiques et inélastiques.
- Principes généraux pour l'étude d'un choc.

## 2.2 Un exemple de collision élastique : l'effet Compton [2]

- Définition du système. Explication de la physique.
- Faire le calcul de la diffusion Compton.
- Discuter les ordres de grandeur et les conséquences fondamentales.

## 2.3 Collisions inélastiques et effet de seuil [4]

- Intérêt de considérer le référentiel barycentrique.
- Calcul de l'énergie de seuil.
- Application à la création d'une paire proton-antiproton. Expression des masses en eV. Ordres de grandeur.

# 3 Mouvement de particules relativistes chargées

## 3.1 Particule dans un champ électrique uniforme et constant [1, 4]

- Équation horaire du mouvement. Analyse du résultat.
- Accélération par une différence de potentiel constante. Calcul avec le théorème de l'énergie cinétique. Expérience de Bertozzi. Courbe classique, relativiste et expérimentale. Ordres de grandeur.
- Renoncement aux accélérations linéaires à cause de la limitation en tension.

## 3.2 Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique – Cyclotrons et synchrotrons [4, 3]

- Trajectoire dans un champ magnétique uniforme.
- Application aux cyclotrons et synchrotrons. Ordres de grandeur.
- Rayonnement synchrotron. Avantages et inconvénients.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes de la leçon.
- Importance dans la recherche (boson de Higgs, rayonnement synchrotron).

NOTES : Leçon assez longue, être précis et concis dans la première partie, essayer d'introduire le maximum d'ODG (modernes).

## Notion de viscosité d'un fluide. Écoulements visqueux.

OBJECTIF – Comprendre le phénomène de viscosité et ses implications.

NIVEAU – Deuxième année de CP

PRÉ-REQUIS :

- Fluide parfait
- Cinématique des fluides
- Diffusion
- Mécanique

### Bibliographie

- [1] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Thermodynamique*. Dunod, 1989.
- [2] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Mécanique des fluides PC-PSI*. Hachette, 2008.
- [3] É. Guyon, J. P. Hulin, and L. Petit. *Ce que disent les fluides*. Belin – Pour la science, 2006.
- [4] É. Guyon, J. P. Hulin, and L. Petit. *Hydrodynamique physique*. CNRS Éditions, 2012.
- [5] P. Oswald. *Rhéophysique, ou comment coule la matière*. Belin, 2005.
- [6] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PSI-PSI\**. Cap prépa – Pearson, 2010.

### Introduction [2]

- Écoulements parfaits : multitude d'applications. Mais cette description est-elle complète ?

EXPÉRIENCE – Vidange d'une burette d'eau / d'huile.

- Le modèle du fluide parfait ne rend pas compte de la différence (même  $\vec{g}$ , même  $P_0$ ,  $\rho$  voisins). Notion de viscosité.

## 1 Notion de viscosité

### 1.1 Force visqueuse [6, 4]

EXPÉRIENCE – Écoulement de Couette plan.

- Existence d'une force de friction. Description des observations.
- Loi de Newton à l'échelle mésoscopique. Définition de la viscosité. Force volumique de viscosité. Conditions aux limites. Ordres de grandeur.
- La description plus complète implique une viscosité de volume, négligée ici (écoulements incompressibles).

### 1.2 Interprétation microscopique [4, 1, 6]

- Écoulement de Couette. Hypothèse du modèle, modèle microscopique de viscosité pour les gaz.
- Interprétation en terme de diffusion.

### 1.3 Facteurs d'influence [4, 5]

- Impact de la température sur la viscosité des gaz et des liquides. Ordres de grandeur.
- Dépendance en cisaillement. Mentionner les fluides non-newtoniens avec quelques exemples sans rentrer dans les détails.

## 2 Dynamique des fluides visqueux [6, 4]

### 2.1 Équation de Navier-Stokes

- Cadre de l'étude. Hypothèses de l'équation.
- Équation de Navier-Stokes. Mentionner les conditions aux limites.
- Difficulté à résoudre.

### 2.2 Nombre de Reynolds

- Adimensionner l'équation de Navier-Stokes. Introduire le nombre de Reynolds.
- Décrire le nombre de Reynolds en quotient de termes (temps de diffusion, terme de diffusion dans l'équation,...). Ordres de grandeur.
- Similitudes.

### 2.3 Aspect énergétique

- Charge et perte de charge dans un écoulement.

EXPÉRIENCE – Perte de charge dans un écoulement.

## 3 Écoulements rampants

### 3.1 Équation de Stokes [5, 3]

- Origine : nombre de Reynolds ou géométrie particulière du système.
- Écriture de l'équation de Stokes. Linéarité, réversibilité.
- Ordres de grandeur et discussion autour de la propulsion des microorganismes. Théorème de la coquille St-Jacques.

EXPÉRIENCE – Réversibilité de l'équation de Stokes.

### 3.2 Écoulement de Couette plan [6]

- Résolution. Bilan de forces et de puissance. Bilan énergétique.

### 3.3 Écoulement de Poiseuille cylindrique [6, 3]

- Hypothèses et résolution.
- Discussion à propos du nombre de Reynolds. Transition laminaire-turbulent.

## 4 Couche limite [6]

### 4.1 Définition, épaisseur de la couche limite

- Définition de la couche limite. Influence des effets visqueux.
- Ordres de grandeur et épaisseur de la couche limite.

### 4.2 Force de traînée et décollement de la couche limite

- À discuter assez qualitativement.

## Conclusion

- Limite de l'équation d'Euler, validité. Importance des effets visqueux.
- Ouverture sur la turbulence. Enjeu de la physique moderne.

NOTES : Leçon assez longue, la couche limite peut faire également l'objet d'une longue conclusion.

## Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide

**OBJECTIF** – Comprendre quand peut-on négliger la viscosité d'un fluide et l'intérêt de l'hypothèse de l'écoulement parfait.

**NIVEAU** – Deuxième année de CP

**PRÉ-REQUIS :**

- Équation de Navier-Stokes
- Mécanique
- Cinématique des fluides

### Bibliographie

- [1] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Mécanique des fluides PC-PSI*. Hachette, 2008.
- [2] É. Guyon, J. P. Hulin, and L. Petit. *Hydrodynamique physique*. CNRS Éditions, 2012.
- [3] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PSI-PSI\**. Cap prépa – Pearson, 2010.

### Introduction

- Équation de Navier-Stokes : résolution dans quelques cas simples (Poiseuille, Couette) où la viscosité est prépondérante.
- Équation non résolue : simplifications.
- Récipient qui se vide : pas nécessaire de connaître le champ de vitesse partout.

**EXPÉRIENCE** – Expérience illustrative du vase de Mariotte.

## 1 Écoulement parfait d'un fluide [2, 3]

### 1.1 Équation de Navier-Stokes adimensionnée

- Introduction des grandeurs caractéristiques. Grandeurs adimensionnées.
- Hypothèses de Navier-Stokes. Équation adimensionnée.
- Nombre de Strouhal, Froude et Reynolds.
- Écoulements semblables et principe de similitude.

### 1.2 Fluide parfait et écoulement parfait [1]

- Démonstration de l'équation d'Euler. Conditions aux limites.
- Fluide parfait. Viscosité nulle. Peu commun.
- Écoulement parfait, effet de viscosité négligeable et grand Reynolds. Ordre de grandeur.
- Différence au voisinage d'un obstacle
- Ligne de champ en écoulement parfait.

### 1.3 Notion de couche limite [1]

- Visualisation des lignes de courant.
- Taille de la couche limite. Ordre de grandeur.
- Importance de la notion de couche limite.

## 2 Relation de Bernoulli [1, 3]

### 2.1 Théorème de Bernoulli

- Énoncé précis dans chacune des deux équations et démonstration. Montrer où on utilise les hypothèses. Interprétation énergétique.
- Domaine d'application : loin de la couche limite. Pas toujours le cas.
- Formule de Toricelli : application simple.

EXPÉRIENCE – Vase de Toricelli.

- Explication du désaccord. Hypothèse du fluide parfait et de l'homogénéité du champ de vitesse.

### 2.2 Effet Venturi, tube de Pitot

- Calcul de l'effet Venturi. Application à la filtration sous vide.
- Tube de Venturi.
- Phénomène de cavitation.
- Tube de Pitot. Fonctionnement malgré la couche limite (peu de variation de pression).

EXPÉRIENCE – Expérience avec dispositif perte de charge.

### 2.3 Effet Magnus

- Constat expérimental.
- Asymétrie due à la translation.
- Portance d'une aile d'avion.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur le décollement de couche limite.

NOTES : Le jury demande de supposer les phénomènes de viscosité connus, de bien dégager les conditions d'applications des relations, de faire une interprétation énergétique des relations de Bernoulli.

# Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides

**OBJECTIF** – Comprendre l'origine des phénomènes interfaciaux, comment les décrire et leurs conséquences.

**NIVEAU** – L3

**PRÉ-REQUIS :**

- Hydrodynamique (équation de Navier-Stokes et approximation de lubrification)
- Thermodynamique macroscopique
- Forces intermoléculaires

## Bibliographie

- [1] P. G. De Gennes, F. Brochard-Wyart, and D. Quéré. *Gouttes, bulles, perles et ondes*. Belin, 2013.
- [2] B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, and B. Roulet. *Thermodynamique*. Hermann, 2007.
- [3] É. Guyon, J. P. Hulin, and L. Petit. *Hydrodynamique physique*. CNRS Éditions, 2012.
- [4] B. Lahaye. Propagation des ondes : vitesse de phase, vitesse de groupe. *BUP*, 649, 1982.

## Introduction

- Présentation de la dynamique des fluides. Égalité des contraintes visqueuses à l'interface. Pas de prise en compte des interactions entre ces deux fluides.
- Phénomènes interfaciaux : fondamental dans beaucoup de phénomènes.

**EXPÉRIENCE** – Trombone qui flotte et qui coule avec du détergent.

## 1 Statique des interfaces [2, 3, 1]

### 1.1 Mise en évidence du phénomène

**EXPÉRIENCE** – Cadre rectangulaire et bulle de savon.

- Explication en terme de minimisation de l'énergie. Définition à partir de l'énergie libre.
- Interprétation en terme de forces et lien avec l'expérience introductive.

### 1.2 Origine microscopique de la capillarité

- Interactions cohésives au sein d'un liquide. Molécules à l'interface en déséquilibre. Ordres de grandeur pour différentes espèces et interprétation microscopique des différences.

### 1.3 Discontinuité de la pression : loi de Laplace

- Position du problème. Goutte sphérique et absence de pesanteur. Expression du potentiel thermodynamique  $\tilde{G}(S, R)$  pour obtenir la loi de Laplace.

**EXPÉRIENCE** – Bulles de savon.

- Généralisation à une surface quelconque (rayon de courbure).

## 2 Dynamique des interfaces [3, 1]

### 2.1 Gravité et capillarité

EXPÉRIENCE – Gouttes de différentes tailles. Aplatissement.

- Allure de l'interface. Explication en terme de compétition.
- Loi de Jurin avec raisonnement en pression.

EXPÉRIENCE – Expérience illustrative avec cuve en coin.

- Longueur capillaire. Ordres de grandeur.

### 2.2 Instabilité de Rayleigh-Taylor

- Présentation du phénomène physique. Compétition et description qualitative.
- Mise en équation avec hypothèses. Solution en sinus divergent ou convergent.

### 2.3 Ondes gravito-capillaires [4]

- Démonstration de la relation de dispersion des ondes gravito-capillaires.
- Discussion des différents domaines.

EXPÉRIENCE – Faire l'expérience de la cuve à ondes.

## 3 Mouillage [1]

### 3.1 Notion de mouillage

EXPÉRIENCE – Goutte sur plusieurs surfaces.

- Plusieurs cas visibles. Mouillage partiel et total.
- Loi de Young-Dupré. Retour sur la loi de Jurin.

### 3.2 Propriété du mouillage

- Liquides mouillants et non-mouillants.
- Choix du substrat. Discussion.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Importance dans l'industrie de la notion de mouillage : vitres auto-nettoyantes, surfaces hydrophobes, etc.

NOTES : Ne pas rendre la leçon trop calculatoire. Parler de l'aspect thermodynamique de façon rigoureuse.

## Gaz parfait, gaz réels

**OBJECTIF** – Comprendre le modèle du gaz parfait, ses avantages et ses principales limitations.

**NIVEAU** – L3

**PRÉ-REQUIS :**

- Notion de pression, de température
- Gaz parfait
- Mécanique classique

### Bibliographie

- [1] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Thermodynamique*. Dunod, 1989.
- [2] B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, and B. Roulet. *Thermodynamique*. Hermann, 2007.
- [3] J. Pérez, É. Bellanger, X. Ducros, V. Renvoizé, and P. Roux. *Physique MPSI-PCSI-PTSI*. Cap prépa – Pearson, 2009.
- [4] J. P. Pérez. *Thermodynamique, fondements et applications*. Dunod, 2001.
- [5] M. N. Sanz, A. E. Badel, and F. Clausset. *Tout-en-un MPSI-PCSI-PTSI*. Dunod, 2008.

### Introduction [3]

- Insister sur le fait que il y a  $10^{23}$  molécules, rendant impossible la description du système.
- Développement historique de la thermodynamique : industriel.
- On part des résultats expérimentaux.

## 1 Le modèle du gaz parfait

### 1.1 Définitions [1]

- Amener la définition du gaz parfait en suivant la progression du BFR : loi de Boyle-Mariotte, proportionnalité  $PV = rT$  (loi de Gay-Lussac), on cherche à quantifier  $r$  (loi d'Avogadro).

### 1.2 Cinétique des gaz parfaits [3, 1]

#### Hypothèse du modèle

- Homogénéité, isotropie et stationnarité. Expliquer avec le BFR.
- Citer les autres hypothèses (absence de champ, ...)
- Définir le contenu général du modèle avant.

#### Température cinétique

- Parachuter la répartition des vitesses. Expliquer son origine physique (en particulier l'homogénéité et l'isotropie).
- Définition de la température cinétique pour un gaz parfait monoatomique.

#### Pression cinétique

- Expliquer le principe du calcul avec la valeur moyenne. Dire que c'est une simplification mais sans perte de généralité.
- Faire le calcul de la pression cinétique.

#### Équation d'état

- Démontrer l'équation d'état des gaz parfaits.
- Faire le lien avec la première sous-partie.
- Lien entre température cinétique et température absolue.

## 1.3 Propriétés du gaz parfait et extension du modèle [3, 1]

### Énergie interne du gaz parfait monoatomique

- Définition basique de l'énergie interne. Expression pour le gaz parfait.
- Capacité thermique à volume constant.

### Degrés de libertés et équipartition de l'énergie

- Discuter les degrés de libertés de la molécule diatomique.
- Théorème d'équipartition de l'énergie. Le constater dans le cas du gaz parfait monoatomique.

### Énergie interne du gaz parfait diatomique [5]

- Donner l'expression. Tracer le diagramme  $C_v(T)$  avec les paliers. Les interpréter en lien avec les températures de gel et l'équipartition de l'énergie.

## 2 Limites du modèle : vers les gaz réels

### 2.1 Constatations expérimentales [3]

**EXPÉRIENCE** – Constater les changements d'états avec le dispositif à  $SF_6$ . Isothermes.

- Discuter les résultats expérimentaux.

### 2.2 Modèle de Van der Waals [3, 1, 2]

- Expliquer l'origine des limitations du gaz parfait.
- Deux ajouts : potentiel attractif constant et sphères dures.
- Donner l'équation de Van der Waals et en expliquer la signification physique.
- Discuter les isothermes, les changements d'état, le point critique.
- Remarque sur la définition du Kelvin (point triple de l'eau).

### 2.3 Effets quantiques [4, 2]

- Introduire la longueur d'onde de De Broglie.
- Statistiques de Bose-Einstein et de Fermi-Dirac. Présenter quelques résultats (capacité calorifique, etc.)

## Conclusion

- Gaz parfait : résumé des hypothèses. Intérêt.
- Insister sur l'intérêt du gaz de Van der Waals pour la description qualitative des phénomènes rencontrés.
- Aussi limite quantique.
- Intérêt des détentes dans l'industrie pour la liquéfaction des gaz.

**NOTES** : Leçon assez longue, certains aspects pas forcément évidents. Le jury demande d'insister sur le domaine de validité de l'équipartition, la différence entre température cinétique et température absolue, et de parler d'effets quantiques.

# Premier principe de la thermodynamique

**OBJECTIF** – Comprendre le premier principe de la thermodynamique, ses principales applications et ses limitations.

**NIVEAU** – Première année de CP

**PRÉ-REQUIS :**

- Énergie interne
- Cinétique des gaz
- Gaz parfait, gaz réels
- Énergétique du point matériel et des systèmes de points
- Capacités thermiques

## Bibliographie

- [1] L. Dettwiller. Création de chaleur et échanges énergétiques. application à l'étude thermodynamique du contact de deux solides avec frottement et de l'effet joule. *BUP*, 775, 1995.
- [2] B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, and B. Roulet. *Thermodynamique*. Hermann, 2007.
- [3] J. Pérez, É. Bellanger, X. Ducros, V. Renvoizé, and P. Roux. *Physique MPSI-PCSI-PTSI*. Cap prépa – Pearson, 2009.
- [4] M. N. Sanz, A. E. Badel, and F. Clausset. *Tout-en-un MPSI-PCSI-PTSI*. Dunod, 2008.

## Introduction

- On part de la mécanique : intérêt de la description énergétique d'un système. Notion d'énergie mécanique fondamentale, notamment en mécanique céleste.
- Étude de la cinétique des gaz, notion d'énergie interne.

## 1 De la mécanique à la thermodynamique

### 1.1 Insuffisance de la description macroscopique [3, 4, 1]

**EXPÉRIENCE** – Lancer un livre sur la table. Il s'arrête.

- En mécanique, on a une force de frottement qui exprime la dissipation d'énergie.
- Où est passée cette énergie : dans la Terre, dans la table ? Sous quelle forme ?

### 1.2 Énoncé du premier principe [2, 4]

- Énoncer proprement et complètement le premier principe. Différencier la fonction d'état  $U$  de  $W$  et  $Q$ . Conventions.

### 1.3 Justification microscopique du premier principe [3]

- Définition du système fermé. Énergies cinétiques macro- et microscopique. Théorème de l'énergie cinétique. Énergies potentielles macro- et microscopique. Identification de  $W$ ,  $Q$ ,  $U$  et  $E_m$ . Conclusion.

### 1.4 Discussion sur l'énergie interne, le travail et la chaleur [3]

- Premier principe, équivalence entre chaleur et travail. Expérience historique de Joule avec lien entre  $Mgz$  et  $Q$ .

**EXPÉRIENCE** – On montre l'expérience de Joule avec un moteur, que l'on aura lancé un peu avant. On constate une élévation de température due à l'apport de travail. Difficile de faire le lien avec la puissance du moteur et le temps de fonctionnement.

- Conversion calorie-joule.
- Extensivité de l'énergie interne. Ordres de grandeur qui justifie ce fait.

## 2 Applications à l'étude de transformations élémentaires [3, 4]

### 2.1 Calorimétrie (si le temps)

- Faire un petit calcul simple de calorimétrie.

EXPÉRIENCE – Illustration expérimentale.

### 2.2 Travail des forces de pression

- Calcul dans le cas d'une transformation monobare, dans le cas d'un piston.
- Cas isobare, isochore.
- Généralisation dans un cas quasi-statique. Interprétation géométrique dans le diagramme de Clapeyron.

### 2.3 Deux modèles de compression d'un gaz parfait (facultatif)

- Cas isotherme : définition et conséquences. Travail et chaleur.
- Cas adiabatique. Lois de Laplace. Travail et énergie interne.

## 3 Intérêt et limite du premier principe

### 3.1 Détente de Joule-Gay Lussac

- Principe. Étude. Conservation de l'énergie interne.
- Cas d'un gaz parfait : détente isotherme.
- Baisse de la température : gaz de Van der Waals. Intérêt fondamental (nature attractive des forces intermoléculaires) et industriel.

### 3.2 Moteur de Stirling

EXPÉRIENCE – Allumer la flamme au préalable. Mettre en route le moteur et tracer le cycle.

- Expliquer le principe du moteur, sa modélisation. Calculer les travaux puis le rendement.
- Limite du modèle : cycle réel. Quelques ordres de grandeur.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- On ouvre sur les limites du premier principe : sens des transformations non prévu. Nécessité d'un second principe.

NOTES : Être assez rigoureux, dans la formulation du premier principe en particulier (!). Ne pas passer trop de temps sur la première partie (vingt minutes maximum).

# Évolution et condition d'équilibre d'un système thermodynamique fermé

OBJECTIF – Introduire la notion de potentiel thermodynamique pour prédire l'évolution et l'équilibre d'un système thermodynamique, et étudier l'importance des conditions extérieures aux systèmes.

NIVEAU – Deuxième année de CP

PRÉ-REQUIS :

- Principes de la thermodynamique
- Notions de fonction d'état, de variable naturelle

## Bibliographie

- [1] N. Choimet. *Thermodynamique PC-PSI*. Les nouveaux précis Bréal, 2004.
- [2] B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, and B. Roulet. *Thermodynamique*. Hermann, 2007.
- [3] S. Olivier. *Physique PC-PC\**. Tec&Doc, 2009.
- [4] M. N. Sanz and B. Salamito. *Tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2009.

## Introduction [2]

- Rappel des principes de la thermodynamique à l'oral.
- Système isolé : l'entropie augmente. Qu'en est-il des systèmes non isolés ?
- Définition d'un système fermé. On s'y limite.

## 1 Potentiels thermodynamiques [3, 1]

### 1.1 Analogie mécanique

- Cuvette : pas d'évolution si il y a équilibre à l'état initial. Évolution sinon.
- Transposer cette notion en thermodynamique.
- Deux types de variables : les variables internes (ici  $z$ , l'altitude) et les paramètres de contrôle (forme de la cuvette,  $\vec{g}$ , etc.)

### 1.2 Retour sur le système isolé

- Condition d'évolution. Négentropie. Potentiel thermodynamique.
- Limites de l'analogie mécanique (effet d'inertie).

### 1.3 Généralisation [4]

- Définition d'un potentiel thermodynamique. Exemple du système isolé.

## 2 Évolution monotherme d'un système [4]

### 2.1 Condition d'évolution et travail maximal récupérable

- Évolution monotherme. Principes de la thermodynamique.  $F^*$ . Travail maximal récupérable.

### 2.2 Cas d'une évolution isochore

- Cas isochore et  $W' = 0$  (travaux autres que les forces de pression).  $F^*$  est un potentiel thermodynamique. Exemple du fer chaud dans le lac.

### 3 Système en contact avec un thermostat et un pressostat

#### 3.1 Condition d'évolution et travail maximal récupérable [4]

- On décompose  $W$ . Introduction de  $G^*$ . Travail maximal récupérable. Application à la bouteille d'air comprimé.
- Cas en l'absence d'autres travaux :  $G^*$  est un potentiel thermodynamique.

#### 3.2 Application à la loi de Laplace [1, 4]

- Démontrer la loi de Laplace.
- Double interface dans le cas de bulles. Calcul de  $G^*$ . États d'équilibre instable et stable.

EXPÉRIENCE – Mise en contact des deux bulles.

### 4 Évolution isotherme d'un système

#### 4.1 Condition d'évolution [4]

- Passer très vite sur les calculs. Introduire  $F$  et  $G$  et les travaux maximaux récupérables. Fonctions d'état.

#### 4.2 Application à un système thermodynamique [3]

- Système en rotation autour d'un axe avec piston séparant deux parties.
- Établissement du potentiel thermodynamique. Allure du potentiel.
- Positions d'équilibre stable et instable.

### Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Corps pur sous plusieurs phases et potentiel chimique.

NOTES : Être très rigoureux dans la définition des fonctions thermodynamiques et des variables et paramètres de ces dernières (lire les premières pages du DGLR de thermo). Ne pas faire des calculs trop répétitifs.

LP 13

## Application des deux premiers principes de la thermodynamique au fonctionnement des machines thermiques

OBJECTIF – Appliquer les premiers principes de la thermodynamique à deux machines thermiques.

NIVEAU – Première année de CP

PRÉ-REQUIS :

- Principes de la thermodynamique
- Changements d'état du corps pur

### Bibliographie

- [1] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Thermodynamique*. Dunod, 1989.
- [2] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Thermodynamique MPSI-PCSI-PTSI*. Hachette, 2004.
- [3] D. Genevoix. Le moteur stirling. *BUP*, 832, 2001.
- [4] H. Gié and S. Olivier. *Thermodynamique*. Tec&Doc, 1998.
- [5] F. Martin. Le réfrigérateur. *BUP*, 832, 2001.
- [6] C Ray and J. C. Poizat. *La physique par les objets du quotidien*. Belin – Pour la science, 2013.
- [7] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

### Introduction [7, 1, 2]

- Intérêt pratique de la conversion de chaleur.
- Importance historique dans la construction de la thermodynamique.
- Définition d'une machine thermique.

## 1 Généralités sur les machines thermiques

### 1.1 Fonctionnement cyclique [1]

- Rappel des deux premiers principes de la thermodynamique.
- Application au fonctionnement des machines cycliques.
- Inégalité de Clausius.

### 1.2 Impossibilité d'un moteur monotherme [1]

- Démonstration de ce fait.

### 1.3 Machines dithermes, diagramme de Raveau [1, 2]

- Définition des sources froides, sources chaudes. Diagramme de Raveau. Trois types de machines utiles.

### 1.4 Rendement des machines dithermes [2]

- Pour les trois types : efficacité, cas réversible, ordres de grandeur.

## 2 Étude d'un cycle moteur : le cycle de Stirling [3, 4]

### 2.1 Principe général et fonctionnement

- Bien prendre le temps d'expliquer les différentes étapes du fonctionnement avec des schémas sur transparent.

EXPÉRIENCE – Montrer sur le moteur Stirling les étapes.

### 2.2 Modèle d'étude

- Après l'avoir amené, calculer  $W$ ,  $Q$ , et  $\Delta U$  pour chaque étape. Conclusion sur le travail fourni par le moteur sur un cycle. Rendement. Application numérique.

EXPÉRIENCE – Mettre en route le moteur de Stirling. Obtenir le cycle, la puissance du moteur.

### 2.3 Limite du modèle, cycle réel

- Expliquer sur le modèle les différentes sources de perte.
- Cycle réel. Compromis puissance-efficacité.

## 3 Machine frigorifique [5, 4, 6]

### 3.1 Principe

- Avantage de la machine à changement d'état. Description de chaque étape. Choix du fluide frigorigène.

### 3.2 Description du cycle

- Calcul de  $\Delta H$ . Énergie utile et énergie qui coûte. Diagramme de Mollier. Construction du cycle.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur d'autres cycles moteurs, sur d'autres types de conversion (élec/méca, etc.)
- Importance au quotidien.

NOTES : Bien passer du temps sur la description des machines thermiques pratiques, discuter l'aspect industriel.

# Étude thermodynamique d'un système constitué par un corps pur sous plusieurs phases

**OBJECTIF** – Comprendre l'aspect thermodynamique des changements d'état et en voir quelques conséquences.

**NIVEAU** – Deuxième année de CP

**PRÉ-REQUIS :**

- Étude descriptive des changements d'état
- Potentiels thermodynamiques
- Fonctions caractéristiques
- Tension de surface
- Gaz de Van der Waals

## Bibliographie

- [1] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Thermodynamique*. Dunod, 1989.
- [2] N. Choimet. *Thermodynamique PC-PSI*. Les nouveaux précis Bréal, 2004.
- [3] B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, and B. Roulet. *Thermodynamique*. Hermann, 2007.
- [4] B. Latour. *Leçons de thermodynamique*. Ellipses, 1997.
- [5] J. Pérez, É. Bellanger, X. Ducros, V. Renvoizé, and P. Roux. *Physique MPSI-PCSI-PTSI*. Cap prépa – Pearson, 2009.
- [6] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

## Introduction [2, 5, 3]

- On connaît les phases de l'eau, les changements d'état.
- Il existe d'autres transitions de phase : variétés allotropiques, transition ferro/para.
- Compléter l'étude descriptive réalisée en PC-PSI par une étude thermodynamique.

## 1 Évolution et équilibre d'un corps pur polyphasé [2, 3]

### 1.1 Choix du potentiel thermodynamique

- Description et définition précise du système. Paramètres de contrôle et variables internes.

### 1.2 Condition d'équilibre et d'évolution entre deux phases

- Condition d'équilibre. Remarque sur  $P = f(T)$ . Explication en terme de compétition enthalpie/entropie.
- Remarque sur l'équilibre triphasé.
- Condition d'évolution.
- Cas de l'équilibre liquide-vapeur.

### 1.3 Chaleur latente de changement d'état [5]

- Propriétés des transitions de phase du premier ordre. Définition. Relation avec l'entropie de changement d'état. Ordres de grandeur. Application à la transpiration.

## 2 Diagramme de phase pour une transition du premier ordre [2, 3]

### 2.1 Formule de Clapeyron et diagramme $(P, T)$ [4]

- Démonstration. Conséquence sur le diagramme  $(P, T)$ .

- Faire bouillir de l'eau au sommet du Mont Blanc. Lyophilisation.

EXPÉRIENCE – Bouillant de Franklin.

## 2.2 Diagramme $(P, V)$ [3, 1]

- Équation de Van der Waals.  $\chi_T > 0$  d'où la construction de Maxwell.
- Allure des isothermes. Stockage des fluides.
- Point critique. Divergence de  $\chi_T$ . Opalescence critique.

EXPÉRIENCE – Tracé des isothermes de  $SF_6$ .

## 3 Retard aux transitions de phases [3, 5, 6]

EXPÉRIENCE – Surfusion de l'eau ou de l'étain.

- Expliquer qualitativement.
- Expliquer quantitativement en terme de compétition avec la tension de surface (expression du potentiel thermodynamique).
- Formation des nuages, pierre ponce, pluie verglacante, lac Ladoga.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur les transitions de phases du second ordre.

NOTES : Le jury ne veut pas une étude descriptive, mais une étude thermodynamique précise et rigoureuse. Présenter des ordres de grandeur.

# Étude statistique d'un système en contact avec un thermostat. Probabilité canonique

OBJECTIF – Partir du modèle de l'atmosphère isotherme pour construire un formalisme d'étude des systèmes en contact avec un thermostat.

NIVEAU – L3

PRÉ-REQUIS :

- Atmosphère isotherme
- Distribution microcanonique
- Oscillateur harmonique quantique
- Thermodynamique

## Bibliographie

- [1] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Thermodynamique*. Dunod, 1989.
- [2] B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, and B. Roulet. *Physique statistique*. Hermann, 2001.
- [3] C. Ngô and H. Ngô. *Physique statistique : introduction*. Dunod, 2008.
- [4] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

## Introduction

- Mécanique statistique de Boltzmann : lier les comportements macroscopiques aux comportements microscopiques. Traitement statistique à confronter à l'expérience.
- On a déjà vu le formalisme microcanonique.

## 1 Présentation de l'ensemble canonique

### 1.1 Modèle de l'atmosphère isotherme [1]

- Retour sur l'équilibre de l'atmosphère isotherme. Interprétation statistique et facteur de Boltzmann. Compétition.
- Généralités sur le facteur de Boltzmann.
- Insister sur le caractère isotherme.

### 1.2 Système en contact avec un thermostat [2]

- Définir proprement le système canonique. Hypothèse par rapport au thermostat.
- Probabilité d'un état. Fonction de partition. Sens physique ([4]).

### 1.3 Propriétés thermodynamiques de la fonction de partition [2]

- Énergie libre. Lien avec la thermodynamique (variables naturelles de  $F(T, V)$ ).
- Énergie moyenne, capacité calorifique.

## 2 Calcul de la fonction de partition et applications [2]

### 2.1 Factorisation de la fonction de partition [3]

- Faire la factorisation de la fonction de partition. Citer des exemples d'application.

## 2.2 Fonction de partition dans le cas classique et équipartition de l'énergie [1]

- Expression de la fonction de partition dans le cas classique. Un mot sur le domaine de validité.
- Équipartition de l'énergie. Être rigoureux sur les hypothèses.

## 2.3 Chaleur spécifique des solides

- Cas classique : loi de Dulong et Petit.
- Modèle d'Einstein. Discussion des cas limites et des erreurs.

## 3 Application à la thermodynamique des gaz [2]

### 3.1 Le gaz parfait monoatomique

- Définition du gaz parfait. Cas considéré. Modèle.
- Fonction de partition d'une particule. Énergie libre. Entropie. Loi des gaz parfaits.
- Longueur d'onde de De Broglie nécessaire pour le passage au continu.
- Passer au plus vite sur les calculs, insister sur la physique.

### 3.2 Gaz parfait diatomique

- Ce que l'on doit considérer en plus.
- Ordres de grandeur des températures de gel.
- Capacités thermiques en fonction de la température.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur les statistiques quantiques en lien avec les exemples développés, et sur l'hypothèse d'indépendance (modèles de Debye, de Sommerfeld).

NOTES : Leçon assez dense et calculatoire par nature, essayer de ne pas s'empêtrer dans des longs calculs, insister sur le sens physique. Être rigoureux.

## Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir

**OBJECTIF** – Montrer l'intérêt, les applications et les limites du modèle du corps noir et définir la notion d'équilibre thermique.

**NIVEAU** – Deuxième année de CP

**PRÉ-REQUIS :**

- Électromagnétisme et optique
- Émission/absorption, flux
- Thermodynamique

### Bibliographie

- [1] C. Aslangul. *Mécanique quantique tome 1*. De Boeck, 2007.
- [2] J. M. Donnini and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 2 : Thermodynamique et applications*. Pierron, 1997.
- [3] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Thermodynamique MP-MP\**. Hachette, 2008.
- [4] H. Gié and S. Olivier. *Thermodynamique*. Tec&Doc, 1998.
- [5] C. More and D. Augier. *Physique MP-MP\**. Tec&Doc, 2009.

### Introduction [1]

- L'expérience nous apprend qu'un corps chauffé émet un rayonnement.

**EXPÉRIENCE** – Mise en évidence.

- Exemple du fer chauffé au rouge : on connaît alors sa température.

## 1 Rayonnement d'équilibre thermique [4, 5]

### 1.1 Origine du rayonnement thermique [1]

- Particules chargées en accélération à cause de l'agitation thermique et des fluctuations. Émission d'un rayonnement.
- Quelques faits expérimentaux.

### 1.2 Interaction entre matière et rayonnement

- Phénomène d'émission, d'absorption, de réflexion et de diffusion.
- Milieu transparent. Milieu opaque.
- Flux radiatifs, conventions. Cas des milieux transparents et opaques. Définition du flux radiatif  $\varphi^R$ .

### 1.3 Rayonnement d'équilibre et équilibre thermodynamique

- Définition de l'équilibre radiatif pour un corps noir opaque.
- Définition du rayonnement d'équilibre et de l'équilibre thermodynamique. Bien distinguer les deux.
- Cas de l'équilibre thermique et radiatif. Calcul. Calcul de  $F_\lambda(\lambda, T)$  et  $F_\nu(\nu, T)$ .

## 2 Loi de Planck et conséquences [4, 5]

### 2.1 Historique [1]

- Étapes et histoire de la catastrophe UV.

- Résolution par la quantification des échanges. Loi de Planck. Explication des termes de la loi de Planck (densité de modes de vibration, énergie d'un photon, nombre de photon dans le mode).

ILLUSTRATION – Tracé des courbes sur Matlab. Courbe de Rayleigh-Jeans.

## 2.2 Loi de Wien

- Rapide calcul de dérivation. Faire le lien avec la représentation de la loi de Planck sur Matlab. Ordres de grandeur.

ILLUSTRATION – On montre ce maxima sur Matlab (condition du Gié).

## 2.3 Loi de Stefan

- Rapide calcul. Retour sur les flux émis et absorbés.

# 3 Le corps noir [4, 5]

## 3.1 Définition et réalisation pratique

- Définition et implication sur les flux.
- Un mot sur cette approximation (fenêtres d'absorption). Modèle du four.

## 3.2 Propriétés du corps noir

- Pourquoi peut-on conserver la loi de Stefan.
- Exemple du soleil.

## 3.3 Pyromètre à disparition de filament [2]

EXPÉRIENCE – Pyromètre à disparition de filament.

- Explication du principe.

# 4 Effet de serre [4, 3]

- Exercice résolu dans le H-prépa. Température avec et sans atmosphère. Conclusion.
- Intérêt aussi avec le verre (serres de culture).

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Importance pratique et historique. EIT90. Utilisation en astrophysique.

NOTES : Leçon assez difficile et rarement bien récompensée. Être très rigoureux dans la définition des flux, sur les hypothèses. Les illustrations et expériences sont appréciées du jury.

## Phénomènes de transport

**OBJECTIF** – Introduire la notion d'équilibre thermodynamique local pour étudier le phénomène de diffusion.

**NIVEAU** – Deuxième année de CP

**PRÉ-REQUIS :**

- Équilibre thermodynamique
- Conducto-convection / mécanique des fluides

### Bibliographie

- [1] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Thermodynamique*. Dunod, 1989.
- [2] N. Choimet. *Thermodynamique PC-PSI*. Les nouveaux précis Bréal, 2004.
- [3] B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, and B. Roulet. *Thermodynamique*. Hermann, 2007.
- [4] C. Garing. *Ondes mécaniques et diffusion*. Ellipses, 1998.
- [5] H. Gié and S. Olivier. *Thermodynamique*. Tec&Doc, 1998.
- [6] J. P. Mathieu, A. Kastler, and P. Fleury. *Dictionnaire de physique*. Eyrolles, 1985.

### Introduction [3]

- Jusqu'à présent, on a considéré et défini la notion d'équilibre thermodynamique. On a étudié des transformations quasi-statiques.
- Étude de phénomènes hors-équilibre particuliers.

## 1 Généralités sur les phénomènes de transport [3]

### 1.1 Position du problème [6, 5, 1]

- Définition du phénomène de transport. Ce à quoi on se restreint.
- Présentation du problème et pourquoi c'est compliqué.

### 1.2 Notion d'équilibre thermodynamique local

- Définition au début à partir de deux exemples qui dégagent l'origine et les limites de la notion. Définition générale.
- Conditions pour l'étude thermodynamique d'un processus irréversible.

### 1.3 Grandeurs conservées et flux [5]

- Exemples de grandeurs conservées au cours d'un phénomène de transport.
- Équations de conservation. Nature des flux. Équation locale de conservation.

### 1.4 Exemples de phénomènes [2]

- Pour chaque quantité transportée : équation de conservation, cause du transport. Tableau récapitulatif.

**EXPÉRIENCE** – Diffusion du glycérol. Conductisquepe. Écoulement de Couette cylindrique.

## 2 Étude d'un phénomène de diffusion : la conduction thermique [3]

### 2.1 Phénomènes de transport de l'énergie interne

- Définir le rayonnement, la convection et la diffusion. Ici, on se limite à la diffusion.

## 2.2 Loi de Fourier [1]

- Expression de la loi phénoménologique de Fourier. Cadre. Signe du coefficient de diffusion.
- Théorie microscopique. Calcul du coefficient de diffusion pour un gaz parfait.
- Ordres de grandeur rapides.

## 2.3 Équation de la diffusion et propriétés [2, 4]

- Établissement de l'équation de conservation. Équation de la diffusion.
- Évolution en  $\sqrt{t}$  typique des phénomènes de diffusion. Ordres de grandeur détaillés.
- Linéarité.
- Irréversibilité. Calcul du taux de création d'entropie dans une barre.
- Retour sur le tableau récapitulatif des phénomènes de transport, complété.

# 3 Applications

## 3.1 Résistance thermique et isolation [2]

- Résolution de l'équation de la diffusion stationnaire. Résistance thermique et analogie électrique.
- Bilan thermique d'un studio.

## 3.2 Sensation de chaud [4]

- Expliquer et définir la notion d'effusivité.

# Conclusion

- Résumé précis de idées fortes (ETL, irréversibilité, quantité conservée).
- Dans une prochaine leçon : diffusion de matière.
- Ouverture sur le couplage de phénomènes de transport, les relations d'Onsager.
- Importance pratique de la diffusion (ex : dopage des SC).

NOTES : On peut préparer un exemple de plus pour ajuster au temps restant. Les illustrations expérimentales doivent bien mettre en évidence ce dont on parle.

## Flux conductifs, convectifs, radiatifs, bilans thermiques

**OBJECTIF** – Comprendre l'origine des flux thermiques, leur mécanismes et les ordres de grandeur associés.

**NIVEAU** – Deuxième année de CP

**PRÉ-REQUIS :**

- Thermodynamique
- Rayonnement du corps noir
- Notion de mécanique des fluides
- Diffusion de particules

### Bibliographie

- [1] B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, and B. Roulet. *Thermodynamique*. Hermann, 2007.
- [2] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Thermodynamique MP-MP\**. Hachette, 2008.
- [3] H. Gié and S. Olivier. *Thermodynamique*. Tec&Doc, 1998.
- [4] J. P. Pérez. *Thermodynamique, fondements et applications*. Dunod, 2001.
- [5] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PC-PC\**. Cap prépa – Pearson, 2010.
- [6] M. N. Sanz and B. Salamito. *Tout-en-un MP-MP\**. Dunod, 2009.

### Introduction

- Phénomènes thermiques omniprésents dans notre quotidien (fenêtres, cuillère dans une tasse de café, météo, etc.). Importance dans les enjeux actuels.
- Étude de plusieurs effets, application à un capteur solaire.

## 1 Rayonnement du corps noir [2, 3]

### 1.1 Transmission d'énergie par rayonnement

- Exemples de transferts thermiques. Flux, flux surfacique et flux surfacique spectral.
- Rayonnement thermique, rayonnement d'équilibre.

### 1.2 Corps noir

- Rayonnement d'équilibre. Rappels des grandes lignes du modèle, des principales hypothèses.
- Loi de déplacement de Wien. Loi de Stefan.

**EXPÉRIENCE** – Vérification de la loi de Stefan.

### 1.3 Application au capteur solaire [6, 4]

- Présenter l'expression du flux solaire incident, et de la température.

## 2 Flux conductifs : la diffusion thermique [6]

### 2.1 Bilans thermiques, vecteur densité de courant thermique

- Flux thermiques. Vecteur densité de courant thermique.
- Réaliser le bilan local d'énergie dans le cas général. Premier principe. Expression finale du bilan.
- Faire le bilan très proprement (c'est dans le titre).

## 2.2 Loi de Fourier et équation de la chaleur [1]

- Énoncé de la loi de Fourier. Parler un peu de sa validité. Ordres de grandeur. Irréversibilité.
- Établir l'équation de la chaleur. Temps caractéristiques. Ordres de grandeur.

## 2.3 Cas unidimensionnel et stationnaire – Résistance thermique

- Résolution de l'équation de la chaleur. Résistance thermique. Calcul entre deux plans parallèles.
- Associations.

## 2.4 Application au capteur solaire

- La plaque métallique se comporte comme une résistance thermique.

# 3 Flux convectifs – Cas des flux conducto-convectifs

## 3.1 Échanges thermiques par convection [6, 2, 5]

EXPÉRIENCE – Tube en U avec sciure.

- Définition de la convection. Équation de la chaleur avec dérivée particulière.
- Convection naturelle et convection forcée.

## 3.2 Loi de Newton [6, 5]

- Donner la loi phénoménologique de Newton. Expliquer. Ordres de grandeur.

## 3.3 Application au capteur solaire [6, 2]

- Le transfert du métal au fluide se fait par conducto-convection. Température du fluide en sortie. Rendement.

## Conclusion

- Résumé. Importance pratique et industrielle.
- Convection très simplifiée. Phénomènes plus complexes.

NOTES : L'étude du chauffe-eau sert de fil rouge à la leçon. L'essentiel est dans [6] mais des détails superflus pour la compréhension (laine de verre) sont ajoutés. Être rigoureux dans l'établissement des bilans.

## Conversion de puissance électromécanique

**OBJECTIF** – Comprendre les principes et caractéristiques de la conversion électromécanique : réversibilité, rendement.

**NIVEAU** – Deuxième année de CP

**PRÉ-REQUIS :**

- Induction électromagnétique
- Magnétisme
- Mécanique du solide

### Bibliographie

- [1] Brébec J. M. et al. *H-prépa, Électronique II PSI*. Hachette, 1997.
- [2] M. N. Sanz, B. Salamito, S. Corbel, A. E. Badel, and S. Cardini. *Tout-en-un PSI-PSI\**. Dunod, 2009.
- [3] C. H. Vigouroux. Actualisation des connaissances sur les moteurs électriques. *BUP*, 846, 2002.
- [4] T. Wildi and G. Sybille. *Électrotechnique*. De boeck, 2005.

### Introduction

- Conversion de puissance électro-mécanique : très courant dans le quotidien comme dans l'industrie.
- Réversibilité dynamo/moteur.
- Lois de l'induction.

## 1 Principe de la conversion électromécanique [2, 1]

### 1.1 Rails de Laplace en fonctionnement générateur

**EXPÉRIENCE** – Rails de Laplace en fonctionnement générateur.

- Présentation du principe des rails de Laplace. Définitions des grandeurs.
- Mode générateur. Calcul de la force électromotrice d'induction, de l'intensité.
- Puissance des forces de Laplace et puissance électrique. Rendement maximal théorique égal à 1.
- Puissance Joule et de frottement. Bilan de puissance de la conversion électromécanique.

### 1.2 Fonctionnement moteur

**EXPÉRIENCE** – Rails de Laplace en générateur.

- Description succincte. Calcul rapide des puissances et bilan de puissance de la conversion.
- Bilan du principe de la conversion : rendement, réversibilité, origine de la conversion.

## 2 La machine à courant continu [2, 1]

### 2.1 Structure et principe [4]

- Stator et rotor. Constitution. Exigences. Pôles magnétiques. Système de balais-collecteur. Schéma détaillé.
- Champ magnétique pour une machine à courant continu idéale.
- Nécessité du système balais-collecteur. Redresseur mécanique.

## 2.2 Équations de fonctionnement

- Calcul du couple électromécanique. Résultante des forces de Laplace nulle. Relation  $\Gamma = k\phi I$ .
- Force électromotrice d'induction. Relation  $e = -k\phi\omega$ .
- Fonctionnement moteur et générateur.

## 2.3 Le moteur à excitation indépendante [4, 3]

- Équation électrique avec inductance et résistance. Vitesse du rotor.
- Démarrage du moteur et rhéostat de démarrage. Rampe de tension.
- Point de fonctionnement du moteur.
- Rendement du moteur et source des pertes : Joule, collective (Foucault, hystérésis) et frottements. Ordres de grandeur.
- Avantages et inconvénients de la MCC. Utilisations.

## 3 Machines à champ tournant [2, 1, 4, 3]

### 3.1 Production d'un champ tournant

- Définition d'un champ tournant. Aimant en rotation : absurde!
- Bobines triphasées. Valable pour  $n \geq 3$ . Théorème de Ferraris.

EXPÉRIENCE – Machine synchrone.

### 3.2 Machine synchrone

- Principe de fonctionnement. Couple. Vitesse de synchronisme.
- Fonctionnements moteur et générateur.
- Démarrage du moteur : nécessité de la mise en rotation.
- Fonctionnement en régime permanent.
- Avantages et inconvénients. Utilisation.

### 3.3 Machine asynchrone

- Description et principe de fonctionnement.

EXPÉRIENCE – Cage à écureuil.

- Description électrique : intensité. Description mécanique : couple. Glissement.
- Comportement générateur et moteur.
- Avantages et inconvénients. Utilisation.

## Conclusion

- Résumé précis.
- Tableau récapitulatif. Beaucoup d'applications.
- Autres moyens de conversion (capteur piézoélectrique, haut-parleur).

NOTES : Leçon reprise en grande partie sur celle de la promo 2013. [2] est très complet.

# Induction électromagnétique

**OBJECTIF** – Trouver un cadre théorique aux observations expérimentales et en voir les conséquences.

**NIVEAU** – Deuxième année de CP

**PRÉ-REQUIS :**

- Équations de Maxwell, ARQS
- Électrocinétique
- Mécanique
- Force de Lorentz

## Bibliographie

- [1] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Électromagnétisme III : Magnétostatique, induction, équations de Maxwell et compléments d'électronique*. Dunod, 1991.
- [2] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Électromagnétisme PC-PSI*. Hachette, 1999.
- [3] C. Garing. *Magnétisme : statique, induction et milieux*. Ellipses, 1999.
- [4] H. Gié and J. P. Sarmant. *Électromagnétisme 2ème année*. Tec&Doc, 1996.
- [5] C Ray and J. C. Poizat. *La physique par les objets du quotidien*. Belin – Pour la science, 2013.
- [6] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PC-PC\**. Cap prépa – Pearson, 2010.
- [7] M. N. Sanz and B. Salamito. *Tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2009.
- [8] M. N. Sanz, B. Salamito, S. Corbel, A. E. Badel, and S. Cardini. *Tout-en-un PSI-PSI\**. Dunod, 2009.

## Introduction [7]

- Cadre historique et origine de l'induction électromagnétique.

**EXPÉRIENCE** – On refait les expériences historiques de Faraday. Tressautement quand on bouge une des bobines par rapport à l'autre. Mouvement d'un aimant dans une bobine.

- Constat expérimental de la loi de Lenz.

## 1 Le phénomène d'induction

### 1.1 Notion de force électromotrice [7, 4]

- Loi expérimentale de Faraday.
- Explication par la force de Lorentz :  $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ .

### 1.2 Induction dans un circuit rigide [1, 4, 6]

#### Cas général

- Démonstration du cas général.

**COMPLÉMENT** : On considère l'évolution de la surface  $S(t)$  en translation à la vitesse  $\vec{v}_e$ . Le contour  $\mathcal{C}(t)$  encadre  $S(t)$ , le contour  $\mathcal{C}(t + dt)$  encadre  $S(t + dt)$ .

On écrit d'abord l'équation de Maxwell-Thompson :

$$\oiint_S \vec{B}(\vec{r}, t) d\vec{S} = 0$$

En particulier :

$$-\iint_{S(t)} \vec{B}(\vec{r}, t + dt) \vec{n} dS + \iint_{S(t+dt)} \vec{B}(\vec{r}, t + dt) \vec{n} dS + \iint_{S_{\text{lat}}} \vec{B}(\vec{r}, t + dt) \vec{n}_{\text{lat}} dS = 0$$

Or :

$$\iint_{S_{\text{lat}}} \vec{n}_{\text{lat}} dS = \int_{\mathcal{C}(t)} \vec{dl} \times \vec{v}_e dt$$

Donc :

$$\begin{aligned} \iint_{S(t+dt)} \vec{B}(\vec{r}, t + dt) \vec{n} dS - \iint_{S(t)} \vec{B}(\vec{r}, t + dt) \vec{n} dS &= - \int_{\mathcal{C}(t)} (\vec{dl} \times \vec{v}_e) \cdot \vec{B}(\vec{r}, t + dt) dt \\ &= - \int_{\mathcal{C}(t)} (\vec{v}_e \times \vec{B}(\vec{r}, t + dt)) \cdot \vec{dl} dt \end{aligned}$$

D'après les propriétés du produit mixte. Exprimons maintenant la variation pendant  $dt$  du flux du champ magnétique à travers la surface variable  $S(t)$  :

$$\begin{aligned} d\phi &= \phi(t + dt) - \phi(t) \\ &= \iint_{S(t+dt)} \vec{B}(\vec{r}, t + dt) \vec{n} dS - \iint_{S(t)} \vec{B}(\vec{r}, t) \vec{n} dS \\ &= \iint_{S(t+dt)} \vec{B}(\vec{r}, t + dt) \vec{n} dS - \iint_{S(t)} \vec{B}(\vec{r}, t) \vec{n} dS - \iint_{S(t)} \vec{B}(\vec{r}, t + dt) \vec{n} dS - \iint_{S(t)} \vec{B}(\vec{r}, t + dt) \vec{n} dS - \iint_{S(t)} \vec{B}(\vec{r}, t) \vec{n} dS \\ &= - \int_{\mathcal{C}(t)} (\vec{v}_e \times \vec{B}(\vec{r}, t + dt)) \cdot \vec{dl} dt + \iint_{S(t)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}(\vec{r}, t) dt \vec{n} dS \\ &= - \int_{\mathcal{C}(t)} (\vec{v}_e \times \vec{B}(\vec{r}, t)) \cdot \vec{dl} dt + O(dt^2) + \iint_{S(t)} \text{rot} \left[ \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}(\vec{r}, t) \right] dt \vec{n} dS \\ &= - \int_{\mathcal{C}(t)} (\vec{v}_e \times \vec{B}(\vec{r}, t)) \cdot \vec{dl} dt + O(dt^2) + \int_{\mathcal{C}(t)} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}(\vec{r}, t) dt \vec{dl} \end{aligned}$$

**Conclusion :**

$$e(t) = - \frac{d\phi}{dt}(t) = - \oint_{\mathcal{C}(t)} \left( - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{v}_e \times \vec{B} \right) \cdot \vec{dl}$$

C'est la formule de la force électromotrice.

## Cas de Neumann

- Cas particulier de Neumann. Loi de Lenz.
- Explication qualitative des courants de Foucault (pas de calcul).

## Cas de Lorentz

- Cas particulier de Lorentz.

## 2 Génération de courants induits [7]

### 2.1 Induction, autoinduction

- Inductance mutuelle de deux circuits. Définition. Propriétés. Équations électriques. Schémas correspondants.
- Cas de deux circuits couplés. Équation différentielle. Bilan énergétique. Définition du coefficient de couplage.

### 2.2 Application au transformateur

**EXPÉRIENCE – Montrer le fonctionnement idéal.**

- Calcul du transformateur parfait.
- Limites : courants de Foucault, pertes par hystérésis, par perte de flux. Solutions.

### 2.3 Courants de Foucault [5, 3]

- Limites du transformateur. Intérêt : chauffage par induction, freinage. Rester qualitatif.

EXPÉRIENCE – Aimant dans un tube, dans un tube scié.

### 3 Conversion électromécanique [8]

#### 3.1 Loi de Laplace [6]

- Présentation du dispositif. Équation électrique. Équation mécanique. Résolution. Bilan de puissance.
- Deux modes de fonctionnement : générateur ou dynamo.
- Lien avec la conversion électromécanique.

EXPÉRIENCE – Rails de Laplace. Deux modes de fonctionnement.

#### 3.2 Le haut-parleur [2]

- Schéma de principe avec description qualitative de la membrane vibrante.
- Équation mécanique. Équation électrique. Bilan énergétique.
- Étude en régime sinusoïdal forcé. Impédance de sortie. Rendement. Graphique en fonction de la fréquence.

### Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur les moteurs, en particulier la MCC et le moteur asynchrone.

NOTES : Faire extrêmement attention aux conventions de signe ! Se limiter à des applications simples.



## Résonance magnétique nucléaire

OBJECTIF – Comprendre comment sont mises à profit les propriétés du magnétisme microscopique pour connaître la structure moléculaire.

NIVEAU – L3

PRÉ-REQUIS :

- Mécanique quantique (formalisme, moment cinétique, spin)
- Électromagnétisme (dipôle, interactions)
- Physique statistique (facteur de Boltzmann)

### Bibliographie

- [1] P. Atkins and J. De Paula. *Chimie physique*. De Boeck, 2008.
- [2] J. Barthes and P. Langlois. Rmn macroscopique. *BUP*, 947, 2012.
- [3] J. L. Basdevant and J. Dalibard. *Mécanique quantique*. Éditions de l'école polytechnique, 2013.
- [4] C. Cohen-Tanoudji, B. Diu, and F. Laloë. *Mécanique quantique tome 1*. Hermann, 1995.
- [5] C. Garing. *Milieus magnétiques*. Ellipses, 1995.
- [6] N. Platzter and L. Dallery. Résonance magnétique nucléaire - aspects théoriques. *Techniques de l'ingénieur*, 2006.
- [7] J. C. Roussel. Spectrométrie par résonance magnétique nucléaire. *Techniques de l'ingénieur*, 1996.

### Introduction [7, 1]

- En 1924, Pauli attribue des propriétés magnétiques à l'électron. En 1933, Stern et Gerlach mesurent le moment magnétique de l'électron à 10 % près. Rabi améliore ensuite la mesure en utilisant la propriété de résonance.
- Beaucoup d'améliorations technologiques depuis qui permettent une utilisation pratique de la RMN aujourd'hui.

## 1 Action d'un champ magnétique sur un moment magnétique [4, 7, 6]

### 1.1 Dipôle magnétique [3]

- Énergie d'interaction dipôle-champ. Relation entre dipôle et moment cinétique de spin : rapport gyromagnétique. Effet Zeeman. Peuplement.
- Ordres de grandeur de  $\Delta E$  pour  $^1H$  et différences de population. Nécessité d'une forte sensibilité.

### 1.2 Approche classique

- Action du champ magnétique constant. Précession de Larmor.
- Influence d'un champ tournant et champ effectif.

### 1.3 Approche quantique [3]

- Vecteur d'onde quelconque. Hamiltonien et évolution temporelle.
- Passage dans le repère tournant. Probabilité de transition et résonance.
- Lien entre le traitement classique et le traitement quantique.

### 1.4 Échelle macroscopique [5]

- Aimantation totale en fonction de  $\vec{B}_0$ . Ordres de grandeur.
- Relaxation longitudinale et transversale (qualitatif). Relaxations spin-spin et spin-réseau.

## 2 Aspects technologiques et principe de la RMN [7, 1]

### 2.1 Spectroscopie par RMN [3, 2]

- Appareillage. Électroaimant, émetteur de champ tournant et récepteur.

EXPÉRIENCE – On montre les constituants sur la modélisation.

- Techniques de détection de la résonance : historique, problème. Techniques modernes. Exemples de spectres d'évolution libre et transformée de Fourier. Facteur de qualité.
- Analyse de la structure des molécules : interaction dipôle-dipôle, H équivalents, couplage, multiplets, déplacement chimique.
- Analyse d'un spectre.

### 2.2 Imagerie par RMN

- Utilisation de la RMN en médecine. Principe et phénomènes utilisés. Importance.
- Amplitude de la résonance des hydrogènes dans les tissus.

## Conclusion

- Rappeler les principes utilisés, l'intérêt de la RMN.
- Ouverture.

NOTES : Leçon testée en fin d'année, de longueur correcte, assez difficile. Parler de facteur de qualité de la résonance.

## Rétroaction et oscillations

OBJECTIF – Comprendre les principales applications de la rétroaction et les cas limites (oscillations quasi-sinusoïdales et de relaxation).

NIVEAU – L3

PRÉ-REQUIS :

- Asservissement et systèmes bouclés
- Électronique
- Émission stimulée

### Bibliographie

- [1] P. Brenders, G. Buffard, L. Douchet, M. Sauzeix, and Tisserant S. *Électronique PSI*. Les nouveaux précis Bréal, 2005.
- [2] R. Farcy. Analogie oscillateur électrique-laser. *BUP*, 721, 1990.
- [3] M. Krob. *Électronique expérimentale*. Ellipses, 2002.
- [4] J. P. Pérez. *Mécanique, fondements et applications*. Dunod, 2001.
- [5] M. N. Sanz and B. Salamito. *Tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2009.
- [6] M. Soutif. *Vibrations, propagation, diffusion*. Dunod, 1978.
- [7] S. H. Strogatz. *Nonlinear dynamics and chaos*. Westview Press, 1994.
- [8] R. Taillet. *Optique physique*. De boeck, 2006.
- [9] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

### Introduction [9, 1, 3]

- Définition de la rétroaction.
- Rappel des définitions de la transmittance et du critère de stabilité.
- Investir ces notions sur l'étude d'un système faisant intervenir une rétroaction.

## 1 Oscillateurs quasi-sinusoïdaux

### 1.1 Généralités – Condition de Barkhausen [1, 3]

- Définition d'un oscillateur quasi-sinusoïdal. Éléments structurels.
- Fonction de transfert d'un système linéaire à réaction négative et positive. Structure de boucle fermée. Nécessité du second ordre.
- Conditions de naissance des oscillations. Condition de Barkhausen.

### 1.2 Cas de l'oscillateur à pont de Wien [1, 3]

- Fonction de transfert du filtre de Wien. Chaîne d'amplification.
- Montage. Équation différentielle. Critère de démarrage des oscillations. Non-linéarités.

EXPÉRIENCE – Réalisation expérimental de l'oscillateur à pont de Wien.

### 1.3 Le laser en mode normal [8, 2]

- Laser vu comme oscillateur lumineux avec boucle de rétroaction.
- Sélection des modes par la cavité Fabry-Pérot.

EXPÉRIENCE – Laser de démonstration.

## 2 Oscillations de relaxation

### 2.1 Généralités – Exemple du vase de Tantale [4, 1, 3]

- Éléments constitutifs d'un oscillateur à relaxation.
- Exemple du vase de Tantale. Cycle en  $(D, h)$ .

### 2.2 Multivibrateur astable [1, 3]

- Étude détaillée du multivibrateur astable. Lien avec le vase de Tantale.

EXPÉRIENCE – Réalisation expérimentale. Cycle en mode XY.

### 2.3 Mouvement stick-slip (facultatif) [5]

- Résumé des étapes du calcul.
- Lien avec ce qui a été présenté précédemment.

EXPÉRIENCE – Réalisation avec manip stick-slip.

## 3 Lien entre les deux oscillateurs : exemple de l'oscillateur de Van der Pol [7, 3, 6]

### 3.1 Saturation des oscillations dans l'oscillateur de Wien

- Équation de Van der Pol. Terme dissipatif non-linéaire. Étude en régime quasi-sinusoïdal.

EXPÉRIENCE – Réalisation expérimentale. Modélisation numérique.

### 3.2 Oscillations de relaxation

- Explication avec le portrait de phase et  $x \rightarrow x^3 - x$ .

EXPÉRIENCE – Réalisation expérimentale. Modélisation numérique.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Intérêt des oscillateurs et lien entre eux.
- Richesse de l'équation de Van der Pol.

NOTES : Le jury attend une leçon dûment illustrée par des exemples. L'analyse du laser en mode système bouclé (maintenant au programme de PC) est très intéressante.

# Traitement analogique d'un signal électrique – Étude spectrale

**OBJECTIF** – Comprendre comment traiter analogiquement un signal, le filtrage et quelques opérations non-linéaires.

**NIVEAU** – Première année de CP.

**PRÉ-REQUIS :**

- Réponse indicielle d'un circuit RC et RLC
- Électrocinétique de base

## Bibliographie

- [1] P. Brenders, G. Buffard, L. Douchet, M. Sauzeix, and Tisserant S. *Électronique PSI*. Les nouveaux précis Bréal, 2005.
- [2] M. Krob. *Électronique expérimentale*. Ellipses, 2002.
- [3] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PSI-PSI\**. Cap prépa – Pearson, 2010.
- [4] M. N. Sanz, A. E. Badel, and F. Clausset. *Tout-en-un MPSI-PCSI-PTSI*. Dunod, 2008.

## Introduction

- Importance de l'électronique et du traitement du signal.

## 1 Analyse spectrale d'un signal électrique

### 1.1 Un exemple connu : le circuit RLC [4]

- Circuit. Équation différentielle pour une excitation sinusoïdale. Solution homogène et particulière. Assez fastidieux en réel.
- Définition de la notion complexe. Propriétés (module, phase). Dérivation des signaux. Intérêt.
- Résolution de l'équation en notation complexe. Phase et module.
- Définition de l'impédance.

### 1.2 Signal périodique et analyse de Fourier [1, 3]

- Justifie l'étude du RSE Définition d'un signal périodique.

**ILLUSTRATION** – Construction de signaux périodiques avec une somme de sinusoïdes.

- Généralisation. Théorèmes de décomposition. Équivalence entre Fourier et temporel. Formule de Parseval et aspect énergétique.

**EXPÉRIENCE** – Visualisation de spectres à l'oscilloscope. On retrouve ce que l'on avait vu numériquement.

## 2 Filtrage linéaire

### 2.1 Système linéaire invariant par translation temporelle [4, 1]

- Notion de quadripôle. Définition de la linéarité et de l'invariance par translation temporelle.
- Critère de stabilité.
- Définition d'un filtre et des types de filtre.

### 2.2 Filtre du premier ordre : le filtre RC [4]

- Filtre passe-bas : étude détaillée (étude asymptotique, fonction de transfert, diagrammes de Bode, caractère intégrateur).
- Filtre passe-haut : étude très rapide.

## 2.3 Filtres du second ordre [4]

- Exemple du filtre passe-bande. Facteur de qualité et bande passante.
- Intérêt supplémentaire des filtres passe-haut et passe-bas (-40 dB).
- Théorème de d'Alembert-Gauss. Intérêt de l'étude des filtres d'ordre 1 et 2.

## 2.4 Filtres actifs (facultatif) [4]

- Exemple du filtre de Butterworth. Fonction de transfert. Limitations.

# 3 Opérations non-linéaires

## 3.1 Modulation d'amplitude [4]

- Définition du signal modulant, du signal modulé. Intérêt pour le transport de l'information.
- Spectre du signal modulé.

## 3.2 Démodulation par détecteur de crête [4]

EXPÉRIENCE – Mise en oeuvre avec diode sans seuil. [2]

- Explication rapide du principe.

## 3.3 Démodulation par détection synchrone [1]

- Expliquer le principe. Illustration avec les spectres.

EXPÉRIENCE – Mise en oeuvre.

# Conclusion

- Résumé précis des idées fortes, de l'intérêt des différents montages présentés.
- Importance en traitement du signal (détection synchrone). FM.

NOTES : Garder du temps pour traiter le traitement non-linéaire. Insister sur les applications.

## Ondes progressives, ondes stationnaires

**OBJECTIF** – Voir les points communs entre plusieurs phénomènes ondulatoires, et en étudier les différents aspects.

**NIVEAU** – Deuxième année de CP.

**PRÉ-REQUIS :**

- Électrocinétique
- Mécanique du point
- Mécanique des fluides

### Bibliographie

- [1] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Ondes PC-PSI*. Hachette, 2000.
- [2] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Ondes PC-PSI*. Hachette, 2008.
- [3] C. Garing. *Ondes mécaniques et diffusion*. Ellipses, 1998.
- [4] M. N. Sanz and B. Salamito. *Tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2009.
- [5] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

### Introduction [5, 1]

- Phénomènes de propagation d'ondes : courants et très divers.
- Analogies et différences entre les phénomènes de propagation.

## 1 Quelques phénomènes de propagation

### 1.1 Ondes dans un câble coaxial [4, 2]

**EXPÉRIENCE** – Propagation d'un sinus à 1 kHz sur 100 m de câble.

- Présentation du modèle d'étude. Capacité et inductance linéiques en fonction des paramètres géométriques.
- Modèle de constantes réparties et mise en équation.
- Équation d'onde. Ordres de grandeur.

### 1.2 Ondes sur une corde vibrante [4, 2]

- Modèle et hypothèses. Notations utilisées. Schéma.
- Principe fondamental de la dynamique. Mise en équation.
- Ordres de grandeur.

### 1.3 Analogie avec d'autres phénomènes propagatifs [2]

- Tableau d'analogie avec corde vibrante, câble coaxial, ondes acoustiques dans un fluide et dans un solide.
- Grandeurs couplées, équation de couplage et viscosité.

## 2 Ondes progressives

### 2.1 Solution générale de l'équation de d'Alembert [2]

- On fait intervenir le changement de variable, dont on explicite l'intérêt physique.
- Solution générale de l'équation de d'Alembert.

## 2.2 Ondes planes progressives [4, 2]

- Définition d'une onde plane.
- Définition d'une onde progressive. Rapport avec la solution générale. Animation illustrant la propagation.

## 2.3 Impédance caractéristique [2]

- Sur l'exemple du câble coaxial : grandeurs couplées.
- Onde progressive dans l'autre sens.
- Analogie pour d'autres phénomènes propagatifs.

## 2.4 OPPH [4, 2]

- Solution de l'équation de d'Alembert. Notation complexe. Double périodicité.
- Relation de dispersion. Surface d'onde.
- Intérêt et limite du concept.

## 2.5 Aspect énergétique [1]

- Cas d'une onde progressive périodique : vitesse de propagation. Cas général et bilan d'énergie.

# 3 Ondes stationnaires

## 3.1 Corde de Melde [2, 3]

**EXPÉRIENCE** – Corde de Melde. Différents modes en oscillations forcées.

- Recherche d'une solution  $F(x)G(t)$ . Influence des conditions aux limites. Expression générale. Modes propres.
- Corde frappée et corde pincée. Harmoniques.

## 3.2 Énergie des modes [1, 3]

- Énergie linéique de la corde pour chaque mode. Énergie totale.
- Constance de l'énergie de chaque mode.
- Cas général. Énergie de tous les modes.
- Application au piano et au clavecin.

## 3.3 Oscillations forcées et résonance [4]

- Retour sur le dispositif expérimental. Solution générale.
- Conséquences.

# Conclusion

- Généralité de l'équation de d'Alembert. Deux cas limites.
- Ouverture sur les phénomènes de dispersion et d'atténuation.

**NOTES** : Leçon assez simple, faire attention tout de même !

# Ondes acoustiques

**OBJECTIF** – Comprendre la propagation des ondes acoustiques, étudier les différents types, les phénomènes de réflexion et de transmission.

**NIVEAU** – Deuxième année de CP

**PRÉ-REQUIS :**

- Physique des ondes
- Mécanique des fluides
- Thermodynamique

## Bibliographie

- [1] Brébec J. M. et al. *H-prépa, Ondes PC-PSI*. Hachette, 2008.
- [2] J. P. Faroux and J. Renault. *Mécanique des fluides et ondes mécaniques*. Dunod, 1999.
- [3] S. Olivier. *Physique PC-PC\**. Tec&Doc, 2009.
- [4] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PC-PC\**. Cap prépa – Pearson, 2010.
- [5] M. N. Sanz and B. Salamito. *Tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2009.
- [6] L. Sartre. *Physique des ondes PC-PSI*. Les nouveaux précis Bréal, 2004.
- [7] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

## Introduction [7]

- Ondes acoustiques très présentes dans l'expérience quotidienne.
- Caractère ondulatoire du son.

**EXPÉRIENCE** – Visualisation du caractère ondulatoire d'un "clap".

- Nécessité d'un milieu matériel. Ici, on se limite aux fluides.
- Définition d'une onde acoustique.

## 1 Modèle et mise en équation [4, 1]

### 1.1 Cadre de l'approximation acoustique [6]

- On caractérise le fluide au repos, on introduit la surpression.
- Équation d'Euler linéarisée. Conservation de la masse linéarisée.
- Nécessité d'une information thermodynamique. Discussion du H-prépa et démonstration du Précis Bréal.

### 1.2 Équation des grandeurs couplées, équation d'onde

- $p$  et  $\vec{v}$  sont les grandeurs couplées.
- Équation de d'Alembert. Célérité du son. Ordres de grandeur.
- Cas du gaz parfait. Historique avec le caractère isotherme/adiabatique de la propagation.

**EXPÉRIENCE** – Mesure de la vitesse du son dans l'air.

- Un mot sur les solides. Ordres de grandeur.

## 2 Aspect énergétique

### 2.1 Bilan énergétique [4, 3]

- On amène le bilan énergétique avec les équations couplées.
- Expliquer chaque terme. Analogie avec l'électromagnétisme.

### 2.2 Intensité sonore [5, 1]

- Définition de l'intensité sonore.
- Niveau sonore. Ordres de grandeur. Déplacement du tympan correspondant.

## 3 Ondes progressives

### 3.1 Solution en ondes planes [4, 3]

- Rappel de la forme générale. Cas des ondes progressives, planes puis sphériques. Lien avec l'électromagnétisme.

### 3.2 Notion d'impédance acoustique [4]

- Définition de l'impédance acoustique. Généralité de la notion.

### 3.3 Réflexion et transmission à une interface [4, 1]

- Position du problème. Continuité de la pression et de la vitesse à l'interface.
- Coefficients de transmission et de réflexion en amplitude et en énergie.

### 3.4 Adaptation d'impédance [1]

- Discussion sur la notion d'impédance.

**EXPÉRIENCE** – Expériences autour du diapason (dans l'air, dans l'eau, sur la table, sur sa caisse de résonance).

- Intérêt d'un porte voix (petit calcul).

## 4 Ondes stationnaires [2, 3]

- Choix des conditions aux limites, lien avec ce qui a été fait avant.
- Modes propres d'une cavité. Instrument à vent. Hélium.

**EXPÉRIENCE** – Flûte (son différent en fonction des conditions aux limites imposées).

- Absence de transport d'énergie.

## Conclusion

- Intérêt des ondes acoustiques.
- Généralités des phénomènes ondulatoires (impédances, ondes progressives périodiques, ondes stationnaires).
- Ouverture sur l'échographie.

**NOTES** : Leçon de contenu assez fixé. Insister sur l'aspect énergétique et la notion d'impédance.

## Propagation dans un milieu dispersif

**OBJECTIF** – Comprendre le phénomène de dispersion et le généraliser à travers différents exemples.

**NIVEAU** – Deuxième année de CP

**PRÉ-REQUIS :**

- Équation de d'Alembert
- Électromagnétisme
- Tension de surface
- Mécanique des fluides

### Bibliographie

- [1] Brébec J. M. et al. *H-prépa, Ondes PC-PSI*. Hachette, 2008.
- [2] É. Guyon, J. P. Hulin, and L. Petit. *Hydrodynamique physique*. CNRS Éditions, 2012.
- [3] B. Lahaye. Propagation des ondes : vitesse de phase, vitesse de groupe. *BUP*, 649, 1982.
- [4] S. Olivier. *Physique PC-PC\**. Tec&Doc, 2009.
- [5] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PC-PC\**. Cap prépa – Pearson, 2010.
- [6] M. N. Sanz and B. Salamito. *Tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2009.
- [7] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

### Introduction [7]

- On a vu la propagation non-dispersive, régie par l'équation de d'Alembert.
- Ici, on s'intéresse à la propagation dans un milieu dispersif, où la vitesse de l'onde dépend de la fréquence.

**EXPÉRIENCE** – Dispersion par un prisme (ou un PVD).

## 1 Exemple de la chaîne infinie de pendules couplés [5]

### 1.1 Modèle et mise en équation

- Modèle des pendules couplés. Mise en équation.
- Approximation des milieux continus et des petits angles. Équation de Klein-Gordon.

### 1.2 Solution harmonique et relation de dispersion

- Relation de dispersion. Solution générale.  $k$  complexe.

### 1.3 Dispersion et absorption

- Ondes progressives et périodiques.
- Absorption et vitesse de phase en général. Onde évanescence.
- Cas de l'équation de Klein-Gordon.

**EXPÉRIENCE** – Pulsation critique sur la chaîne de pendules.

## 2 Propagation d'un paquet d'onde [5, 6]

### 2.1 Notion de paquet d'onde

- Caractère non-physique de l'OPPH. Hypothèse du paquet d'onde et écriture de celui-ci.

### 2.2 Milieu faiblement dispersif

- Linéarisation de la relation de dispersion. Vitesse de phase et vitesse de groupe.

EXPÉRIENCE – Animation : différence entre vitesse de groupe et vitesse de phase.

- Calcul pour Klein-Gordon. Rapport avec la dispersion.

### 2.3 Milieu fortement dispersif et étalement [4]

- On pousse le développement de Taylor à l'ordre 2. Étalement du paquet d'onde.

## 3 Dispersion dans d'autres domaines de la physique

### 3.1 Propagation d'une onde électromagnétique dans un plasma [6, 5, 1]

- Modèle. Bien dégager et expliquer les hypothèses.  $\vec{j} = f(\vec{E})$ .
- Relation de dispersion. Rapport avec l'équation de Klein-Gordon.
- Transmission dans l'ionosphère.

### 3.2 Ondes à la surface d'un fluide parfait [2, 3]

EXPÉRIENCE – Cuve inclinée : vitesse d'une onde en fonction de la hauteur.

- Expression de la relation de dispersion et de la vitesse de phase.
- On distingue les différents régimes et les vitesses.

## Conclusion

- Importance de la dispersion en physique.
- Autre origine : guidage et confinement spatial.

NOTES : Leçon assez longue. Bien faire comprendre pourquoi on parle de paquet d'onde. Bien détailler les hypothèses et passer assez vite sur les calculs.

## Propagation guidée des ondes

**OBJECTIF** – Comprendre l'intérêt et les caractéristiques du guidage : confinement, dispersion, atténuation.

**NIVEAU** – Deuxième année de CP

**PRÉ-REQUIS :**

- Ondes électromagnétiques
- Physique des ondes (équation de d'Alembert, dispersion)
- Optique géométrique et ondulatoire

### Bibliographie

- [1] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Ondes PC-PSI*. Hachette, 2008.
- [2] C. Garing. *Ondes électromagnétiques dans le vide et dans les milieux conducteurs*. Ellipses, 1998.
- [3] D. Mauras. *Électromagnétisme MP, PC, PSI*. Presses universitaires de France, 1999.
- [4] J. P. Pérez and E. Anterrieu. *Optique, fondements et applications*. Dunod, 2004.
- [5] M. N. Sanz and B. Salamito. *Tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2009.
- [6] R. Taillet. *Optique physique*. De boeck, 2006.
- [7] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

### Introduction [7]

- Problématique importante du transport de l'information. Transport d'ondes électromagnétiques.
- Deux types : propagation libre (antennes), propagation guidée.
- Exemple du fil électrique, du tube coudé.

**EXPÉRIENCE** – Lampe quartz-iodé dans un tube coudé.

## 1 Guidage d'une onde entre deux plaques

[5, 4] surtout, [3, 2, 1] pour compléter.

### 1.1 Position du problème

- Schéma de la situation. Équation de d'Alembert. Forme des solutions recherchées.
- Invariances et régime établi. Équation vérifiée par le champ. Conditions aux limites.

### 1.2 Mode TEM

- Recherche de la solution. Conditions et caractéristiques de l'onde.

### 1.3 Mode TE

- Forme des vecteurs d'onde, du champ électrique. Résolution et solution.
- Relation de dispersion. Étude. Vitesse de phase et vitesse de groupe. Fréquence de coupure. Ordres de grandeur.
- Aspect énergétique. Conclusion.

## 1.4 Onde dans un guide rectangulaire

- Présentation du problème et mise en équation.
- Impossibilité du mode TEM. Conséquences en terme de transport de l'information.
- Dispersion des ondes TE et TM.

## 2 Le câble coaxial

[3] surtout, [4] et [1] pour compléter.

### 2.1 Présentation et champs

- Présentation du câble coaxial. Intérêt. Définitions.
- Relations entre les champs électriques et magnétiques.

### 2.2 Modélisation du câble coaxial

- Modélisation des effets capacitifs et inductifs.
- Calcul de l'inductance linéique et de la capacité linéique.
- Aspect énergétique.
- Modèle à constantes réparties. Ordres de grandeur.

### 2.3 Propriétés du câble coaxial

- Célérité. Dispersion. Impédance caractéristique.
- Modélisation des pertes dans le câble et équation des télégraphistes. Ordres de grandeur.

EXPÉRIENCE – Vérifications expérimentales.

## 3 La fibre optique [6, 4]

### 3.1 Présentation [7]

- Domaine d'utilisation et intérêt. Deux types : saut et gradient d'indice.

### 3.2 Fibre optique à gradient d'indice

- Présentation du modèle. Réflexions successives. Condition de réflexion totale et ouverture numérique.
- Superposition des ondes et modes de la fibre. Condition d'interférences. Dispersion de modes. Dispersion dû au décalage temporel. Fréquence maximale.

### 3.3 Fibre optique à gradient d'indice

- Présentation du principe. Avantages.
- Utilisation, avantages et inconvénients par rapport aux câbles coaxiaux.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes du guidage : confinement, dispersion, atténuation.
- Guidages utilisés en pratique. Dispersion : solitons dans les fibres optiques.

NOTES : Leçon qui peut être assez calculatoire, insister sur les caractéristiques du guidage, la notion de pulsation de coupure, la dispersion et les modes.

# Ondes électromagnétiques dans les milieux diélectriques

**OBJECTIF** – Comprendre les mécanismes de propagation dans les milieux diélectriques et leurs conséquences.

**NIVEAU** – Deuxième année de CP

**PRÉ-REQUIS :**

- Équations de Maxwell dans le vide
- Optique
- Physique ondulatoire

## Bibliographie

- [1] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Électromagnétisme IV : Milieux diélectriques et milieux aimantés*. Dunod, 1984.
- [2] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Ondes PC-PSI*. Hachette, 2008.
- [3] C. Garing. *Milieux diélectriques*. Ellipses, 1995.
- [4] D. Mauras. *Électromagnétisme MP, PC, PSI*. Presses universitaires de France, 1999.
- [5] M. N. Sanz and B. Salamito. *Tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2009.

## Introduction

- Étude de la propagation d'onde plane dans le vide.
- Matière? Comportement plus riche.

**EXPÉRIENCE** –

- Dispersion de la lumière par un prisme.
- Absorption des ondes centimétriques par l'eau.

## 1 Généralités sur les milieux diélectriques [2, 5, 1, 4]

### 1.1 Définitions

- Phénomène de polarisation. Charges libres et de conduction. Notion de diélectrique.
- Densité et courant de polarisation.

### 1.2 Équations de Maxwell

- Démonstration des équations de Maxwell dans un diélectrique.
- Vecteur déplacement électrique.

### 1.3 Susceptibilité dans un DLHI

- Relation générale (matricielle) pour un diélectrique linéaire.
- Homogénéité et isotropie. Relation entre  $\vec{p}$  et  $\vec{E}$ .

## 2 Modélisation microscopique [2, 5, 1, 4]

### 2.1 Types de polarisation

- Polarisation électronique. Polarisation ionique. Polarisation d'orientation.

## 2.2 Modèle de l'électron élastiquement lié

- Expression des hypothèses (isolant, indépendances des électrons, peu dense, uniquement polarisation électronique). Bilan des forces.
- Principe fondamental de la dynamique. Vecteur polarisation. Susceptibilité complexe. Ordres de grandeur.

## 2.3 Polarisation ionique

- Principe du mécanisme. Ordres de grandeur. Allure de la susceptibilité ionique.
- Polarisation d'orientation : mécanisme.
- Allure de la susceptibilité sur une grande gamme de la fréquence.

# 3 Équation de propagation dans un milieu diélectrique [2, 5, 1, 4]

## 3.1 Relation de dispersion

- Équation de propagation des ondes.
- Relation de dispersion. Vecteur d'onde complexe. Structure d'onde plane.

## 3.2 Indice complexe, aspect énergétique

- Champ électrique. Décroissance de l'amplitude.
- Indice complexe. Cas de l'électron élastiquement lié.

## 3.3 Dispersion et loi de Cauchy

- Dans la suite de ce qui précède, démonstration de la loi de Cauchy.

# 4 Réflexion et réfraction à une interface

## 4.1 Normale [5]

- Rapide calcul des coefficients en incidence normale.

## 4.2 Incidence oblique [3]

- Lois de Descartes.
- Courbes des coefficients de réflexion du Garing à commenter. Angle de Brewster.

# Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Qu'en est-il des milieux inhomogènes ? Et anisotropes ? Et non-linéaires ?

NOTES : Leçon assez longue, bien insister sur la physique plutôt que sur les calculs.

# Ondes électromagnétiques dans les conducteurs

OBJECTIF – Comprendre les principaux aspects de la propagation dans les conducteurs.

NIVEAU – Deuxième année de CP

PRÉ-REQUIS :

- Modèle de Drude
- Électromagnétisme
- Plasma et dispersion
- Diélectriques

## Bibliographie

- [1] N. W. Ashcroft and N. D. Mermin. *Physique des solides*. EDP Sciences, 2011.
- [2] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Ondes PC-PSI*. Hachette, 2000.
- [3] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PSI-PSI\**. Cap prépa – Pearson, 2010.
- [4] M. N. Sanz and B. Salamito. *Tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2009.

## Introduction

- Métaux : structure très particulière. Propriétés optiques et électriques particulières.
- Électromagnétisme : lien entre lumière et électricité : par exemple lien entre le phénomène de réflexion optique et les propriétés conductrices.

## 1 Modélisation d'un conducteur [1]

### 1.1 Modèle microscopique [3]

- Hypothèse fondamentale du modèle de Drude. Rôle du réseau. On n'étudie pas les plasmas, ni les gaz ionisés.
- Expression de la vitesse, donc de la densité volumique de courant et enfin de la conductivité complexe.
- Ordres de grandeur. Puissance dissipée.

### 1.2 Neutralité des conducteurs et équation de Maxwell [2, 4, 3]

- Condition d'électroneutralité locale : ARQS.
- Régime du conducteur en fonction de la pulsation.
- Équations de Maxwell en régime d'électroneutralité. Remarquer la notation complexe pour  $\epsilon_r$ .

### 1.3 Équation d'onde, indice métallique [2, 4]

- Équation de propagation de l'onde dans le conducteur.
- Indice métallique complexe.

## 2 Propriétés basse fréquence des conducteurs : réflexion et effet de peau

### 2.1 Réflexion [2, 3]

- Le même calcul que pour les milieux diélectriques (monochromatique, sous incidence normale, polarisée rectilignement). Coefficients de Fresnel.
- Quelques remarques qualitatives sur l'incidence oblique.

## 2.2 Effet de peau [2, 3]

- Détailler le calcul de l'effet de peau en explicitant bien les hypothèses et les conditions aux limites.
- Ordres de grandeur et conséquences.
- Origine inductive de l'effet de peau.
- Bilan énergétique

## 2.3 Modèle du conducteur parfait [3]

- Présentation du modèle.
- Réflexion. Charges et courants surfaciques.

# 3 Quelques aspects de la propagation à haute fréquence

## 3.1 Pulsation plasma et régimes [2, 3]

- Rappel de la relation de dispersion.
- Hypothèses du plasma. Deux régimes. Ordres de grandeur.

## 3.2 Miroir métallique [2]

- Relation de dispersion. Onde évanescente et réflexion. Ordres de grandeur et applications.

## 3.3 Zone de transparence [2]

- Relation de dispersion. Paquet d'onde. Vitesse de groupe et vitesse de phase.

## Conclusion [1]

- Résumé précis des idées fortes.
- Limites du modèle de Drude.

NOTES : Leçon faite le jour J, un peu modifiée par rapport à ce plan. 15/20. Des questions assez simples sur les hypothèses et quelques questions d'ordre pédagogique. Le jury demande que l'on donne de l'intuition, des ordres de grandeur.

# Propriétés et applications du rayonnement dipolaire électrique

**OBJECTIF** – Comprendre les origines du rayonnement dipolaire électrique et quelques applications : antennes, diffusion Rayleigh.

**NIVEAU** – Deuxième année de CP

**PRÉ-REQUIS :**

- Électrostatique, magnétostatique
- Deux types d'ARQS
- OEM dans le vide et dans les diélectriques
- Électron élastiquement lié

## Bibliographie

- [1] J. P. Pérez, R. Carles, and R. Fleckinger. *Électromagnétisme, fondements et applications*. Dunod, 2001.
- [2] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PC-PC\**. Cap prépa – Pearson, 2010.
- [3] Sextant. *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.

## Introduction

- Champ statique en électromagnétisme, propagation des champs dans le vide et dans les DLHI : mais comment produit-on une onde électromagnétique?

## 1 Rayonnement dipolaire électrique [2]

### 1.1 Potentiel vecteur d'un système de charges et de courants, cadre d'étude

- Solutions de l'équation  $\square \vec{A} = -\mu_0 \vec{j}$ . Formule des potentiels retardés. Origine de cette appellation.
- Dépendance en  $r$  trop complexe : impossibilité de calculer les champs qui sont les seuls porteurs de l'information physique.
- Hypothèse non-relativiste, dipolaire et d'ARQS des sources : formulation précise et conséquences.
- Définition du moment dipolaire et conclusion.

### 1.2 Calcul des champs

- Calcul de  $\vec{B}$  et de  $\vec{E}$  (n'en détailler qu'un).
- Définition des zones de champ proche et de champ lointain.

### 1.3 Zone de champ proche

- Donner les champs.
- Remarquer qu'ils sont donnés par la statique, dépendance en  $t$  et non en  $t - r/c$ . ARQS générale.

### 1.4 Zone de champ lointain

- Expression de  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$ .
- Dépendance en  $1/r$  : aspect énergétique. Anisotropie et indicatrice de rayonnement. Dépendance en  $t - r/c$ . Structure d'onde plane. Une charge accélérée rayonne.

## 2 Applications aux antennes [2]

### 2.1 Champ rayonné par une antenne rectiligne [1]

- Élément de conducteur : on relie  $\ddot{p}$  à  $\dot{I}$ .

- Conditions d'application de la formule. Calcul de  $\vec{E}$ . Rapport avec la diffraction de Fraunhofer.

## 2.2 Analogie avec la diffraction

- Rapport avec le principe d'Huygens-Fresnel.
- Application à la directivité des antennes.

## 3 Diffusion Rayleigh [2]

### 3.1 Modèle de l'électron élastiquement lié

- Hypothèses :  $\vec{E}$  pas trop fort, noyaux lourds et non-relativiste.
- Nuage électronique dans le référentiel du noyau. Calcul rapide.  $\vec{E}$  sinusoïdal.
- Calcul de  $\vec{p}(\omega)$ .

### 3.2 Interprétation de la couleur du ciel

- Formule de Larmor. Conclusion pour la dépendance en  $\omega^4$ . D'où la couleur du ciel.

### 3.3 Polarisation

EXPÉRIENCE – Diffusion avec le lait. Changements de couleur. Polarisation. [3]

- Conséquence du rayonnement dipolaire électrique.

## 4 Autres domaines d'application [1]

- Pourquoi l'eau polaire ne rayonne pas : elle suit le champ. On peut exciter cette rotation : micro-ondes.
- Molécules apolaires : souvent excitée dans l'infrarouge : spectroscopie IR.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Rayonnement d'une charge accélérée : perte d'énergie. Comment expliquer la stabilité atomique : MQ.

NOTES : Bien insister sur la physique, les approximations, les conséquences.

# Présentation de l'optique géométrique à l'aide du principe de Fermat

**OBJECTIF** – Reconstruire l'optique géométrique à partir du principe de Fermat, et voir les intérêts de cette approche.

**NIVEAU** – L3

**PRÉ-REQUIS :**

- Optique de lycée (géométrie et diffraction)
- Ondes électromagnétiques

## Bibliographie

- [1] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Optique et physique ondulatoire*. Dunod, 1990.
- [2] L. Dettwiller. *Qu'est-ce que l'optique géométrique ?* Dunod, 1990.
- [3] B. Portelli and J. Barthes. *La physique par la pratique*. H&K éditions, 2005.
- [4] J. Pérez, É. Bellanger, X. Ducros, V. Renvoizé, and P. Roux. *Physique MPSI-PCSI-PTSI*. Cap prépa – Pearson, 2009.
- [5] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PC-PC\**. Cap prépa – Pearson, 2010.
- [6] M. N. Sanz, A. E. Badel, and F. Clausset. *Tout-en-un MPSI-PCSI-PTSI*. Dunod, 2008.

## Introduction [1]

- Historique de la notion de rayon lumineux, des lois de l'optique géométrique.

## 1 Optique géométrique et rayonnement lumineux

### 1.1 Approximation de l'optique géométrique [1]

**EXPÉRIENCE** – Visualisation de la notion de rayon lumineux avec un laser et de la poussière de craie.

- Propagation rectiligne du rayon lumineux. Peut-on isoler un rayon lumineux ?

**EXPÉRIENCE** – Diaphragme et projection sur un écran. On ferme le diaphragme.

- Observation de la tache de diffraction. Élargissement angulaire. Conclusion. Approximation de l'optique géométrique.

### 1.2 Propagation de la lumière [6]

- Définition milieu homogène, transparent, isotrope, de la vitesse de la lumière dans le milieu et de l'indice optique.
- Propriété : propagation en ligne droite dans un milieu homogène en ligne droite, indépendance des rayons lumineux, principe de retour inverse.

## 2 Le principe de Fermat

### 2.1 Chemin optique [1]

- Définition, sens physique, exemple du milieu homogène avec dioptries.

### 2.2 Principe de Fermat : énoncé [1]

- Énoncé. Insister sur le caractère stationnaire. Définition de la stationnarité.

## 2.3 Applications – conséquences [1]

- Propagation en ligne droite.
- Retour inverse de la lumière.
- Lois de Descartes vectorielles (réfraction, réflexion (cas d'un point col))
- Stigmatisme et exemple du miroir elliptique.
- Équation des rayons lumineux. Développer l'analogie mécanique [3].

## 3 Applications

### 3.1 Courbure d'un rayon lumineux – Mirages [3]

EXPÉRIENCE – Eau salée ou eau sucrée : création d'un gradient de concentration et déviation d'un faisceau laser.

- Interprétation de l'expérience. Loi de Gladstone. Mirages inférieurs et supérieurs.
- Analogie mécanique.

### 3.2 Fibre optique [4]

EXPÉRIENCE – Présentation du guide de lumière.

- Calcul pour une fibre à saut d'indice. Inconvénients. Fibre optique à gradient d'indice.

## 4 Lien avec l'optique ondulatoire

### 4.1 Surface d'onde [5]

- Scalaire optique. Surface d'onde. Démonstration de l'expression du déphasage en fonction du chemin optique.
- Définition de la surface d'onde.

### 4.2 Théorème de Malus [1, 5]

- Énoncé. Démonstration. Importance.

## Conclusion [2]

- Résumé précis des idées fortes.
- Équation eikonale.

NOTES : Bien montrer ce que le principe de Fermat apporte de nouveau. L'analogie mécanique est "fructueuse". Ne pas démontrer l'équation des rayons lumineux.

## Interférences à deux ondes en optique

**OBJECTIF** – Utiliser l'optique ondulatoire pour comprendre le phénomène d'interférences et introduire la notion de cohérence.

**NIVEAU** – Deuxième année de CP

**PRÉ-REQUIS :**

- Diffraction (lycée), mécanique quantique (lycée)
- Électromagnétisme
- Modèle scalaire de la lumière

### Bibliographie

- [1] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Optique et physique ondulatoire*. Dunod, 1990.
- [2] S. Houard. *Optique*. De Boeck, 2011.
- [3] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PC-PC\**. Cap prépa – Pearson, 2010.
- [4] R. Taillet. *Optique physique*. De boeck, 2006.

### Introduction [3, 1, 2]

- Principe de Fermat et optique géométrique : rayons indépendants. Problème avec la diffraction (lycée) et les interférences (cette leçon).

**EXPÉRIENCE** – Deux lampes de poches : pas d'interférences. Trous d'Young : interférences.

- Mettre en évidence que ceci est valable pour toutes les ondes. Rapport avec la supplantation de la théorie ondulatoire de la lumière sur la théorie corpusculaire dans l'histoire.

## 1 Notion d'interférences à deux ondes

### 1.1 Modèle scalaire de la lumière [3]

- Définition et conditions d'utilisation du modèle scalaire de la lumière.
- Bien détailler chaque terme : amplitude, phase, pulsation, phase à l'origine.

### 1.2 Éclairement et réponse des détecteurs [3, 1, 2]

- Rapport entre réponse des détecteurs et période des ondes. Ordres de grandeur. Conclusion et définition de l'éclairement.

### 1.3 Interférences à deux ondes [3, 1]

#### Calcul de l'éclairement

- Sommation des éclairagements : justification et calcul. Condition  $\omega_1 = \omega_2$ .
- Définition du terme d'interférence et cas  $E_1 = E_2$ .

#### Interférences constructives et destructives

- Définition d'une onde constructive et destructive. Différence de phase et différence de chemin optique.
- Ordres d'interférence. Contraste. Variation avec  $E_1$  et  $E_2$ .

## 2 Étude d'un système interférentiel : les fentes d'Young [3, 1]

### 2.1 Présentation

- Présentation du dispositif. Obtention des interférences. Importance historique.

### 2.2 Figure d'interférences

#### Surfaces d'égal éclairement

- Écriture du déphasage. Définition du lieu des points  $M$  : hyperboloïdes.
- Représentation sur transparent des surfaces d'égal éclairement.

#### Application aux fentes d'Young

- Écran perpendiculaire aux sources. Calcul complet de la différence de chemin optique en fonction de  $x$ .
- Éclairement. Interfranges.

EXPÉRIENCE – Variation spatiale de l'éclairement en fonction de la longueur d'onde. Interfrange.

## 3 Systèmes interférentiels réels

### 3.1 Cohérence spatiale [3]

- Source primaire déphasée. Différence de marche.
- Source étendue uniforme de taille  $b$ . Éclairement et définition du contraste.
- Inversion de contraste. Longueur de cohérence spatiale de la source.

EXPÉRIENCE – Élargissement de la fente source : perte et inversion de contraste.

### 3.2 Notions de trains d'onde et phase aléatoire [3, 4, 2]

- Quantification des niveaux et désexcitation : origine de l'émission de la lumière.
- Temps de désexcitation. Plusieurs photons émis successivement : trains d'onde. Différence de phase aléatoire. Nouvelle forme de l'éclairement.

### 3.3 Cohérence temporelle [3, 1]

- Largeur des raies. Origine physique. Calcul pour un spectre carré. Contraste, interprétation.
- Temps et longueur de cohérence d'une raie. Ordres de grandeur. Un mot sur les spectres réels.

EXPÉRIENCE – Fentes d'Young en lumière blanche. Irisation des raies. Perte de contraste. Blanc d'ordre supérieur.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Interférences à division d'amplitude. Limite du modèle scalaire et expérience de Fresnel-Arago.
- Intérêt de l'interférométrie.

NOTES : Garder assez de temps pour traiter la cohérence.

## Interféromètres à division d'amplitude

**OBJECTIF** – Comprendre l'intérêt de la division d'amplitude, la notion de localisation et voir deux exemples d'interféromètres.

**NIVEAU** – L3

**PRÉ-REQUIS :**

- Interférences à division du front d'onde
- Scalaire optique / électromagnétisme
- Optique géométrique
- Notion de cohérence, transformée de Fourier

### Bibliographie

- [1] Brébec J. M. et al. *H-prépa, Optique MP-PC-PSI*. Hachette, 1998.
- [2] D. Mauras. *Électromagnétisme MP, PC, PSI*. Presses universitaires de France, 1999.
- [3] J. P. Pérez and E. Anterrieu. *Optique, fondements et applications*. Dunod, 2004.
- [4] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PC-PC\**. Cap prépa – Pearson, 2010.

### Introduction

- On part des dispositifs à division du front d'onde (fentes d'Young, miroirs de Fresnel) et on rappelle ce qui a été dit.

**EXPÉRIENCE** – Fentes d'Young : élargissement de la fente et perte de cohérence.

- Compromis entre contraste et luminosité à trouver. Comment résoudre ce problème ?

## 1 Source étendue et localisation des franges [1, 2]

### 1.1 Source étendue : retour sur les fentes d'Young [4]

- Modèle de source ponctuelle et de source étendue. Sommation des éclairissements. Donner le résultat en sinus cardinal.
- Conséquences, augmentation de l'éclairissement mais perte de contraste. Rapport avec l'expérience introductive.

### 1.2 Localisation des franges – Théorème de localisation

- Où observer les franges ? Condition de localisation.
- Recherche de points privilégiés. Conclusion.
- Intérêt de la division d'amplitude.

## 2 L'interféromètre de Michelson [4]

### 2.1 Propriétés [2]

- Description de l'interféromètre de Michelson. Introduction détaillée des différents schémas équivalents pour le cas d'une source ponctuelle.
- Passage à la source étendue : on considère des rayons venant du même élément de source à cause du théorème de localisation.

### 2.2 lame d'air

**EXPÉRIENCE** – On réalise l'expérience montrant la localisation des franges à l'infini.

- Calcul  $\delta = 2e \cos(i)$ . D'où les anneaux d'égale inclinaison.

- Application : spectroscopie par transformée de Fourier. Application au doublet du sodium.

EXPÉRIENCE – Calculer le  $\Delta\lambda$  du doublet du sodium.

## 2.3 Coin d'air

EXPÉRIENCE – Observation des franges en coin d'air. Passer de la lame d'air au coin d'air devant le jury.

- Exposer le résultat : nature des franges, localisation (à expliquer en partie pendant la manipulation).
- Application : calcul de l'épaisseur d'une lame de microscope.

EXPÉRIENCE – Mesure de l'épaisseur d'une lame de microscope, après être passé en lumière blanche.

- Mentionner d'autres applications : planéité des miroirs, défauts de surface,...

## 3 Interféromètre de Fabry-Pérot [3, 1]

### 3.1 Présentation du dispositif et amplitude transmise

- Schéma de l'interféromètre. Amplitude complexe de la  $n$ -ième onde. Amplitude complexe totale. Intensité conséquente. Graphique. Plusieurs cas en fonction de la finesse.

EXPÉRIENCE – Interféromètre de Fabry-Pérot en lame à faces parallèles, éclairé par la lampe à vapeur de sodium.

- Rayon des anneaux, pouvoir de résolution, largeur à mi-hauteur.

### 3.2 Applications

- Exposer rapidement le filtre interférentiel.
- Mentionner les cavités laser, les traitements anti-reflets, la spectroscopie à haute résolution.

## Conclusion

- La division d'amplitude permet de solutionner le problème de cohérence.
- Ouvrir sur la détection d'ondes gravitationnelles et l'exemple de VIRGO.

NOTES : Le jury souhaite que l'on insiste sur la localisation et sur l'avantage de la division d'amplitude. Il faut manipuler devant le jury, donc bien maîtriser les expériences.

## Diffraction de Fraunhofer

OBJECTIF – Comprendre le cas limite de Fraunhofer, et quelques implications.

NIVEAU – Deuxième année de CP

PRÉ-REQUIS :

- Optique géométrique et ondulatoire
- Transformée de Fourier

### Bibliographie

- [1] E. Hecht. *Optique*. Pearson, 2002.
- [2] J. P. Pérez and E. Anterrieu. *Optique, fondements et applications*. Dunod, 2004.
- [3] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PC-PC\**. Cap prépa – Pearson, 2010.
- [4] M. N. Sanz and B. Salamito. *Tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2009.
- [5] R. Taillet. *Optique physique*. De boeck, 2006.

### Introduction [3, 2]

- Aspect historique dû à la formation des images. Observations de Grimaldi.
- Éparpillement de la lumière : *diffringere*.

EXPÉRIENCE – Laser et diaphragme.

## 1 Modèle et propriétés de la diffraction de Fraunhofer [3, 2, 1, 4]

### 1.1 Principe de Huygens-Fresnel

- Définition de la diffraction.
- Énoncé du principe en distinguant la contribution d'Huygens et de Fresnel. Expression mathématique du principe.
- Schéma et principe des ondelettes secondaires.

### 1.2 Approximation de Fraunhofer

- Diffraction par un diaphragme plan. Approximations et développement limité.
- Discussion de l'approximation. Ordres de grandeur.
- Un mot sur les lentilles minces (sans démonstration).
- Formule finale avec les  $\alpha$  et  $\beta$ .

### 1.3 Propriétés

- Influence de la translation, de l'homothétie et théorème de Babinet.

## 2 Applications et exemples de diffraction de Fraunhofer [2, 4, 3]

EXPÉRIENCE – Illustrer le propos à chaque fois.

### 2.1 Diffraction par une ouverture rectangulaire

- On fait le calcul. Cas de fentes fines.
- Diamètre d'un cheveu et lien avec le théorème de Babinet.

## 2.2 Diffraction par une ouverture circulaire

- Présenter le résultat du calcul rapidement.

ILLUSTRATION – Tracé avec Maple des solutions.

- Critère de Rayleigh et résolution des instruments d'optique.

EXPÉRIENCE – Expérience sur le critère de Rayleigh (si temps).

## 3 Diffraction de Fraunhofer et optique de Fourier [1, 3, 5]

### 3.1 Origine

- On fait apparaître la transformée de Fourier dans la formule. On en discute l'importance.
- Faire le lien avec les exemples précédents.

### 3.2 Application au filtrage des fréquences spatiales

- Expliquer le principe. Passe-bas et strioscopie. Applications : détramage, microscope à contraste de phase.

EXPÉRIENCE – On montre les expériences d'Abbe et de strioscopie.

## Conclusion

- Résumé.
- Ouverture sur les problèmes de résolution, la découverte de l'ADN, la diffraction par des structures périodiques comme autant d'applications ou de conséquences de la diffraction dans les conditions de Fraunhofer.

NOTES : Il faut énoncer proprement et clairement le principe d'Huygens-Fresnel, insister sur l'approximation de Fraunhofer. L'optique de Fourier est au programme de PC depuis peu.

# Diffraction par des structures périodiques dans différents domaines de la physique

OBJECTIF – Dégager l'intérêt de la diffraction par des structures périodiques pour l'étude de la source ou de l'objet diffractant.

NIVEAU – L3

PRÉ-REQUIS :

- Diffraction de Fraunhofer
- Dualité onde-corpuscule
- Cristallographie
- Acoustique

## Bibliographie

- [1] N. W. Ashcroft and N. D. Mermin. *Physique des solides*. EDP Sciences, 2011.
- [2] C. Aslangul. *Mécanique quantique tome 2*. De Boeck, 2012.
- [3] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Optique MP-PC-PSI*. Hachette, 1998.
- [4] C. Garing. *Ondes mécaniques et diffusion*. Ellipses, 1998.
- [5] C. Garing. *Les mille et une questions de la physique en prépa PC-PC\**. Ellipses, 2006.
- [6] J. P. Pérez and E. Anterrieu. *Optique, fondements et applications*. Dunod, 2004.
- [7] C Ray and J. C. Poizat. *La physique par les objets du quotidien*. Belin – Pour la science, 2013.
- [8] R. Taillet. *Optique physique*. De boeck, 2006.

## Introduction

- On a vu la diffraction de Fraunhofer et traité le cas de la fente fine et des fentes d'Young.
- Il y a deux protagonistes : l'objet diffractant et la source, le but est de caractériser l'objet diffractant connaissant l'onde reçue et la source ou l'inverse.
- Différents domaines : optique, acoustique, mécanique quantique.

## 1 Le réseau plan en optique [6, 3, 5, 8]

### 1.1 Définition et réalisation du réseau plan

- Définition du réseau. Caractérisation. Réalisation.
- Différents types de réseaux : réflexion et transmission.
- On se limite à un réseau par transmission et infiniment fin.

EXPÉRIENCE – Éclairage parallèle d'un réseau plan.

### 1.2 Diffraction par un réseau de fentes

- Formule des réseaux : démonstration et schéma.
- Amplitude et intensité de l'onde diffractée. Tracé de la courbe.
- Facteur de structure et facteur de forme.

### 1.3 Caractéristiques des réseaux

- Formule des réseaux et ordres. Finesse. Pouvoir de résolution. Influence de la fente source.

EXPÉRIENCE – Résolution du doublet du mercure, pas de celui du sodium.

- Influence de la largeur des fentes.
- Réseaux blazés.

## 2 Utilisation de deux échelles et échographie [7, 4]

### 2.1 Principe de l'échographie

- Ondes acoustiques : obtention, fréquences utilisées. Ordres de grandeur des distances, des temps de parcours. Aspect technologique.

### 2.2 Modélisation

- Transducteur : source qui vibrent en phase.
- Calcul de l'intensité émise. Facteur de structure et de forme. Lien avec la diffraction.
- Balayage par déphasage. Intérêt pratique. Ordres de grandeur.
- Compromis entre atténuation et ouverture angulaire.

## 3 Étude des cristaux par diffraction [2, 1, 6]

### 3.1 Principe physique

- Rappels de cristallographie très rapides.
- Quels type d'onde : rayons X, neutrons : ordres de grandeur.

### 3.2 Approche de Bragg et de von Laue

- Formule de Bragg : explication et calcul. Ordres de grandeur.
- Formule de von Laue. Présentation, intérêt et condition de von Laue.

### 3.3 Facteur de structure et facteur de forme

- Description rapide de l'obtention de ces facteurs à l'oral, sans calculs.

### 3.4 Mise en oeuvre expérimentale

- Techniques expérimentales utilisées.
- Ordres de grandeur en lien avec la manipulation.

EXPÉRIENCE – Diffraction par le graphite. Paramètre de maille du graphite.

## Conclusion

- Intérêt de la diffraction comme outil de caractérisation. Résumé des idées fortes.
- Description plus détaillée dans le cas des cristaux.

NOTES : Leçon testée en fin d'année. Mettre beaucoup d'ordres de grandeur et de physique.

# Émission et absorption de la lumière

**OBJECTIF** – Comprendre les mécanismes de l'interaction lumière-matière et en voir une application importante : le laser.

**NIVEAU** – L3

**PRÉ-REQUIS :**

- Optique ondulatoire
- Notion de photon
- Distribution de Maxwell-Boltzmann
- Corps noir

## Bibliographie

- [1] D. Dangoisse, D. Hennequin, and V. Zehnlé. *Les lasers*. Dunod, 2004.
- [2] B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, and B. Roulet. *Physique statistique*. Hermann, 2001.
- [3] S. Houard. *Optique*. De Boeck, 2011.
- [4] R. Taillet. *Optique physique*. De boeck, 2006.

## Introduction [3]

- Interaction du champ électromagnétique avec la matière *via* la force de Lorentz. Modèle de l'électron élastiquement lié (absorption, réfraction, lois de Descartes). résonances à certaines fréquences.
- Description impossible par des phénomènes classiques : rayonnement du corps noir et hypothèse de Planck.
- Par quels processus interagissent lumière et matière ?

## 1 Interaction lumière-matière [1]

### 1.1 Modélisation du milieu matériel

**EXPÉRIENCE** – Projection du spectre de raies du mercure.

- Ensemble d'atomes ou de molécules avec des spectres discrets. Niveaux d'énergie  $E_i$ , dégénérescence  $g_i$ , population  $N_i$  et durée de vie  $\tau_i$ .
- Échange d'énergie. Fréquence du photon.
- Lumière monochromatique considérée.

### 1.2 Processus d'interaction [4]

- Émission spontanée : variations des niveaux d'énergie, coefficients d'Einstein et ordres de grandeur.
- La même chose pour l'émission stimulée et l'absorption. Ne pas parler en terme de flux de photon mais plutôt en énergie.

### 1.3 Relations entre les coefficients d'Einstein [2, 4]

- Dépendance mutuelle des coefficients d'Einstein. Population en statistique canonique (facteur de Boltzmann) et loi de Planck. Cas limites.
- Ordres de grandeur pour une lampe : l'émission spontanée domine.
- Rapport entre absorption et émission stimulée : seulement la population.

## 2 Le laser [1]

### 2.1 Caractéristiques et principe [3]

- Cavité : élimination de l'émission spontanée (sur les côtés) et piégeage de l'émission stimulée.
- Amplification : nécessité que l'absorption soit donnée par l'émission stimulée.
- Système à deux niveaux (voir polycopié de la leçon 2012).

### 2.2 Système à trois niveaux

- Position du problème et hypothèses simplificatrices. Résolution : possibilité d'inversion de population, effet de seuil. Applications.
- Systèmes à quatre niveaux : avantages et applications.

### 2.3 Rôle de la cavité résonante et aspects technologiques [4, 3]

- Analogie électronique-laser : affiner le spectre, sélection des modes. Forte amplification et directivité.

#### EXPÉRIENCE – Laser de démonstration.

- Propriétés des lasers.

### 2.4 Applications [3]

- Détailler le refroidissement des lasers. Ordres de grandeur.
- Mentionner d'autres applications importantes, en particulier dans la vie courante, dans l'industrie ou dans la médecine.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Tableau comparatif entre lampe spectrale et laser (longueur de cohérence, largeur spectrale, directivité).
- Ouverture sur la fluorescence.

#### NOTES : Passer assez de temps sur les applications, si possible traiter d'autres applications que le laser. Lire le BUP 721.

## Aspects corpusculaires du rayonnement. Notion de photon

**OBJECTIF** – Comprendre comment des expériences historiques ont fait émerger le concept de photon, et en voir les caractéristiques.

**NIVEAU** – L3

**PRÉ-REQUIS :**

- Corps noir
- Relativité restreinte
- Électromagnétisme, optique
- Atomistique

### Bibliographie

- [1] C. Aslangul. *Mécanique quantique tome 1*. De Boeck, 2007.
- [2] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Mécanique I : Mécanique classique des systèmes de points et notions de relativité*. Dunod, 1990.
- [3] B. Cagnac, L. Tchang-Brillet, and J. C. Pebay-Péroula. *Physique atomique tome 1*. Dunod, 2005.
- [4] D. Dangoisse, D. Hennequin, and V. Zehnlé. *Les lasers*. Dunod, 2004.
- [5] J. P. Faroux and J. Renault. *Électromagnétisme tome 2*. Dunod, 1998.
- [6] C. Garing. *Ondes électromagnétiques dans le vide et dans les milieux conducteurs*. Ellipses, 1998.
- [7] H. Gié and S. Olivier. *Thermodynamique*. Tec&Doc, 1998.
- [8] J. Pérez, É. Bellanger, X. Ducros, V. Renvoizé, and P. Roux. *Physique MPSI-PCSI-PTSI*. Cap prépa – Pearson, 2013.

### Introduction

- Expérience des fentes d'Young : caractéristique ondulatoire de la lumière. Nature ondulatoire des ondes électromagnétiques.
- On a vu dans la leçon sur le corps noir des limites de cette description, au travers de la loi de Planck.

## 1 Caractère corpusculaire du rayonnement

### 1.1 Le rayonnement du corps noir [1, 3, 7]

- Phénomène physique : caractéristique du corps noir.
- Expression de la densité d'états. Résultat classique et résultat de Planck. Quantification des **échanges** entre l'oscillateur et la lumière.
- À traiter assez rapidement.

### 1.2 L'effet photoélectrique [1, 3, 8]

- Description très précise du protocole expérimental.

**EXPÉRIENCE** – Expérience avec lampe à vapeur de mercure.

- Grandeurs mesurées et résultats expérimentaux. Expliquer proprement chaque courbe. D'abord en absence de tension. Augmentation de  $V$  à  $\nu$  fixé pour plusieurs  $P$ , influence de  $\nu$ , courant de saturation. Contre-tension.
- Apport de la notion de photon à l'interprétation.

## 2 Caractéristiques du photon [3]

### 2.1 Pression de radiation et quantité de mouvement [1, 5]

- Calcul de la pression de radiation par réflexion sur un conducteur.
- Relation entre le flux de photon et la quantité de mouvement. Quantité de mouvement du photon.

## 2.2 Énergie et masse

- Énergie  $E = hv$ . Formule de l'énergie relativiste. Déduction de la masse.

## 2.3 Moment cinétique du photon [6]

- Calcul du Garing pour l'obtention du spin du photon.
- Vérification expérimentale et commentaires.

## 3 Expériences à photons

### 3.1 Effet Compton [2, 3]

- Présentation du problème. Importance historique.
- Exposé du calcul et du décalage en longueur d'onde.

### 3.2 Refroidissement d'atomes [1, 4]

- Explication rapide et assez qualitative du principe.
- Ordres de grandeur.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Fentes d'Young avec quelques photons.
- Nature ondulatoire de la lumière.

NOTES : Expliquer proprement les expériences historiques, et ce qu'elles apportent. Mentionner des applications.

## Aspects ondulatoires de la lumière. Notion de fonction d'onde

**OBJECTIF** – Étendre la dualité onde-corpuscule du photon à la matière, et introduire l'approche probabiliste de la mécanique quantique.

**NIVEAU** – L3

**PRÉ-REQUIS :**

- Notion de photon
- Optique, électromagnétisme
- Physique des ondes

### Bibliographie

- [1] C. Aslangul. *Mécanique quantique tome 1*. De Boeck, 2007.
- [2] J. L. Basdevant and J. Dalibard. *Mécanique quantique*. Éditions de l'école polytechnique, 2013.
- [3] C. Cohen-Tanoudji, B. Diu, and F. Laloë. *Mécanique quantique tome 1*. Hermann, 1995.
- [4] R. Feynman, R. Leighton, and M. Sands. *Mécanique quantique*. Dunod, 2014.
- [5] A. Messiah. *Mécanique quantique tome 1*. Dunod, 2003.
- [6] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.
- [7] M. Venturi. Aux origines de l'équation de Schrödinger. *BUP*, 959, 2013.

### Introduction [6]

- Problèmes historiques à résoudre. Corps noir : quantification de l'énergie du rayonnement et notion de photon.
- Dualité onde-corpuscule du rayonnement. Égalité de la matière.
- Importance fondamentale de la mécanique quantique aujourd'hui, tant au niveau fondamental que technologique.

## 1 Mise en évidence du caractère ondulatoire de la lumière [5, 1, 2, 3]

### 1.1 Aspect historique et notion de photon

- Rayonnement : équation de Maxwell, optique ondulatoire. Synthèse des phénomènes électriques et magnétiques.
- Matière : corpuscules parfaitement localisables soumis à la mécanique de Newton. Pour un grand nombre de ces corpuscules, on utilise les lois de la mécanique statistique.
- Anomalie de la répartition spectrale de l'énergie des corps chauffés : corps noir. Catastrophe ultraviolette, loi de Planck, valeur de  $h$ . Effet photoélectrique et propriétés du photon.

### 1.2 Ondes de De Broglie

- Spectre de raies. Difficultés historiques et conceptuelles. Modèle de Bohr. Hypothèse de De Broglie. Ondes de matière.
- Ordres de grandeur : grain de poussière, électron.
- Expérience de Davisson et Germer : explication complète.

## 2 Description quantique de la matière [2]

### 2.1 Interférences quantiques [4, 3]

- Lien avec l'expérience de Davisson et Germer : interférences qui existent. Mais sont-elles du même ordre ?
- Expérience d'interférences avec balles de fusil. Probabilités  $P_{12} = P_1 + P_2$ .
- Expériences avec les ondes, terme d'interférence non nul.
- Avec les électrons : interférences. Comment alors décrire les électrons ?

## 2.2 Notion de fonction d'onde

- Propriétés de la fonction d'onde : probabilité, principe de superposition. Explication des interférences.

## 3 Dynamique de la fonction d'onde [2]

### 3.1 Équation de Schrödinger – cas d'une particule libre [3]

- Modélise l'influence de différents phénomènes, et l'évolution temporelle.
- Écriture générale de l'équation de Schrödinger. Linéarité.
- Passage à Schrödinger indépendant du temps et particule libre.

### 3.2 Paquet d'onde [7, 5]

- Introduire le paquet d'onde comme réponse à la non-normalisation de l'onde plane.
- Vitesse de groupe : résultat classique. Transformée de Fourier.

### 3.3 Inégalité d'Heisenberg et stabilité de la matière [3]

- L'inégalité d'Heisenberg vient de la transformée de Fourier.
- Inégalité position/impulsion et stabilité de la matière.

## Conclusion

- Pertinence et limitations du modèle de la fonction d'onde.
- Ouverture sur les LP 39 et 40.

NOTES : Le jury attend l'introduction et une justification physique de l'équation de Schrödinger. Garder donc assez de temps pour la dernière partie.

## Confinement de l'électron et quantification de l'énergie

**OBJECTIF** – Comprendre comment le confinement et les propriétés ondulatoires de la matière arrivent à la quantification de son énergie.

**NIVEAU** – L3

**PRÉ-REQUIS :**

- Mécanique du point
- Nature ondulatoire de la lumière
- Nature corpusculaire du rayonnement

### Bibliographie

- [1] C. Aslangul. *Mécanique quantique tome 1*. De Boeck, 2007.
- [2] J. L. Basdevant. *Problèmes quantiques*. Éditions de l'école polytechnique, 2004.
- [3] J. L. Basdevant and J. Dalibard. *Mécanique quantique*. Éditions de l'école polytechnique, 2013.
- [4] B. Cagnac, L. Tchang-Brillet, and J. C. Pebay-Pérouta. *Physique atomique tome 1*. Dunod, 2005.
- [5] C. Cohen-Tanoudji, B. Diu, and F. Laloë. *Mécanique quantique tome 1*. Hermann, 1995.
- [6] J. P. Faroux and J. Renault. *Mécanique*. Dunod, 1998.
- [7] G. Pietrick. *Panorama de la physique*. Belin – Pour la science, 2007.
- [8] R. Taillet, L. Villain, and P. Fevre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

### Introduction [8]

- Quantification du rayonnement et notion de photon.
- Rappel de l'équation de Schrödinger.
- Annonce et justification du plan.

## 1 Approche expérimentale de la quantification [1]

### 1.1 Spectres de raies [4]

- Premières hypothèses de quantification avec le rayonnement du corps noir et l'hypothèse de Planck. Puis introduction de la notion de photon.

**EXPÉRIENCE** – Spectre de raies de la lampe à hydrogène. Longueurs d'onde.

- Plusieurs séries découvertes. Formule de Balmer.
- Généralisation à d'autres atomes : principe de recombinaison de Ritz.

### 1.2 Expérience de Franck et Hertz [4]

- Présentation précise du protocole expérimental. Courbe observée.
- Interprétation. Ordres de grandeur.

### 1.3 Modèle de Bohr [6]

- Difficultés originelles. Hypothèses (états d'énergie discrets, trajectoire circulaire, quantification du moment cinétique). Cheminement et résultat.
- Applications numériques. Lien avec ce qui précède.
- Limite du modèle de Bohr (transitions instantanées, Heisenberg).

## 2 Confinement de l'électron et quantification [3]

### 2.1 Notion de confinement

- Potentiel considéré. États liés et états de diffusion.
- Puit de potentiel : états liés stationnaires à une dimension.

### 2.2 Puit de potentiel infini [5]

- Description du problème. Fonction d'onde. Résolution du problème.
- Tableau d'analogie avec corde vibrante (équation, grandeur, conditions aux limites, solution, quantification et énergie).
- Confinement à l'origine de la quantification. Cas d'une boîte 3D. Remarque sur la dégénérescence.

### 2.3 Puit de potentiel infini [5]

- Écriture de l'équation et expression des conditions aux limites. On passe vite sur les calculs (éventuellement sur transparent).
- Allure des solutions. Solutions paires et impaires.

## 3 Applications [3]

### 3.1 Description de l'atome d'hydrogène [5]

- On détaille bien les étapes du calcul, en particulier on insiste sur les hypothèses, sur l'allure du potentiel, sur le confinement.
- Équation de Schrödinger. Résolution avec harmoniques sphériques. Spectres d'énergie.
- Allure des fonctions d'onde.

### 3.2 Hétérostructures à semi-conducteurs [7]

- Expliquer le rôle du confinement. Intérêt du principe de Pauli. On peut enlever cette partie au gré du temps restant (préférer traiter les ions colorés).

### 3.3 Couleurs des ions [2]

- Position du problème et modèle.
- Énergie des deux premiers niveaux et transitions. Applications numériques.

## Conclusion

- Origine historique de la notion de quantification de l'énergie.
- Associé au confinement et à la nature ondulatoire de la matière.
- Ouverture sur l'effet tunnel, autre manifestation de l'aspect ondulatoire.

NOTES : Le traitement de l'atome d'hydrogène est indispensable. Ne pas exposer des calculs trop lourds.

## Effet tunnel

**OBJECTIF** – Voir le phénomène d'effet tunnel et ses principales applications.

**NIVEAU** – L3

**PRÉ-REQUIS :**

- Équation de Schrödinger
- Radioactivité (lycée)
- Notion de fonction d'onde
- Électromagnétisme

### Bibliographie

- [1] J. L. Basdevant and J. Dalibard. *Mécanique quantique*. Éditions de l'école polytechnique, 2013.
- [2] C. Cohen-Tanoudji, B. Diu, and F. Laloë. *Mécanique quantique tome 1*. Hermann, 1995.
- [3] J. Foos. *Manuel de radioactivité*. Hermann, 2012.
- [4] M. Le Bellac. *Mécanique quantique*. CNRS Éditions, 2013.
- [5] B. Leroy. Le microscope à effet tunnel. *BUP*, 699, 1987.
- [6] J. M. Levy-Leblond and F. Balibar. *Quantique : rudiments*. Dunod, 2007.
- [7] C. F. Matta. L'effet tunnel : quelques applications. *BUP*, 734, 1991.
- [8] G. Pietrick. *Panorama de la physique*. Belin – Pour la science, 2007.

### Introduction

- À notre échelle, un skieur ne peut franchir une colline que si il a l'énergie suffisante.
- Effet quantique : aspect ondulatoire. Comportements différents. Une particule quantique peut franchir une barrière même si  $E < V_0$  : c'est l'effet tunnel.

## 1 L'effet tunnel [4]

### 1.1 Position du problème

- Position du problème. Schéma et variables.
- On écrit les équations de Schrödinger et les solutions dans chaque domaine.

### 1.2 Probabilité de transmission [2, 1]

- Écrire les deux matrices de passage au interfaces. Donner le résultat du coefficient de transmission. Cas où  $\kappa a \gg 1$  (barrière épaisse). Discuter les dépendances.

### 1.3 Généralisation à une barrière quelconque

- Position du problème. Formule approchée et conditions d'application (le potentiel ne varie pas trop vite) pour pouvoir appliquer  $\kappa a \gg 1$ . Formule.

## 2 Une première application : le microscope à effet tunnel [5, 8, 1]

- Principe expérimental. Énergie nécessaire pour arracher un électron. Probabilité de transmission. Représentation simplifiée du potentiel.
- Mise en œuvre expérimentale. Pointe, résolution. Utilisation. Avantage du microscope à effet tunnel.

### 3 La molécule d'ammoniac [1, 2]

- Constatation expérimentale : l'azote n'a pas de configuration alors qu'il est asymétrique.

#### 3.1 Description du modèle, approximation

- On montre le potentiel réel et sa modélisation. On garde les principaux ingrédients physiques.
- Notations.

#### 3.2 Solutions du problème

- Solution droite et gauche, symétrique et antisymétrique, après avoir posé les conditions en  $a + \Delta/2$  et  $-a - \Delta/2$  (potentiel infini).
- Cas  $V_0 \rightarrow +\infty$  : effet tunnel impossible, molécule bloquée. Deux états séparés.
- Cas ici : S et A, effet stabilisant. Écarts en énergie. Période et fréquence de transition.

### 4 La radioactivité $\alpha$ : modèle de Gamov [3, 6, 7]

#### 4.1 Position du problème

- Petits rappels sur la radioactivité, cinétique de désintégration. Allure du potentiel.

#### 4.2 Transparence de la barrière vis-à-vis de la particule $\alpha$

- Probabilité de transmission. Temps de demi-vie. Probabilité de désintégration. Calculs de A et B. Conclusion.

### Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur d'autres effets : jonctions Josephson, diode tunnel.

NOTES : Passer assez vite sur certains calculs pour ne pas rendre la leçon trop calculatoire. Bien décrire les systèmes étudiés et analyser avec soin chaque exemple.

## Fusion, fission

**OBJECTIF** – Comprendre les origines des phénomènes de fission et de fusion nucléaire, et les ordres de grandeur associés.

**NIVEAU** – L3

**PRÉ-REQUIS :**

- Effet tunnel
- Réactions nucléaires (terminale)
- Statistiques quantiques, de Boltzmann

### Bibliographie

- [1] J. L. Basdevant, J. Rich, and M. Spiro. *Énergie nucléaire*. Éditions de l'école polytechnique, 2011.
- [2] D. Blanc. *Physique nucléaire*. Masson, 1980.
- [3] J. Foos. *Manuel de radioactivité*. Hermann, 2012.
- [4] C. Ngô and H. Ngô. *Physique nucléaire : introduction*. Dunod, 2014.
- [5] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PC-PC\**. Cap prépa – Pearson, 2010.
- [6] L. Valentin. *Physique subatomique : noyaux et particules*. Hermann, 1973.

### Introduction [1, 4]

- Rappeler un peu l'aspect historique de la physique nucléaire.
- Rappeler la composition du noyau,  $A$ ,  $Z$ .

## 1 Description du noyau

### 1.1 Définitions [1, 4, 6, 3]

- Ordres de grandeur de la taille. Définition d'isotopes, isotones, isobares.
- Nature des interactions.
- Définition du défaut de masse et énergie de liaison.

### 1.2 Modèle de la goutte liquide [6, 2, 4]

- Description de chaque terme.
- Courbe expérimentale (Aston). Discussion et ordres de grandeur des termes.

## 2 Fission [1, 4, 2]

### 2.1 Réaction de fission

- Définition de la fission. Exemples de réaction et énergie associée. Comparaison avec la combustion du charbon.

### 2.2 Fission spontanée

- Petit calcul en lien avec le modèle de la goutte liquide et la déformation des noyaux. Paramètre de fissibilité.
- Discussion expérimentale et ordres de grandeur.

## 2.3 Barrière de fission

- Discussion qualitative en lien avec la courbe.
- Intérêt énergétique des neutrons.

## 2.4 Influence de l'environnement et masse critique [5]

- Rayon et masse critique sur un exemple à une dimension. Discussion.
- Techniques pour stabiliser un échantillon.

# 3 Fusion [1, 4, 2]

## 3.1 Définition

- Définition et considération d'une réaction, énergie, ordres de grandeur.

## 3.2 Barrière coulombienne et effet tunnel

- Calcul et formule de l'effet tunnel. Section efficace de fusion.

## 3.3 Condition de réaction et influence de la température

- Calcul des taux de réaction dans un milieu et mise en évidence du rôle de la température.
- Critère de Lawson.
- Aspects pratiques.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur les applications industrielles et ITER.

NOTES : Leçon assez longue, ne pas perdre trop de temps sur la première partie. Le titre a été changé pour laisser une plus grande part à la description de la fusion et de la fission en détail.

# Oscillateurs à deux degrés de liberté en mécanique classique et en mécanique quantique

OBJECTIF – Illustrer les analogies et les différences entre mécanique classique et mécanique quantique.

NIVEAU – L3

PRÉ-REQUIS :

- Mécanique du solide
- Effet tunnel
- Algèbre linéaire
- Équation de Schrödinger

## Bibliographie

- [1] J. L. Basdevant. *Douze leçons de mécanique quantique*. Éditions de l'école polytechnique, 2005.
- [2] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Mécanique II : Mécanique du solide et notions d'hydrodynamique*. Dunod, 1989.
- [3] C. Cohen-Tanoudji, B. Diu, and F. Laloë. *Mécanique quantique tome 1*. Hermann, 1995.
- [4] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Ondes PC-PSI*. Hachette, 2000.
- [5] M. Gerl. Système à deux états. *BUP*, 574, 1975.
- [6] M. Le Bellac. *Mécanique quantique*. CNRS Éditions, 2013.

## Introduction [5]

- Décrire un système nécessite de choisir un bon mode de représentation, c'est-à-dire les états qui représentent vraiment la physique du système.
- Depuis l'avènement de la mécanique quantique, quelques idées simples se sont imposées, en particulier l'analyse du couplage.

## 1 Oscillateur à deux degrés de liberté classique : pendules pesants couplés [5, 2, 4]

### 1.1 Un système isolé : le pendule pesant

- Description du système. Équation du mouvement et pulsation propre.
- Solution harmonique générale. Nombre de degrés de liberté (un seul d'espace,  $\theta$ ).

### 1.2 Pendules couplés par un fil de torsion

- Description du système. Nature du couplage. Équation du mouvement.
- Cas où un des pendules est fixé : nouvelle pulsation propre.
- Forme matricielle :  $\theta_s$  et  $\theta_a$ ,  $\omega_s$  et  $\omega_a$ . Diagramme en pulsation (comme en énergie).
- Forme générale des solutions.

### 1.3 Modes propres et battements

- Cas symétrique. Nature des conditions initiales.

EXPÉRIENCE – Montrer le cas symétrique.

- Cas antisymétrique. Nature des conditions initiales et résolution.

EXPÉRIENCE – Mode antisymétrique.

- Cas général : battements. Cas d'un couplage faible.

EXPÉRIENCE – Battements : acquisition et transformée de Fourier. Mise en évidence des deux fréquences.

## 1.4 Aspect énergétique

- Réécrire les équations avec  $\theta_S$  et  $\theta_A$  et mettre en évidence la conservation de l'énergie dans les modes symétriques et antisymétriques.
- Énergie mécanique dans le cas général. Cas d'un mode quelconque. Oscillations des énergies des deux modes : échange d'énergie.

EXPÉRIENCE – Mise en évidence des échanges d'énergie entre les deux modes par calcul numérique, et visuellement.

## 2 Système à deux états en mécanique quantique : la molécule d'ammoniac [1, 3, 6]

### 2.1 Présentation et approximations

- Présentation de la molécule d'ammoniac. Moments possibles. Constatation expérimentale : absence de moment dipolaire.
- On considère la rotation autour de son axe pour différencier les deux états avec inversion de parapluie.
- Définition de la position de la particule fictive. Potentiel et approximation.
- Expliquer le couplage par effet tunnel et écrire l'équation de Schrödinger matricielle.

### 2.2 Résolution

- Diagonaliser l'hamiltonien après avoir défini  $|\psi_G\rangle$ ,  $|\psi_D\rangle$ ,  $|\psi_S\rangle$ , et  $|\psi_A\rangle$ .
- États propres symétriques et antisymétriques.

### 2.3 Battements quantiques

- Évolution dans le temps des fonctions droite et gauche. Battements. Oscillations de Rabi et ordres de grandeur (équation de Schrödinger dépendant du temps).

## Conclusion

- Résumé précis et complet des idées fortes.
- Tableau d'analogies et de différences.
- Vers  $N$  oscillateurs et la matière condensée.

NOTES : Leçon qui peut devenir calculatoire : présenter le système correctement et introduire des ordres de grandeur. Mettre en lumière analogies et différences entre classique et quantique.

## La molécule : stabilité, énergie

**OBJECTIF** – Comprendre l'origine de la stabilité de la liaison chimique, et voir des applications, notamment en spectroscopie.

**NIVEAU** – L3

**PRÉ-REQUIS :**

- Oscillateur harmonique quantique
- Atome d'hydrogène
- Effet tunnel
- Chimie (liaison chimique, réactions)

### Bibliographie

- [1] C. Aslangul. *Mécanique quantique tome 2*. De Boeck, 2012.
- [2] P. Atkins and J. De Paula. *Chimie physique*. De Boeck, 2008.
- [3] É. Biémont. *Spectroscopie moléculaire*. De Boeck, 2008.
- [4] C. Cohen-Tanoudji, B. Diu, and F. Laloë. *Mécanique quantique tome 2*. Hermann, 1993.
- [5] C. Cohen-Tanoudji, B. Diu, and F. Laloë. *Mécanique quantique tome 1*. Hermann, 1995.
- [6] P. Grécias. *Chimie PC-PC\**. Tec&Doc, 2009.

### Introduction [3]

- Familiarité du concept de molécule. Historiquement, son émergence a été difficile.
- Historiquement, réactions des gaz et raies d'absorptions.
- Après l'étude de l'atome d'hydrogène, il est logique de s'intéresser aux molécules.

## 1 La liaison chimique

### 1.1 Énergie chimique et ordres de grandeur [6, 1]

- Définition d'une molécule stable (angles et distances stables dans le temps, fluctuant légèrement autour d'une valeur moyenne).
- Énergie de dissociation : lien avec la stabilité, ordre de grandeur avec  $\Delta_r H^0$ . Énergie de liaison d'une molécule.
- Ordres de grandeur des énergies de rotation, de vibration et électronique (et des longueurs d'onde) : énergie électronique responsable de la cohésion.

### 1.2 Difficulté de la description quantique [1, 5]

- Écriture de l'hamiltonien complet : complexité. Nécessité d'approximations.
- Approximation de Born-Oppenheimer : nature et conséquences : écriture des équations de Schrödinger dans ce cadre.

### 1.3 Origine de la stabilité [4]

- Écriture des valeurs moyennes de l'énergie cinétique et du potentiel : théorème du viriel.
- Augmentation de l'énergie cinétique favorable : délocalisation car l'énergie potentielle compense doublement.
- Lien avec une compétition électrostatique/Heisenberg.

## 2 La théorie CLOA [4, 1, 2]

### 2.1 La molécule $H_2^+$

- Constitution, on ne peut rien dire a priori. Mentionner l'existence d'une solution exacte à ce problème.

- Méthode utilisée ici, plus générale : CLOA.
- Mise en œuvre : déterminant et énergies. Rayon d'équilibre et énergie de dissociation.

## 2.2 Édifices diatomiques : liaison et électrons appariés

- Atomes à plusieurs électrons, dihydrogène : théorie CLOA et principe de Pauli : construction des diagrammes.
- Orbitales atomiques, liaisons  $\sigma$  et  $\pi$ , interprétation en terme d'interférence.
- Application à la construction du diagramme de  $O_2$  et  $N_2$  : dia- et paramagnétisme.

## 3 Caractère dynamique : spectroscopie [5, 4, 1, 3]

- Non destruction des molécules par des petites perturbations.

### 3.1 Perturbation : vibration

- Allure du potentiel et parabolisation. Ordres de grandeur.
- Équation du mouvement classique et pulsation propre. Énergie  $E = h\nu(n + \frac{1}{2})$  correspondante.

### 3.2 Spectroscopie infrarouge

- Dipôle oscillant : on observe les vibrations. Transitions entre deux états quantiques. Molécules polaires.
- Exemples de spectres. Explication qualitative de  $\nu_{C-O} < \nu_{C=O}$ .
- Cas des molécules apolaires : Stokes, Raman.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur une description plus détaillée de la spectroscopie, d'autres types.

NOTES : Leçon testée en fin d'année. Avoir les idées assez claires sur ce que l'on présente, introduire beaucoup d'ordres de grandeur.

# Capacités thermiques : description, interprétations microscopiques

OBJECTIF – Comprendre les origines microscopiques de la capacité calorifique, en particulier les notions de température de gel.

NIVEAU – L3

PRÉ-REQUIS :

- Thermodynamique macroscopique
- Ensemble canonique
- Bases de mécanique quantique

## Bibliographie

- [1] N. W. Ashcroft and N. D. Mermin. *Physique des solides*. EDP Sciences, 2011.
- [2] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Thermodynamique*. Dunod, 1989.
- [3] L. Couture and R. Zitoun. *Physique statistique*. Ellipses, 1992.
- [4] B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, and B. Roulet. *Physique statistique*. Hermann, 2001.
- [5] B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, and B. Roulet. *Thermodynamique*. Hermann, 2007.

## Introduction

- Thermodynamique : échange d'énergie entre un système et l'univers.
- Capacité calorifique : quantifier la quantité d'énergie à apporter pour élever la température (à préciser).
- Propriété fondamentale du corps étudié.

## 1 Définitions et première approche du problème

### 1.1 Définitions [5, 2]

- Description du système (contact avec un thermostat).  $F(T, V, N)$ .
- Définition des capacités calorifiques  $c_P$ ,  $c_V$  et  $l_V$ . Expression du transfert thermique.
- Démonstration de la relation de Mayer généralisée.

### 1.2 Théorème d'équipartition de l'énergie [4, 2]

- Énoncé précis et complet du théorème d'équipartition de l'énergie.
- Démonstration du théorème. Discussion.

### 1.3 Système à deux niveaux [3]

- Introduction générale à la démarche.
- Calculs. Insister beaucoup sur les commentaires des courbes et la description physique.
- Détailler les trois domaines de températures, la notion de température critique et le sens physique de la capacité calorifique.

## 2 Capacités thermiques des gaz

### 2.1 Gaz parfait monoatomique [4, 2, 3]

- Description classique et equipartition. Calcul des deux capacités calorifiques. Lien avec le cours de thermodynamique.

## 2.2 Gaz parfait diatomique [4, 2]

- Description des degrés de liberté de la molécule.
- Degrés de liberté de rotation. Température de gel. Ordres de grandeur.
- La même chose pour la vibration. Description du potentiel, masse réduite et pulsation. Température de gel.
- Allure de la  $c_V$  en fonction de la température.

## 2.3 Résultats expérimentaux et conclusion [5, 2]

- Récapitulatif en lien avec les résultats expérimentaux.
- Limite du modèle et gaz parfaits polyatomiques.

# 3 Capacités thermiques des solides

## 3.1 Constat expérimental de Dulong et Petit [5, 2]

- Exposé de la loi expérimentale de Dulong et Petit.
- Description du solide avec oscillateurs harmoniques. Nombre d'oscillateurs harmoniques et équipartition de l'énergie.
- Limite du modèle.

## 3.2 Modèle d'Einstein (1907) [4, 3]

- Type d'approche (champ moyen). Hypothèse du modèle. Pourquoi un modèle de champ moyen ?
- Fonction de partition et énergie.
- Capacité calorifique, température d'Einstein.
- Description et discussion de la courbe et du modèle. Limites.

## 3.3 Vibrations collectives et modèle de Debye [4, 3, 1]

- Équation du mouvement. Relation de dispersion. Hypothèse.
- Capacité calorifique avec modes normaux.
- Description approchée. Évolution en  $T^3$ . Ordres de grandeur.
- Rôle des porteurs de charges : capacité thermique du gaz d'électrons libres (sans calculs).

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur la description des liquides, assez difficile.

NOTES : Éviter les longs calculs pour détailler le sens physique. Connaître le rôle des porteurs de charge dans la capacité calorifique. Ne pas faire de mesures expérimentales.

## Paramagnétisme, ferromagnétisme : approximations de champ moyen

**OBJECTIF** – Comprendre l'origine physique du magnétisme et construire des modèles pour rendre compte des propriétés macroscopiques des matériaux magnétiques.

**NIVEAU** – L3

**PRÉ-REQUIS :**

- Magnétisme macroscopique
- Équations de Maxwell dans la matière
- Bases de mécanique quantique
- Bases de physique statistique

### Bibliographie

- [1] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Électromagnétisme IV : Milieux diélectriques et milieux aimantés*. Dunod, 1984.
- [2] B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, and B. Roulet. *Physique statistique*. Hermann, 2001.
- [3] R. Feynman, R. Leighton, and M. Sands. *Électromagnétisme tome 2*. Dunod, 2013.
- [4] C. Kittel. *Physique de l'état solide*. Dunod, 2007.
- [5] J. P. Pérez, R. Carles, and R. Fleckinger. *Électromagnétisme, fondements et applications*. Dunod, 2001.
- [6] É. et. al. Trémolet de Lacheisserie. *Magnétisme, tome 1 : Fondements*. EDP Sciences, 1999.

### Introduction [6]

- Aspect historique : attraction magnétique, boussole,... Apport de Pierre Curie (distinction de dia-, para- et ferromagnétisme). Ici, on étudie que le paramagnétisme et le ferromagnétisme.

**EXPÉRIENCE** – Comparer ce que donne un barreau de fer, de bismuth et d'aluminium dans l'entrefer d'un électroaimant.

## 1 Origine microscopique du magnétisme [1, 5]

### 1.1 Aimantation induite

- Phénomène d'aimantation induite. Aimantation. Cas  $\vec{B}_m$  faible et fort,  $\vec{M}$  dans le même sens ou dans le sens contraire.
- Susceptibilité et perméabilité magnétique. Ordres de grandeur.
- Position du problème de l'aimantation induite.

**EXPÉRIENCE** – Modification du champ magnétique en mettant du fer doux dans un solénoïde.

### 1.2 Moment magnétique atomique [3]

- Description classique. Ordres de grandeur. Pourquoi on ne prend pas en compte les protons.
- Problème avec la description classique. Théorème de Van Leewen. Explication qualitative.

### 1.3 Aspect quantique du magnétisme atomique

- Moment magnétique orbital. Moment magnétique de spin. Moment magnétique total. Quantification, projection.
- Énergie potentielle et effet Zeeman.

## 2 Paramagnétisme [1, 5]

### 2.1 Interprétation qualitative du paramagnétisme et calcul

- Absence d'aimantation en l'absence de champ. Spins indépendants.
- Champ magnétique : les configurations ne sont plus équiprobables. Mise en équation avec poids de Boltzmann.

### 2.2 Cas limite - Loi de Curie [4]

- Aimantation à saturation. Atteignable qu'à de petites températures (ordre de grandeur).
- Autre cas limite. Loi de Curie. Susceptibilité magnétique. Ordres de grandeur.
- Mesure de la susceptibilité magnétique d'un ferrofluide : faire le calcul.

EXPÉRIENCE – Apparition d'un dénivelé à la suite de l'application d'un champ magnétique. Si possible, faire une droite.

### 2.3 Application à la désaimantation adiabatique [3]

- Expliquer rapidement le principe, l'intérêt et les conditions à respecter pour la réaliser. Graphique et ordres de grandeur.

### 2.4 Généralisation à des ions magnétiques [4]

- Reprendre la même formule. Ordres de grandeur.

## 3 Ferromagnétisme [1, 5]

- On ne néglige plus les interactions entre spin.

### 3.1 Constatations expérimentales

- Définition d'un corps ferromagnétique. Exemples.

EXPÉRIENCE – Clou. Noter la température. Expliquer le principe de l'expérience.

- Construire un modèle qui rend compte de la différence de comportement observée à cette température critique.
- On se limite à un domaine de Weiss.

EXPÉRIENCE – Observation des domaines de Weiss au microscope polarisant.

### 3.2 Origine microscopique du ferromagnétisme [2, 4, 3]

- Interaction dipolaire : trop faible.
- Interaction d'échange : hamiltonien de Heisenberg. Interaction en fonction de la distance entre atomes.
- Hypothèse de champ moyen. Obtention de l'équation pour l'aimantation. Équation d'autocohérence : propriété du système à champ nul. Température critique.
- Comparaison avec l'expérience. Retour sur l'expérience du clou.

### 3.3 Propriétés en présence de champ extérieur [2, 3]

- Champ extérieur non nul à  $T > T_C$ . Loi de Curie-Weiss.
- Décrire le comportement en dessous de  $T_C$ .

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Nombreuses applications du ferromagnétisme.

NOTES : Leçon assez longue : être rapide et précis. Discuter l'interaction d'échange, la transition de phase.

## Propriétés microscopiques des corps ferromagnétiques

**OBJECTIF** – Décrire le ferromagnétisme, en comprendre les principales caractéristiques pour entrevoir des applications.

**NIVEAU** – L3

**PRÉ-REQUIS :**

- Équations de Maxwell (dans le vide et dans les milieux)
- Milieux magnétiques
- Électrocinétique
- Courants de Foucault, effet de peau

### Bibliographie

- [1] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Électromagnétisme IV : Milieux diélectriques et milieux aimantés*. Dunod, 1984.
- [2] P. Brenders, L. Douchet, and M. Sauzeix. *Électrotechnique et conversion de puissance PSI*. Les nouveaux précis Bréal, 2004.
- [3] C Ray and J. C. Poizat. *La physique par les objets du quotidien*. Belin – Pour la science, 2013.
- [4] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.
- [5] É. Trémolet de Lacheisserie and al. *Magnétisme, tome 2 : Applications*. EDP Sciences, 1999.
- [6] É. et. al. Trémolet de Lacheisserie. *Magnétisme, tome 1 : Fondements*. EDP Sciences, 1999.

### Introduction [6]

- Introduction historique : corps aimantés, vertus extraordinaires.
- Aspect industriel/technologique : moteurs, transformateurs, disques durs, ...

## 1 Caractérisation du ferromagnétisme [2]

### 1.1 Notion d'aimantation

- Aspect historique d'Ampère : boucles de courant liées au milieu. Moment magnétique orbital et de spin.
- Aimantation spontanée et induite. Définition du vecteur aimantation.

### 1.2 Équations de Maxwell dans la matière

- Équations de Maxwell dans la matière avec vecteur aimantation.
- Redémonstration des théorèmes d'Ampère et loi de Faraday.
- Nécessité d'une relation constitutive pour la résolution.

### 1.3 Relation entre aimantation et excitation magnétique

- Milieu magnétique, linéaire, homogène et isotrope. Définition de  $\chi_m$  et  $\mu_r$ . Milieux dia- et paramagnétiques.
- Milieux non linéaires : ferromagnétisme.

### 1.4 Réluctance magnétique [5]

- Notion de reluctance. Lie  $\mathcal{E}$  et  $\Phi$ . Analogie avec un circuit électrique. Un matériau ferromagnétique caractérise les lignes de champ.

## 2 Aimantation d'un corps ferromagnétique [2]

### 2.1 Dispositif expérimental

EXPÉRIENCE – Tracer le cycle d'hystérésis d'un tore de ferrite. Expliquer bien ce que l'on mesure à chaque fois.

### 2.2 Le cycle d'hystérésis [1]

- Tracer le cycle. Observer l'hystérésis, la saturation, le champ coercitif et l'aimantation résonante.
- Caractérisation du ferromagnétisme dur et doux. Exemples et ordres de grandeur.

### 2.3 Interprétation microscopique [1]

- Interprétation en domaine de Weiss.

EXPÉRIENCE – Observation au microscope polarisant des domaines de Weiss.

- Explication du principe. Effet d'un champ magnétique externe. Positions sur la courbe d'aimantation. Origine de l'hystérésis.

### 2.4 Aspect énergétique : les pertes fer

- Calcul des pertes fer complètes avec puissance Joule et puissance due au parcours du cycle.

## 3 Applications du ferromagnétisme

### 3.1 Le transformateur parfait [2]

- Explication du principe. Schéma équivalent.
- Calculs des relations entre courants primaire et secondaire, tensions primaire et secondaire. Bilan de puissance. Discuter le choix du matériau.

EXPÉRIENCE – Transformateur : rapport des tensions et des courants.

- Limite du bilan énergétique.

### 3.2 Le disque dur [3, 4]

- Discuter qualitativement le principe. Codage des bits. Magnétorésistance géante. Ordre de grandeur.

### 3.3 Le paléomagnétisme [6]

- Retournement des champs magnétiques terrestres. Âge des cailloux. Ordres de grandeur.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur les moteurs (macro) et sur la RMN (micro).

NOTES : Leçon assez fixée. Passer assez de temps sur le côté expérimental et les applications.

## Mécanisme de la conduction électrique dans les solides

OBJECTIF – Voir le modèle de Drude pour comprendre la conduction dans les solides et ses limites.

NIVEAU – L3

PRÉ-REQUIS :

- Structure cristalline
- Notion de MQ : équation de Schrödinger, statistiques quantiques
- Électromagnétisme
- Cinétique des gaz

### Bibliographie

- [1] H. Alloul. *Physique des électrons dans les solides. Tome 1 : structure de bandes, supraconductivité et magnétisme*. Les éditions de l'école Polytechnique, 2007.
- [2] N. W. Ashcroft and N. D. Mermin. *Physique des solides*. EDP Sciences, 2011.
- [3] C. Aslangul. *Mécanique quantique tome 2*. De Boeck, 2012.
- [4] P. Atkins and J. De Paula. *Chimie physique*. De Boeck, 2008.
- [5] A. Guinier, É. Guyon, J. Matricon, and C. Taupin. Propriétés électroniques des solides. *BUP*, 550, 1972.
- [6] J. Pérez, É. Bellanger, X. Ducros, V. Renvoizé, and P. Roux. *Physique MPSI-PCSI-PTSI*. Cap prépa – Pearson, 2009.

### Introduction

- On a la loi d'Ohm.

EXPÉRIENCE – Vérification rapide de la loi d'Ohm macroscopique.

- C'est une loi macroscopique pour décrire des phénomènes microscopiques. Modéliser le matériau pour retrouver la loi d'Ohm.

## 1 Mécanisme de la conduction dans les métaux – Modèle de Drude [2]

### 1.1 Hypothèses du modèle de Drude

- Contexte historique. Description de l'atome. Notion de "gaz d'électrons" classique. Configuration électronique du cuivre et ordre de grandeur de la densité volumique d'électrons libres.
- Quatre hypothèses du modèle de Drude.

### 1.2 Mouvement des électrons, conductivité et loi d'Ohm

- Bilan de forces, lien entre  $\vec{p}(t + dt)$  et  $\vec{p}(t)$  : probabilité d'avoir un choc.
- Champ électrique sinusoïdal : relation entre  $\vec{p}(\omega)$  et  $\vec{E}(\omega)$ .
- Expression de  $\vec{j}(\omega)$  puis  $\sigma(\omega)$ .
- Cas statique : expression de la résistance. Ordres de grandeur.

### 1.3 Effet Hall [6]

- Calcul de l'effet Hall. Explications, ordres de grandeur et applications.

EXPÉRIENCE – Effet Hall dans le cuivre.

## 2 Intérêt et limite du modèle de Drude : modèle de Sommerfeld [2]

### 2.1 Conductivité thermique et loi de Wiedemann-Franz [1, 5]

- On admet l'expression de la conductivité thermique. Signaler qu'on peut l'obtenir avec le modèle de Drude et donner le résultat.
- Lien avec l'expérience : constance de  $\frac{\lambda}{\sigma T}$  mais pas les bonnes dépendances.
- Ordres de grandeur et limite du modèle de Drude.

### 2.2 Phénomènes quantiques

- Gaz d'électrons libres : vitesse et énergie de Fermi rapidement traité.
- Approximation dans la statistique de Fermi-Dirac (température nulle). Conductivité électrique.
- Loi de Wiedemann-Franz et ordres de grandeur : OK avec l'expérience.

## 3 Extension du modèle [2, 3, 4]

- Problèmes expérimentaux du modèle de Sommerfeld : la lister.
- Rôle sur la dynamique des électrons de la part des phonons. Commentaires physiques.
- Présentation rapide de la théorie des bandes.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur les semi-conducteurs.

NOTES : Leçon peut-être un peu trop perchée... Bien détailler les hypothèses et limites de chaque modèle.

# Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique

OBJECTIF – Comprendre la généralité du phénomène de résonance, les notions de facteur de qualité et de pulsation propre.

NIVEAU – L3

PRÉ-REQUIS :

- Électrocinétique
- Mécanique du point
- Optique

## Bibliographie

- [1] D. Dangoisse, D. Hennequin, and V. Zehnlé. *Les lasers*. Dunod, 2004.
- [2] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Ondes PC-PSI*. Hachette, 2000.
- [3] S. Houard. *Optique*. De Boeck, 2011.
- [4] S. Olivier. *Physique des ondes - Électromagnétisme et optique*. Tec&Doc, 1995.
- [5] J. Pérez, É. Bellanger, X. Ducros, V. Renvoizé, and P. Roux. *Physique MPSI-PCSI-PTSI*. Cap prépa – Pearson, 2009.
- [6] J. P. Pérez. *Mécanique, fondements et applications*. Dunod, 2001.
- [7] J. P. Roux. Expérience de melde. *BUP*, 851, 2003.
- [8] M. N. Sanz, A. E. Badel, and F. Clausset. *Tout-en-un MPSI-PCSI-PTSI*. Dunod, 2008.
- [9] M. N. Sanz and B. Salamito. *Tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2009.
- [10] R. Taillet. *Optique physique*. De boeck, 2006.
- [11] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

## Introduction [11]

- Phénomène de résonance : très général. On les rencontre partout : quartz, marées, instruments de musique, etc.
- Applications et problèmes nombreux.
- Uniquement cas linéaire.

## 1 Oscillateur à un degré de liberté [5]

### 1.1 Mise en équation [8]

- Position du problème. Loi des mailles et mise en équation.
- Régime sinusoïdal forcé, au-delà du régime transitoire.
- Grandeurs adimensionnées :  $Q$ ,  $u$ .

### 1.2 Résonance en tension

- Étude en module. Résonance en tension. Condition de résonance.
- Transfert maximal au condensateur / pas au système. Facteur de qualité.
- Intérêt malgré tout et analogie avec la mécanique.

### 1.3 Résonance en intensité et en puissance

- Amplitude complexe. Résonance à  $\omega$ . Facteur de qualité.
- Puissance au système (RLC). Définition de la résonance.
- Acuité de la résonance et analogie mécanique.

## 2 Oscillateurs à plusieurs degrés de liberté [6, 4, 2]

- Couplage des deux oscillateurs mécaniques : position du problème.
- Recherche de modes propres.
- Résonance et anti-résonance.

EXPÉRIENCE – Expérience des pendules couplés.

## 3 Cavités résonantes

### 3.1 Corde de Melde [9, 7]

- Rappel de l'équation de d'Alembert.
- Conditions aux limites et modes propres. Infinité de modes propres (peut être éventuellement vu comme une infinité de degrés de liberté).

EXPÉRIENCE – Pulsations de résonance.

- Acuité de la résonance : pas d'amplitude au voisinage de la résonance.

### 3.2 Cavité Fabry-Pérot [10, 1, 3]

- Calcul du déphasage puis de l'intensité en interférence d'ondes.
- Introduire la notion de finesse et de facteur de qualité.
- Application au laser : approche système bouclé.

EXPÉRIENCE – Cavité Melles-Griot.

## Conclusion

- Tableau récapitulatif sur la notion de résonance.
- Généralité de tous les phénomènes.

NOTES : Leçon pas trop difficile. Faire ressortir les propriétés communes. BUP 721 !!

## Oscillateurs, portraits de phase et non-linéarités

OBJECTIF – Entrevoir les principales caractéristiques du non-linéaire, les moyens de l'étudier et ses implications.

NIVEAU – L3

PRÉ-REQUIS :

- Mécanique du point
- Électrocinétique
- Polarisation dans les diélectriques

### Bibliographie

- [1] P. Brasselet. *Mécanique MPSI-PCSI*. Presses universitaires de France, 2000.
- [2] R. Duffait. étude expérimentale des oscillateurs mécaniques. *BUP*, 867, 2004.
- [3] C. Garing. *Milieux diélectriques*. Ellipses, 1995.
- [4] M. Krob. *Électronique expérimentale*. Ellipses, 2002.
- [5] M. Soutif. *Vibrations, propagation, diffusion*. Dunod, 1978.
- [6] S. H. Strogatz. *Nonlinear dynamics and chaos*. Westview Press, 1994.
- [7] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

### Introduction

- La linéarité, vue jusqu'ici est une exception.
- Non-linéarité : souvent absence de solutions analytiques.
- Comment passer de l'un à l'autre ? Nouveaux outils.
- Système 2D dans l'espace des phases (à 1D, pas d'oscillations ; à 3D, trop compliqué)

## 1 Notion de portrait de phase – Pendule pesant [1, 2, 6]

### 1.1 Oscillateur harmonique

- Équation du mouvement. Linéarité des équations.
- Intégrale première du mouvement. Aspect énergétique. Graphique.

### 1.2 Portrait de phase

- Définition et propriétés (trajectoires qui ne se coupent pas, trajectoires fermée, sens de parcours, tangentes).
- Tracé du portrait de phase. Cas d'un amortissement. Point fixe.

### 1.3 Le pendule

- Équation du mouvement. Intégrale première et aspect énergétique.
- Dessin du portrait de phase en lien avec le potentiel.
- Différents domaines (rotation, libration, séparatrice).

EXPÉRIENCE – Illustrations expérimentales des trajectoires. Portraits de phase. Observer la perte d'isochronisme à l'oscilloscope.

## 2 Génération d'harmoniques

### 2.1 Cas du pendule pesant [1, 2, 6]

- Développement limité du potentiel. Recherche de l'harmonique à  $3\omega$ .
- (Résolution la moins calculatoire possible.) Formule de Borda.
- Spectres des trajectoires.

EXPÉRIENCE – Illustration à l'oscilloscope.

### 2.2 Anharmonicité du potentiel et doublement de fréquence [3]

- Hypothèse : électron élastiquement lié avec développement du potentiel poussé plus loin.
- Équations du mouvement : approche perturbative. Génération d'harmoniques.
- Application : laser YAG. Ordres de grandeur.

## 3 Oscillateurs auto-entretenus [4, 5, 6]

### 3.1 Équation de Van der Pol [7]

- Donner l'équation de Van der Pol et montrer le circuit.
- Importance historique de l'équation de Van der Pol.

ILLUSTRATION – Quelques résolutions numériques.

### 3.2 Oscillations quasi-sinusoïdales

- Portrait de phase. Importance des non-linéarités. Croissance des oscillations : ordres de grandeur.
- Attracteur et cycle limite.
- Phénomènes non-linéaires faibles.

EXPÉRIENCE – Réalisation expérimentale.

### 3.3 Oscillations de relaxation

- Portrait de phase. Non-linéarité prépondérante ( $\mu$  grand). Calcul de la période des oscillations.

EXPÉRIENCE – Réalisation.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur le chaos.

EXPÉRIENCE – Double-puit mécanique.

NOTES : S'entraîner à faire des beaux dessins.

Deuxième partie  
Leçons de chimie

## **Agir en fonctionnaire de l'Etat, de façon éthique et responsable.**

Le professeur doit posséder plusieurs compétences, au nombre de dix. La première d'entre elles, commune à tous les fonctionnaires, est intitulée "Agir en fonctionnaire de l'Etat, de façon éthique et responsable". Il ne faut pas parler des autres compétences, comme l'organisation du cours, l'évaluation, le travail en classe,...

Quelques définitions à rappeler en introduction : Fonctionnaire de l'Etat : Agent remplissant une fonction publique fixée par l'état. En France, il est recruté sur concours. Ethique : Qui régit la morale, le comportement individuel. Responsabilité : Que le professeur a l'obligation légale de faire.

La compétence "Agir en fonctionnaire de l'Etat, de façon éthique et responsable est déclinée en plusieurs connaissances, capacités et attitudes, rappelées dans les deux livres traitant de cette épreuve.

Cette épreuve doit être réalisée en lien avec la leçon réalisée, et non pas de manière trop générale. Chaque partie détaillée ci-dessous devra être adaptée au titre.

- Rappeler également en introduction ce qui a été fait au cours de la leçon.
- Écrire les idées directrices et le titre des grandes parties au tableau (de façon à le remplir, sans l'effacer).
- Autant que possible, se placer dans l'action (titre des parties commençant par des verbes à l'infinitif, emploi de la première personne).
- Ne pas avoir un discours passe-partout.
- Connaître un peu le fonctionnement de l'éducation nationale, les droits et devoirs d'un professeur, son rapport au chef d'établissement, aux techniciens,...

### **1 Sécurité en laboratoire**

On inscrit cette partie dans le développement de la connaissance n°5 : "Connaître les grands principes du droit de la fonction publique et le code de l'éducation, les lois et les textes réglementaires en relation avec la profession exercée, les textes relatifs à la sécurité des élèves et à la sûreté." et éventuellement l'attitude n°3 : "Respecter dans sa pratique quotidienne les règles de déontologie liées à l'exercice du métier de professeur dans le cadre du service public d'Éducation Nationale."

On rappelle dans cette partie les pictogrammes des produits présentant un risque qui ont été utilisés pendant la leçon. On rappelle également les règles de sécurité : le port de gants, les lunettes de sécurité, de la blouse.

Même si il n'y a que le professeur qui exécute les expériences et non les élèves (dans le cas de certaines expériences un peu risquées), il y a également des règles de sécurité à prévoir.

On insiste sur le fait que ces règles doivent être respectées, mais que la peur des risques ne doit pas empêcher les élèves de manipuler.

La responsabilité du fonctionnaire conduit également le professeur à sensibiliser les élèves au respect du matériel utilisé, de la verrerie.

Le fonctionnaire "connaît les enjeux actuels du pays"(connaissance n°4). On sensibilise donc (si on ne parle pas de développement durable et de recyclage dans une partie ultérieure) les élèves au recyclage des produits. On peut parler de la persistance des métaux lourds dans l'environnement due à leur présence dans tous les maillons de la chaîne alimentaire (catastrophe de Minamata).

On peut faire la transition sur l'exposition prolongée à des produits dangereux en rapport avec l'invitation d'un professionnel.

### **2 Rencontre avec un professionnel**

Le professionnel peut être un ingénieur, un chercheur, un pharmacien (venant de l'industrie), à voir en fonction de la leçon.

On inscrit cette partie dans le cadre de la connaissance n°3 : "Connaître les mécanismes économiques et les règles qui organisent le monde du travail et de l'entreprise." et des connaissances n°9 et 10 : "Connaître les règles de fonctionnement de l'école ou de l'établissement" et "Connaître l'organisation administrative et budgétaire des écoles et des EPLE".

Le but de cette conférence est de développer chez les élèves une culture scientifique, et les problématiques posées chez des professionnels qui utilisent leurs connaissances scientifiques quotidiennement.

Pour organiser cette conférence, il faut obtenir l'aval du chef d'établissement. Si un financement est à prévoir, il faut s'occuper du financement en obtenant une subvention de la région, ou une contribution volontaire des familles (tout le monde doit être en mesure d'assister à la conférence).

Il faut aussi prévenir les autres professeurs pour voir si cette conférence les intéresse pour leur classe, pour éviter que le professionnel ne s'exprime que devant ma classe.

Une fois ces conditions réunies, il faut obtenir un créneau horaire qui convient à tous et une salle de taille suffisante auprès du chef d'établissement.

Un travail préparatoire doit être distribué aux élèves pour qu'ils aient les connaissances nécessaires pour comprendre le propos du professionnel, et poser des questions pertinentes. Un compte-rendu doit également être rendu par les élèves peu après la conférence.

La venue de ce professionnel peut également être l'occasion de voir un parcours universitaire et professionnel. Sa venue sera également l'occasion de construire ou de préciser un projet professionnel pour les élèves. Cette démarche s'inscrit dans la connaissance n°6 : "Connaître le système éducatif, ses acteurs et ses dispositions spécifiques." Le professeur doit également éclairer les élèves dans leur orientation.

### 3 Interdisciplinarité

On introduit cette partie en lien avec un hypothétique projet d'établissement dont le thème est à moduler.

#### 3.1 Avec la biologie

On inscrit cette partie dans le cadre de la capacité n°4 : "Être capable de repérer les signes traduisant des difficultés spécifiques des élèves dans le domaine de la santé, des comportements à risques, de la grande pauvreté ou de la maltraitance".

Le projet d'établissement viserait à sensibiliser les élèves aux conduites à risques (tabac, alcool, drogues). Cela peut se faire en lien avec le professeur de SVT.

On peut insister aussi sur la nécessité d'avoir une bonne hygiène de vie, de pratiquer un sport (un des thèmes du programme de physique-chimie de seconde est le sport).

Cela s'inscrit aussi dans le cadre de la connaissance n°12 : "Connaître le projet d'établissement d'exercice." Cela peut-enfin donner lieu à une étude documentaire à ce propos.

#### 3.2 Avec l'anglais

##### Niveau lycée

Cela peut s'inscrire dans une démarche internationale, en particulier l'attitude n°6 : "Collaborer à la réalisation d'actions de partenariat entre l'établissement et son environnement économique, social et culturel".

On peut en effet imaginer le jumelage de la commune où se situe l'établissement avec une ville en Angleterre, pour coopérer à la réalisation d'un projet commun. Cela permettrait de sensibiliser les élèves au caractère international de la science, et sur la nécessité de maîtriser au moins l'anglais et si possible d'autres langues étrangères.

Cela se réalise bien sûr en association avec les professeurs de langue correspondants.

##### Niveau CPGE

On inscrit cela dans la réalisation de la partie D de l'épreuve de TIPE : l'Analyse de Documents Scientifiques (ADS). Le document que les élèves vont étudier sera rédigé en anglais, il est extrait des grandes revues américaines (Science par exemple).

Cela peut également servir de travail préparatoire à la venue de l'ingénieur prévue dans la partie précédente.

On insiste encore ici sur la nécessité de la maîtrise de l'anglais dans leur futur métier, de cadre, d'ingénieur ou de chercheur.

#### 3.3 Avec l'histoire

Cette partie s'inscrit également dans le cadre de l'attitude n°6 : "Collaborer à la réalisation d'actions de partenariat engagées entre l'établissement et son environnement économique, social et culturel."

On réalise ce projet pour sensibiliser les élèves à l'histoire des sciences (LC08 : Biographie de Haber, BUP 874, lien en éthique et science) et le lien avec l'histoire. On peut aussi parler de l'avancée progressive, irrégulière, avec des reculs, de la science au cours de l'Histoire.

La chimie peut également jouer un rôle dans l'étude des œuvres d'art (caractérisations par spectroscopie).

### 4 Recyclage, développement durable et chimie verte

Cette partie s'insère dans le cadre de la connaissance n°4 : "Connaître la politique éducative de la France, les grands traits de son histoire et ses enjeux actuels".

On rappelle dans les grandes lignes le principe du développement durable, cause de la chimie verte, et comment cette dernière s'inscrit dans les enjeux actuels.

On cherche également à éveiller la conscience citoyenne des élèves, en les sensibilisant à la nécessité de ne pas gaspiller, de recycler.

On peut citer aussi la problématique du recyclage des médicaments avec le réflexe Cyclamed (2009). Cette partie s'inscrit également dans l'attitude n°7 : "Prendre en compte la dimension civique de son enseignement".

## 5 Portes ouvertes

Cette partie s'inscrit dans la capacité n°3 : "Participer à la vie de l'école". Le but de cette partie est de donner une expérience de l'expression orale, en présentant ce qu'il ont appris à un public le plus large possible, de façon claire. Cette maîtrise de l'expression orale est nécessaire dans leur futur métier (surtout en CPGE), où les élèves devront exposer leur travaux, parfois à des non-spécialistes, nécessitant d'allier rigueur scientifique et pédagogie.

Il faut également organiser une séance de préparation des portes ouvertes. Le professeur "connaît l'organisation administrative de son établissement" (connaissance n°9) : cette séance sera donc organisée avec l'aval du chef d'établissement, conformément à la réglementation en vigueur.

Enfin, l'organisation de cette journée portes ouvertes permet de vulgariser auprès d'un large public, donc de valoriser la science auprès du public. En effet, la chimie a parfois une mauvaise image, il faut donc montrer que la chimie, comme toute science, doit être pratiquées avec des principes éthiques.

## 6 Visite à l'extérieur

Cela constitue une variante de la partie 2. De la même manière, elle se situe dans le cadre de la connaissance n°3 : "Connaître les mécanismes économiques, les règles qui organisent le monde du travail et de l'entreprise".

Il est préférable de prévenir d'autres professeurs pour pouvoir remplir un bus et faire des économies concernant le transport.

Il faut commencer par prévenir le chef d'établissement pour convenir d'un plan de financement qui sera soumis au vote du Conseil d'Administration de l'EPL (ODG si on vous demande : quelques milliers d'euros). Si la sortie ne peut être financée complètement par l'EPL, on peut créer un mécanisme de contribution volontaire, permettant à tous les élèves de venir à la sortie. Ces démarches s'inscrivent dans le cadre des connaissances n°9 et 10 : "Connaître l'organisation administrative et budgétaire des écoles et des EPL" et "Connaître les règles de fonctionnement de l'école ou de l'établissement".

Un travail préparatoire permettra de préparer la visite, afin de permettre aux élèves de comprendre ce qu'il vont voir et de poser des questions pertinentes. Un compte-rendu sera également rendu peu après la visite par les élèves.

Les questions d'orientation pourront également être abordées avec les intervenants au cours de la visite.

Vérifier également l'accessibilité du site aux handicapés si nécessaire.

## Chimie et couleur (L)

**OBJECTIF** – Comprendre l'origine de la couleur dans les espèces chimiques, et le principe de l'indicateur coloré.

**NIVEAU** – Terminale

**PRÉ-REQUIS :**

- Formule topologique
- Liaisons simples et doubles
- Acido-basicité et pH-métrie
- Réaction chimique
- Notion de complexation

### Bibliographie

- [1] S. Antczak, J. F. Le Maréchal, and al. *Microméga Physique-Chimie Première S : Programme 2011*. Hatier, 2011.
- [2] X. Bataille and al. *Physique-Chimie Première S : Programme 2011*. Belin, 2011.
- [3] N. Coppens and al. *Sirius Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Nathan, 2012.
- [4] A. Durupthy, M. Barde, and al. *Physique-Chimie Première S : Programme 2011*. Hachette, 2011.
- [5] A. Durupthy, M. Bigorre, and al. *Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Hachette, 2012.
- [6] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.
- [7] J. F. Le Maréchal and B. Nowak-Leclercq. *La chimie expérimentale : tome 1. Chimie générale*. Dunod, 2004.

### Introduction

- Utilisation très courante des pigments et des colorants (teintures, peintures,...)
- Importance dans la nature mais aussi dans les techniques, tant historiques qu'actuelles.

## 1 Origine de la couleur et absorption de la lumière

### 1.1 Matière colorée et absorption de la lumière [2]

- Deux types de molécules dites colorées : colorants et pigments.
- Radiations absorbées par les molécules : origine de la couleur.

**EXPÉRIENCE** – Spectre d'absorption du permanganate de potassium avec l'utilisation d'une lampe QI et d'un réseau.

### 1.2 Absorbance et loi de Beer-Lambert [1]

- Définition de l'absorbance et loi de Beer-Lambert. Condition d'application.

### 1.3 Application à un dosage [1, 2, 4]

- Étalonnage du spectrophotomètre avec solutions de  $\text{FeCl}_3$ . Puis avec le vin. Échelle de teinte.

**EXPÉRIENCE** – Réalisation de ce dosage. [7]

- Explication du protocole.

### 1.4 Origine microscopique de la couleur [6, 4, 1]

- Groupements conjugués. Groupements auxochromes et chromophores.

## 2 Synthèse d'un indicateur coloré [6, 5, 3]

### 2.1 Synthèse de l'hélianthine

EXPÉRIENCE – Synthèse de l'hélianthine. Filtration devant le jury.

- Explication de la synthèse. Équation de réaction. Origine de la couleur.

### 2.2 Influence du pH

- On montre le changement de couleur.
- Définition d'un indicateur coloré acido-basique.

### 2.3 Titrage acido-basique

- Explication du principe. Contraintes (zone de virage, petite quantité pour ne pas fausser le titrage).

EXPÉRIENCE – Titrage colorimétrique avec suivi pH-métrique (titrage base faible par acide fort pour être dans la zone de virage).

- Autres indicateurs colorés.

## Conclusion

- Origine de la couleur, quantification de l'absorption (absorbance), synthèse d'un indicateur coloré.
- Dosage par étalonnage et dosage par titrage.
- Beaucoup de molécules colorées.

NOTES : Bien tester la synthèse de l'hélianthine avant. Savoir faire fonctionner le programme de spectro. Être clair et pédagogique dans la progression.

## Stéréochimie (L)

**OBJECTIF** – Comprendre l'importance de la représentation spatiale et apprendre plusieurs moyens de la décrire.

**NIVEAU** – Terminale

**PRÉ-REQUIS :**

- Acido-basicité
- Formule topologique
- Chromatographie sur couche mince
- Banc Kofler
- Représentation de Lewis
- Liaison hydrogène, interaction de Van der Waals

### Bibliographie

- [1] S. Antczak, J. F. Le Maréchal, and al. *Microméga Physique-Chimie Première S : Programme 2011*. Hatier, 2011.
- [2] S. Antczak, J. F. Le Maréchal, and al. *Microméga Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Hatier, 2012.
- [3] X. Bataille and al. *Physique-Chimie Première S : Programme 2011*. Belin, 2011.
- [4] N. Coppens and al. *Sirius Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Nathan, 2012.
- [5] A. Durupthy, M. Barde, and al. *Physique-Chimie Première S : Programme 2011*. Hachette, 2011.
- [6] A. Durupthy, M. Bigorre, and al. *Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Hachette, 2012.
- [7] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.
- [8] R. Vento. *Physique-Chimie Terminale ST2S*. Bordas, 2009.

### Introduction

- On a vu que les atomes s'arrangent en molécules plus stables, et différents moyens de cette représentation : formule développée, semi-développée et topologique.

**EXPÉRIENCE** – On fait sentir les deux stéréoisomères de la carvone.

- Même formule développée.
- Importance de la notion d'isomères. Maintenant on va voir l'importance de l'agencement des atomes dans l'espace.

## 1 Comment représenter spatialement les molécules organiques [6, 4]

### 1.1 La chiralité

- Constatation : certains objets ne sont pas superposables à leur image dans un miroir.

**ILLUSTRATION** – Le montrer sur des objets du quotidien, puis sur des modèles moléculaires.

- Définition de la chiralité. Condition nécessaire de chiralité (absence de plan et de centre de symétrie).

### 1.2 Insuffisance de la formule semi-développée

**ILLUSTRATION** – La montrer sur une molécule ayant un carbone asymétrique.

- Représentation de Cram pour rendre compte de la structure 3D sur une feuille de papier ou un tableau.

### 1.3 Notion de stéréoisomérisation

- Définition de la stéréoisomérisation. Deux types de stéréoisomères (Z/E, R/S) développés dans la suite. Lien avec les modèles moléculaires.

## 2 Carbone asymétrique [6, 4]

### 2.1 Notion de carbone asymétrique

- Définition. Lien avec la chiralité. Insuffisance en chimie organique. Existence de deux stéréoisomères. Définition du terme d'énantiomères. Propriétés physiques des énantiomères.

ILLUSTRATION – Avec des modèles moléculaires ou avec ChemSketch. Faire le lien avec la carvone.

### 2.2 Atomes à deux carbones asymétriques

- Montrer sur des modèles moléculaires. Définition des diastéréoisomères.
- Lien avec les propriétés physiques et chimiques.

EXPÉRIENCE – Température de fusion de deux stéréoisomères de l'acide tartrique au banc Kofler.

### 2.3 Importance en chimie du vivant [2, 8]

- Chiralité des acides aminés. Lien avec la chiralité des protéines et des enzymes.
- Importance dans la synthèse des médicaments.
- Lien avec l'expérience introductive.

## 3 Stéréoisomérisation Z/E [3, 6, 5]

### 3.1 Définition

ILLUSTRATION – Montrer sur des modèles moléculaires la différence.

- Origine de la différence (absence de rotation autour de la liaison double).
- Définition. Représentation dans le plan.

### 3.2 Comparaison des propriétés physiques et chimiques des deux stéréoisomères Z/E [7]

- Formules topologiques de l'acide maléique et fumarique.

EXPÉRIENCE – – Titration de l'acide maléique et de l'acide fumarique.

- Températures de fusion des deux espèces.

- Expliquer chaque fait expérimental. Conclure.

### 3.3 Compréhension du processus de la vision

- Formule du E-rétinal. Modélisation par l'azobenzène. Action de la lumière UV et conclusion.

EXPÉRIENCE – Inversion photochimique de l'azobenzène [1].

## 4 Stéréoisomérisation de conformation [6, 4]

### 4.1 Introduction

- Définition. Le montrer sur le modèle moléculaire de l'éthane.
- Aspect énergétique.

## 4.2 Conformation des molécules biologiques

- Conformation de l'ADN et des enzymes. Importance de la température. Lien avec les parties précédentes.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes. Schéma et conclusion du Durupthy.
- Importance en biologie, en synthèse organique.

NOTES : Utiliser aussi ChemSketch (pas seulement des modèles moléculaires).

## Solubilité (L)

OBJECTIF – Étudier le phénomène de solubilité et sa dépendance en fonctions des paramètres expérimentaux (température, composition).

NIVEAU – Terminale

PRÉ-REQUIS :

- Loi d'action des masses
- Liaisons intermoléculaires
- Conductimétrie
- Acide-base, pH

### Bibliographie

- [1] S. Antczak, J. F. Le Maréchal, and al. *Microméga Physique-Chimie Première S : Programme 2011*. Hatier, 2011.
- [2] A. Durupthy, M. Barde, and al. *Physique-Chimie Première S : Programme 2011*. Hachette, 2011.
- [3] A. Durupthy, M. Bigorre, and al. *Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Hachette, 2012.
- [4] B. Fosset and J. B. Baudin. *Chimie tout-en-un PCSI*. Dunod, 2013.
- [5] P. Grécias and S. Rédoglia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [6] J. F. Le Maréchal and B. Nowak-Leclercq. *La chimie expérimentale : tome 1. Chimie générale*. Dunod, 2004.
- [7] F. Porteu de Buchère. *L'épreuve orale du CAPES de chimie*. Dunod, 2008.
- [8] V. Prévost and al. *Sirius Physique-Chimie Première S : Programme 2011*. Nathan, 2011.
- [9] J. L. Vignes, T. Di Constanzo, S. Bouquet, and D. Fertou. Une vie d'aluminium. *BUP*, 790-791, 1997.

### Introduction [4, 2, 8, 1]

- Expériences de la vie courante (café, sel), industrie (dentifrice), médical ( $\text{BaSO}_4$ ) : notion de solubilité.
- Étudier ce phénomène et observer sa dépendance en fonction de différents paramètres (température, composition de la solution) et du type de molécules.

## 1 Notion de solubilité

### 1.1 Introduction [5, 2, 8, 1]

- La notion de solubilité concerne les trois états de la matière.

EXPÉRIENCE – Dissolution du sel (cristal ionique), du sucre (cristal moléculaire), de l'éthanol (liquide). Acide chlorhydrique (dissolution d'un gaz).

- Définition de la solubilité. Commentaires. Définition de la saturation.

### 1.2 Solubilisation de composés ioniques [4, 8]

EXPÉRIENCE – Dissolution de  $\text{NaCl}$  dans l'eau. Mise en évidence de  $\text{Na}^+$  à la flamme, de  $\text{Cl}^-$  par précipitation de  $\text{AgCl}$ .

- Aspect microscopique de la dissolution. Rappel de la polarité de l'eau. Dissolution d'un composé ionique dans l'eau : étapes.
- Écriture de la réaction : bilan de dissolution.

### 1.3 Dissolution de composés moléculaires [5, 4, 2]

EXPÉRIENCE – Mélange d'éthanol et d'eau, de propan-1-ol et d'eau puis de butan-1-ol et d'eau. Comparaisons.

- Explications : liaisons hydrogènes, liaison de Van der Waals. Rappeler en quoi consistent ces interactions.

EXPÉRIENCE – Dissolution d'un soluté apolaire : le diiode. Tube à essai de cyclohexane, d'eau. Ajout de diiode et on agite. On peut aussi faire  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{KI}$ ,  $\text{I}_2$ , le bleu de méthylène et ainsi comparer.

- Le semblable dissous le semblable.

## 1.4 Retour sur les composés ioniques : produit de solubilité [5, 6]

- Écriture de la réaction. Quotient de réaction. Produit de solubilité. Dépendance en fonction de la température uniquement. Ordres de grandeur.
- Lien entre la solubilité dans l'eau pure et le produit de solubilité (cas de  $\text{CaSO}_4$ ).

EXPÉRIENCE – Mesure de la solubilité de  $\text{CaSO}_4$  par conductimétrie.

## 2 Influence de la température sur la solubilité

Deux effets : cinétique et thermodynamique.

### 2.1 Plusieurs cas [7, 6]

- Réaction exothermique (rappel de la définition). Toujours dans le cas des gaz.
- Réaction endothermique. Cas de certains solides.
- Réaction athermique. Cas du sel.

### 2.2 Application à la recristallisation [7, 3]

EXPÉRIENCE – Recristallisation de l'acide benzoïque au bec bunsen.

- Importance de la recristallisation.
- Réalisation idéale (en principe, pas au bec bunsen mais à reflux).

## 3 Influence du pH sur la solubilité [9]

- On peut agir dessus facilement. Les métaux sont souvent présents à l'état naturel sous formes d'oxydes impurs, d'où l'intérêt de cette étude.

### 3.1 Réactions de précipitation [5]

EXPÉRIENCE – – Dans une solution de  $\text{Al}^{3+}$ , ajout d' $\text{HO}^-$ , précipité, ajout encore, redissolution. pH d'apparition et de disparition.  
– Dans une solution de  $\text{Fe}^{2+}$  ajout d' $\text{HO}^-$ , précipité, ajout encore, il ne se passe plus rien. pH d'apparition.

- Explication théorique des deux expériences. Conclusion sous formes de diagramme et intérêt : précipitation sélective.

### 3.2 Séparation des composés de la bauxite

EXPÉRIENCE – On utilise la bauxite reconstituée.

## 4 Limite de solubilité et effet d'ion commun [5]

EXPÉRIENCE – Solubilité de  $\text{CaSO}_4$  dans une solution de sulfate de cuivre.

- Calcul de la nouvelle solubilité.

## Conclusion

- On résume ce qui a été dit, influences multiples sur la solubilité. Autres effets (pression sur la solubilisation d'un gaz).
- Ouverture sur l'intérêt en chimie organique (recristallisation), pour le développement durable.

NOTES : On peut enlever certaines parties en fonction du temps restant. Avoir à l'esprit le programme de STL spé SPCL. Ne pas aller trop vite (leçon niveau lycée).

## Conversion d'énergie chimique (L)

OBJECTIF – Illustrer le principe de plusieurs modes de conversion et leur importance technologique.

NIVEAU – Première

PRÉ-REQUIS :

- Notion de thermochimie
- Oxydoréduction
- Chimie organique : hydrocarbures, esters.

### Bibliographie

- [1] J. L. Azan and al. *Physique-Chimie Terminale STI2D/STL*. Nathan, 2012.
- [2] S. Bach, F. Buet, and G. Volet. *CAPES de sciences physiques, tome 2 : Chimie*. Belin, 2006.
- [3] M. Blanchard-Desce. *Chimie organique expérimentale*. Hermann, 1997.
- [4] A. Durupthy, M. Barde, and al. *Physique-Chimie Première S : Programme 2011*. Hachette, 2011.
- [5] B. Fosset, J. B. Baudin, F. Lahitète, and V. Prévost. *Chimie tout-en-un PCSI*. Dunod, 2005.
- [6] P. Grécias and S. Rédoglia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [7] J. F. Le Maréchal and B. Nowak-Leclerq. *La chimie expérimentale : tome 1. Chimie générale*. Dunod, 2004.
- [8] V. Prévost and al. *Sirius Physique-Chimie Première S : Programme 2011*. Nathan, 2011.

### Introduction

- Société industrialisée : beaucoup de besoin d'énergie (transport, chauffage, loisirs,...)
- Nature variable de la consommation (ex : chauffage) et de la production (ex : solaire ou éolien). Nécessité d'énergie transportable (automobile) : stockage.
- Utilisation de l'énergie chimique pour ce stockage.
- Diagramme de conversion d'énergie. Choix réalisés.

## 1 Combustion [8, 4]

### 1.1 Réaction de combustion [5]

- Combustion complète et incomplète. Réaction de combustion complète. Exemple.
- Aspect énergétique. Enthalpie standard de combustion.

EXPÉRIENCE – Mesure d'une énergie molaire de combustion. [7, 1]

### 1.2 Combustibles usuels et nouveaux combustibles [1]

- Exemple de la biomasse, du charbon, du pétrole.
- Nouveaux carburants. Réaction d'obtention. Synthèse de biocarburants.

## 2 Piles [4, 6, 7]

### 2.1 Oxydoréduction et transfert d'électricité

- Les réactions d'oxydoréduction mettent en jeu des couples. Potentiels.

EXPÉRIENCE – Oxydation de Zn par  $\text{Cu}^{2+}$  [7].

- Exemple de transfert direct d'électrons.

EXPÉRIENCE – Construction d'une pile Daniell. [7]

## 2.2 Étude d'une pile

EXPÉRIENCE – On étudie la pile Daniell.

- Distinction des deux demi-piles. Réactions aux électrodes. Anode et cathode. Polarité. Réaction de fonctionnement. Principe du pont salin.
- Force électromotrice et résistance interne.

## 3 Stockage d'énergie chimique : accumulateurs [2, 7]

### 3.1 L'accumulateur au plomb

- Définition d'un accumulateur. Explication du principe de l'accumulateur au plomb.

EXPÉRIENCE – Décharge puis charge de l'accumulateur au plomb. Comparaison en ordre de grandeur des deux temps. Force électromotrice. [7]

- Bilans de charge et de décharge.
- Aspect industriel.

### 3.2 Les accumulateurs aujourd'hui

- Accumulateur alcalin.
- Avenir potentiel : la pile à combustible.

EXPÉRIENCE – Pile à combustible de démonstration.

## Conclusion

- On a vu plusieurs types de conversion d'énergie chimique : résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur la chimiluminescence, l'importance dans les enjeux industriels.

EXPÉRIENCE – Chimiluminescence. [3]

NOTES : On peut traiter plus succinctement les accumulateurs si on manque de temps. Savoir ce qu'est la chimiluminescence si on en parle. Parler des enjeux actuels.

## Séparations, purifications, et contrôle de pureté (L)

OBJECTIF – Terminale STL

NIVEAU – L3

PRÉ-REQUIS :

- Solubilité
- Van der Waals
- Réaction acido-basiques
- Constantes d'équilibre
- Molécules organiques

### Bibliographie

- [1] X. Bataille, J. M. Parisi, and al. *Physique-Chimie Seconde : Programme 2010*. Belin, 2010.
- [2] A. Durupthy, Durandeau J. P., and al. *Physique-Chimie Terminale S : Programme 2002. Enseignement de spécialité*. Hachette, 2002.
- [3] P. Grécias and S. Rédoglia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [4] L. Heinrich and A. Heinrich. Exemple de tp d'investigation : extraction de l'eugénol du clou de girofle par hydrodistillation. *BUP*, 939, 2011.
- [5] H. Lauron, J. M. Mallet, H. Mestdagh, C. Rolando, J. N. Verpeaux, and G. Ville. Des substances naturelles aux produits chimiques. *BUP*, 695, 1987.
- [6] F. Porteu de Buchère. *L'épreuve orale du CAPES de chimie*. Dunod, 2008.
- [7] A. Tommasino and al. *Physique-Chimie Terminale S : Programme 2002. Enseignement de spécialité*. Nathan, 2002.
- [8] J. L. Vignes, T. Di Constanzo, S. Bouquet, and D. Ferton. Une vie d'aluminium. *BUP*, 790-791, 1997.
- [9] J. G. Villar and al. *Physique-Chimie Terminale S : Programme 2002. Enseignement de spécialité*. Bordas, 2002.

### Introduction [1, 2, 7, 9]

- Beaucoup d'espèces sont extraites de la nature : espèces naturelles. D'autres sont synthétisées : espèces de synthèse.
- Dans chacun des cas, on veut des espèces pures (pas de solvant avec ou d'autres molécules organiques). Comment et quels contrôles ?
- Comment extraire des molécules ?

## 1 Extraction de l'eugénol des clous de girofle [2, 7, 9, 5, 4]

Présentation de l'eugénol. Intérêt industriel. Composition du mélange naturel de départ (avec acétyl'eugénol).

### 1.1 Extraction de l'huile des clous de girofle par hydrodistillation

- Comment extraire l'eugénol ? (très peu soluble dans l'eau). Principe de l'extraction.

EXPÉRIENCE – Extraction de l'huile par hydrodistillation. [2]

- Présentation du principe de l'hydrodistillation. Explicatoir du dispositif expérimental.
- Discussion sur l'utilisation d'une colonne de vigreux.

### 1.2 Isolement de l'eugénol

#### Extraction liquide-liquide de l'huile de la phase aqueuse

- Principe de l'extraction liquide-liquide.

- Qu'obtient-on?

EXPÉRIENCE – Faire l'extraction liquide-liquide. [6, 2, 7]

### Séparation de l'eugénol

- Ajout de soude. Explication. Ion eugénolate soluble dans l'eau, beaucoup plus que dans l'éther. Les autres espèces restent dans l'éther.
- Ajout d'acide chlorhydrique.

EXPÉRIENCE – Faire. [2]

### Élimination de l'eau

- Ampoule à décanter (différence de masse volumique).
- Lavage à l'éther. Sulfate de sodium anhydre.
- Évaporateur rotatif. Huile de clou.

EXPÉRIENCE – Évaporateur rotatif.

## 1.3 Caractérisation du produit

### Chromatographie sur couche mince [6, 2, 7]

- Expliquer le principe.
- Expliquer le protocole. Résultat.

### Réfractométrie

- Principe. Valeur expérimentale et valeur tabulée.
- Autres techniques : IR, RMN.

## 2 Production d'aluminium à partir de la bauxite [8, 3]

- On rappelle le principe de l'extraction, la composition de la bauxite.

### 2.1 Principe de la séparation

- En tube à essais : précipitation et redissolution de  $\text{Al}^{3+}$ , en fonction du pH. De même pour  $\text{Fe}^{3+}$ .
- Explication de la théorie avec les  $K_s$ .
- Test des ions fer (III).

EXPÉRIENCE – Expériences en tube à essais.

### 2.2 Réalisation expérimentale

- Bauxite reconstituée, ajout de soude (contrôle du pH). On chauffe (lixiviation) et on refroidit, on filtre, test aux ions  $\text{SCN}^-$ . Ajout de  $\text{H}_3\text{O}^+$ , précipitation de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  : on filtre.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes. Intérêt.
- On a pas parlé de techniques spectroscopiques, ni de recristallisation.

NOTES : Préserver un peu de produit à chaque étape pour le passage. Ne pas chercher à aller trop vite. Bien expliquer chaque technique expérimentale.

## Matériaux polymères (L)

**OBJECTIF** – Comprendre les différentes propriétés des polymères et les méthodes de synthèse.

**NIVEAU** – L3

**PRÉ-REQUIS :**

- Liaison inter- et intra-moléculaires
- Groupes caractéristiques
- Réactions organiques
- Liaison covalente
- Formule de Lewis

### Bibliographie

- [1] J. L. Azan and al. *Physique-Chimie Première STI2D/STL*. Nathan, 2011.
- [2] P. Bramand, J. P. Durandau, and al. *Physique-Chimie Première STI2D/STL*. Hachette, 2011.
- [3] D. Cauchy, A. Durupthy, O. Durupthy, and al. *H-prépa chimie PC-PC\**. Hachette, 2004.
- [4] P. Grécias. *Chimie PC-PC\**. Tec&Doc, 2009.
- [5] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.
- [6] G. Mazura. Les matières plastiques. *BUP*, 790-791, 1997.
- [7] J. Mesplède and C. Saluzzo. *100 manipulations de chimie organique et inorganique*. Bréal, 2011.

### Introduction [3, 4]

- Dans la nature, beaucoup de polymères (bois, os, cuir, cellule,...)
- Première synthèse industrielle en 1909. Lente augmentation puis explosion. Quelques rappels historiques.
- Voir les propriétés et caractéristiques des polymères, et leur obtention.

### 1 Polymères : généralités [1, 3]

- Définition d'un polymère. Exemples de monomères et schéma général d'un polymère.
- Degré de polymérisation. Exemples de calcul.
- Exemples de polymères naturels et artificiels.
- Définition d'une réaction de polymérisation. Deux types.

### 2 Polymérisation par addition [1, 2, 3, 6]

#### 2.1 Généralités et exemples

- Définition. Nécessité d'un amorceur. Mécanisme qualitatif. Exemples d'amorceur.
- Exemples de polymères obtenus par addition.

#### 2.2 Obtention du polystyrène

**EXPÉRIENCE** – Synthèse du polystyrène par polymérisation cationique [7].

- Expliquer les étapes, la nécessité de travailler en atmosphère anhydre.
- Autres voies de synthèse du polystyrène (radicalaire, anionique). Utilisation industrielle.

### 3 Polymérisation par condensation [1, 2, 3, 6]

#### 3.1 Généralités et exemples

- Définition.
- Réaction d'estérification et d'amidification - polyester et polyamide. Schéma des fonctions.

#### 3.2 Synthèse du nylon

##### EXPÉRIENCE – Synthèse du nylon. [5]

- Explication du protocole et de la formation d'un polyamide. On montre le nylon sec et propre fait en préparation.

### 4 Propriétés des polymères [1, 2, 3]

#### 4.1 Différentes interactions

- Dans une chaîne : liaison covalente.
- Entre les chaînes : liaison de Van der Waals ou liaison hydrogène.

#### 4.2 Propriétés thermiques

- Polymères thermoplastiques. Définition. Explication microscopique. Caractère recyclable. Exemples.

##### EXPÉRIENCE – Pot de yaourt au bec électrique.

- Thermodurcissables. Définition. Explication microscopique. Non recyclable. Exemples.

#### 4.3 Propriétés mécaniques

- Pression en fonction de la contrainte. Influence de la structure sur les propriétés mécaniques. Structures amorphes et cristallines. Exemples.
- Importance des additifs sur les propriétés des polymères.

### Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Importance dans l'industrie, dans le monde du vivant. Défi du XXI<sup>e</sup> siècle car pollution au plastique.

NOTES : Leçon assez courte : prendre bien le temps de décrire les protocoles expérimentaux. Parler des problématiques de développement durable.

## Chimie et développement durable (L)

**OBJECTIF** – Réinvestir des connaissances acquises pour savoir critiquer et comparer des protocoles de synthèse dans le but de respecter l'environnement.

**NIVEAU** – Terminale STL spé SPCL

**PRÉ-REQUIS :**

- Estérification
- Formule topologique
- Oxydo-réduction
- Cinétique chimique
- Techniques expérimentales

### Bibliographie

- [1] S. Antczak, J. F. Le Maréchal, and al. *Microméga Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Hatier, 2012.
- [2] P. Arnaud and al. *Chimie organique*. Dunod, 2009.
- [3] J. L. Azan and al. *Physique-Chimie Première STI2D/STL*. Nathan, 2011.
- [4] O. Buridant and al. *Travaux pratiques de physique-chimie : seconde, première, terminale*. Bordas, 2003.
- [5] N. Coppens and al. *Sirius Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Nathan, 2012.
- [6] F. Daumarie, P. Griesmar, and S. Salzard. *Florilège de chimie pratique*. Hermann, 1998.
- [7] J. Drouin, C. Bersaud, and al. *Manipulations commentées de chimie organique*. Librairie du Cèdre, 2006.
- [8] A. Durupthy, M. Bigorre, and al. *Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Hachette, 2012.
- [9] A. Fougerousse. Propriétés oxydantes du ferrate de potassium. *BUP*, 817, 1999.
- [10] P. Grécias and S. Rédoglia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [11] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.
- [12] S. Munch and al. *150 fiches pratiques de sécurité des produits chimiques au laboratoire*. Dunod, 2011.

### Introduction [2, 8]

- Définition du développement durable, des problématiques actuelles.
- Problème de la chimie, de ce qu'elle peut apporter.
- Chimie verte. Douze principes.
- Illustrer plusieurs de ces aspects, critiquer et comparer des protocoles.

## 1 Utiliser des réactifs moins toxiques et moins persistants

### 1.1 Comment oxyder un alcool ? [10, 9, 12]

- Présentation des modes d'oxydation classiques utilisant les chromates. Fiches toxicologiques du dichromate de potassium.
- Présentation du diferrate de potassium. Pas de données toxicologiques graves. Avantages, recyclabilité. Lien avec les principes de la chimie verte.

**EXPÉRIENCE** – Synthèse du diferrate puis oxydation d'alcools en tube à essais. Tests caractéristiques. [9]

- On utilise du brome : pas toujours facile de s'affranchir complètement de réactifs toxiques : compromis.

### 1.2 Synthèse d'un polymère biodégradable [4, 8, 3]

- Introduction rapide sur les polymères. Polymères non-dégradables.
- Synthèse d'un polymère biodégradable.

EXPÉRIENCE – Synthèse d'un polymère biodégradable. Montrer le bécher.

## 2 Utilisation des solvants propres

- Importance des solvants en chimie organique. Intervient dans de nombreuses étapes d'une synthèse.

### 2.1 L'eau : un solvant vert pour la synthèse organique [2]

- Avantages de l'eau du point de vue du développement durable.
- On peut quand même utiliser l'eau pour des réactifs hydrophobes : déplacement d'équilibre, Diels-Alder.
- Utilisation d'ultrasons.

### 2.2 CO<sub>2</sub> supercritique [5, 2]

EXPÉRIENCE – Tube de Natterer.

- Utilisation pour l'extraction de la caféine Présentation des propriétés du CO<sub>2</sub> supercritique. Avantage par rapport au dichlorométhane.

### 2.3 Synthèse sans solvant [7]

EXPÉRIENCE – Synthèse de la chalcone. Filtration.

- Exposer l'intérêt de la synthèse sans solvant, du principe de la réaction.

## 3 Préserver les ressources naturelles [8]

### 3.1 Utiliser moins de pétrole : synthèse de biocarburants [5, 2]

- Trois types de matières premières : houille, pétrole et biomasse. Utilisation de bioplastique au début.
- Description des biocarburants.

EXPÉRIENCE – Synthèse d'un biocarburant. [11]

- Inconvénients.

### 3.2 Préservation des matières premières : synthèse de l'ibuprofène [2, 1]

- Calcul de l'économie d'atomes dans plusieurs exemples de la synthèse de l'ibuprofène.

### 3.3 Économie d'énergie : exemple d'une synthèse au micro-ondes

- Conditions expérimentales : lien avec la cinétique (il faut chauffer).
- Procédé catalytique (principe n°9).
- Méthode originale : synthèse au micro-ondes.

EXPÉRIENCE – Synthèse d'un ester de poire au micro-ondes. Éventuellement spectre du produit obtenu. [6]

## Conclusion

- Importance de l'enjeu. Chimie verte : nécessité de compromis.
- Autre aspects : stockage d'énergie, aspect économique.

NOTES : On peut enlever une sous-partie si on manque de temps. Bien détailler les protocoles expérimentaux.

## Synthèses inorganiques (L)

**OBJECTIF** – Réinvestir les connaissances acquises pour présenter quelques synthèses inorganiques.

**NIVEAU** – Terminale STL spé SPCL

**PRÉ-REQUIS :**

- Dosage direct et indirect, par titrage et par étalonnage
- Techniques de synthèse organiques
- Facteurs cinétiques et thermodynamiques
- Équilibres chimiques, quotient de réaction
- Oxydoréduction

### Bibliographie

- [1] P. Atkins and D. Shriver. *Chimie inorganique*. De Boeck, 2001.
- [2] S. Bach, F. Buet, and G. Volet. *CAPES de sciences physiques, tome 2 : Chimie*. Belin, 2006.
- [3] P. Grécias and S. Rédolia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [4] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.
- [5] A. Simaan. Grandeur et décadence de fritz haber. *BUP*, 874, 2005.

### Introduction

- Chimie inorganique : chimie autour des espèces n'ayant pas de squelette carboné.
- Très diverse.
- Plusieurs échelles de travail : chimie fine, chimie industrielle.

## 1 Étude d'un complexe : le trioxalatoferrate de potassium [3, 4]

- Chimie fine : synthèse de petites quantités de produits à haute valeur ajoutée.

### 1.1 Mise en place expérimentale

**EXPÉRIENCE** – Synthèse du ferrioxalate de potassium.

- On explique le principe de la cristallisation à froid.
- Équation des réactions.

### 1.2 Généralités sur les complexes

- Définition d'un complexe, avec notion d'acides et de bases de Lewis, dont on rappelle la définition.
- Un mot sur la nomenclature.
- Définition de la constante de formation.
- Caractéristiques des complexes : banc Kofler détruit le complexe avant fusion, réfractométrie pas évidente, RMN : absence de proton. Utilisation de UV/Visible et IR.

### 1.3 Détermination de la stoechiométrie d'un complexe

- Recherche de la formule brute du ferrioxalate de potassium.

**EXPÉRIENCE** – Quantité de matière d'ions oxalate.

- Explication des différentes étapes. On en déduit la masse d'ions par gramme de complexe.

**EXPÉRIENCE – Quantité d'ions fer (III).**

- Explications. Stoechiométrie du complexe.

**1.4 Intérêt des complexes : la chimie bio-inorganique [1]**

- Complexes : faisant partie des systèmes biologiques. Rôle des ions métalliques.
- Transport et stockage de l'oxygène.

**2 Synthèses inorganiques en chimie industrielle [2]****2.1 Quelques aspects de la chimie industrielle**

- Les différents secteurs. Principaux produits synthétisés.

**2.2 Synthèse de l'ammoniac [5]**

- Présentation et aspect thermodynamique.
- Influence de la température, de la pression et de la composition.
- Aspect industriel et principaux débouchés.

**2.3 Production de fer par aluminothermie [4]**

- Équation de réaction et principe de cette synthèse.

**EXPÉRIENCE – Synthèse.**

- Utilisation de cette synthèse. Aspect industriel de la production d'acier.

**Conclusion**

- Mise en avant de certains aspects des synthèses inorganiques.
- Importance dans le vivant et dans l'industrie.

**NOTES : Avoir à l'esprit le BO de terminale STL spé SPCL. Là encore, être précis dans les définitions, ne pas aller trop vite.**

## Stratégie en synthèse organique (L)

**OBJECTIF** – Prendre du recul par rapport aux protocoles de synthèse et justifier les étapes.

**NIVEAU** – Terminale (S)

**PRÉ-REQUIS :**

- Acide aminé et synthèse peptidique
- Mécanisme en chimie organique
- Techniques expérimentales

### Bibliographie

- [1] P. Arnaud and al. *Chimie organique*. Dunod, 2009.
- [2] N. Coppens and al. *Sirius Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Nathan, 2012.
- [3] F. Daumarie and al. *L'épreuve de travaux pratiques à l'oral des concours*. Éditions Rue d'Ulm, 2002.
- [4] A. Durupthy, M. Bigorre, and al. *Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Hachette, 2012.
- [5] P. Grécias and S. Rédoglia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [6] R. Vento. *Physique-Chimie Terminale ST2S*. Bordas, 2009.

### Introduction [5, 4, 2]

- Innovation de la chimie : nécessité de contrôler les différentes étapes de la synthèse, avec des critères à respecter (économique, sécurité, écologique)
- Les élèves suivent des protocoles : on veut leur apprendre à réfléchir et à prendre du recul.
- Cadre de la synthèse peptidique.

## 1 Présentation de la synthèse

### 1.1 Les acides aminés [6, 2, 1]

- Définition et rappel de la structure d'un acide aminé.
- Propriétés acido-basique et nucléophile/électrophile des acides aminés.

### 1.2 La liaison peptidique [6, 2, 1, 5]

- Bilan et mécanisme de la synthèse. Présentation des réactifs.
- Objectif de la synthèse.
- Problème : formation de plusieurs composés.
- Définition de la protection et de l'activation.

### 1.3 Schéma de la synthèse [3]

- Présentation des étapes qui constituent la synthèse : protection, activation, couplage et déprotection.
- Étapes réalisées.

## 2 Réalisation d'une étape de la synthèse [3, 2]

### 2.1 Réflexion théorique

- Bilan de l'étape de protection. But. Tableau d'avancement.
- Introduction du chloroformiate de benzyle.

## 2.2 Transformation

- Mécanisme de la transformation.
- Ajout de soude : raison et mise en oeuvre.
- Explication de l'électrophilie du carbone du chlorure d'acyle.
- Montage : intérêt de l'ampoule de coulée (hydrolyse en milieu basique).
- Temps de réaction : phases différentes et mise en contact assez difficile.

## 2.3 Séparation

- Objectif. Intérêt de la première étape de lavage.
- Acidification et dernière étape de lavage.
- Séchage, évaporation, précipitation et filtrage.

## 2.4 Purification et caractérisation

- Détailler la recristallisation.
- Caractérisation par banc Kofler.
- Bilan de cette étape.

## 3 Suite et fin de la synthèse [3, 2, 5]

### 3.1 Activation de la fonction carbonyle

- Objectif de l'étape. Comment on s'y prend. Détail.
- Étapes expérimentales non détaillées.

### 3.2 Couplage

- Réalisation expérimentale et explication.

### 3.3 Bilan [4]

- Avant la manipulation, on identifie les espèces chimiques mises en jeu : solvant, catalyseurs et réactifs. Rôle de chacun, quantités.
- On choisit les paramètres expérimentaux : pH, température, durée, type de montage.
- On traite le produit : cas d'un liquide et d'un solide. Purification.
- On identifie le produit : chromatographie sur couche mince, température de fusion, réfractométrie, spectres.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes, des exigences.
- Ouverture sur la chimie verte.

NOTES : Très bonne leçon, reprise sur celle présentée pendant l'année. Passer entre cinq et dix minutes sur la dernière partie pour bien tout récapituler. Faire assez vite les expériences en préparation.

## Dosage par étalonnage (L)

**OBJECTIF** – Comprendre l'intérêt et voir les différentes méthodes de dosage par étalonnage.

**NIVEAU** – Terminale S.

**PRÉ-REQUIS :**

- Cinétique chimique
- Indice de réfraction
- Conductimétrie
- Spectrophotométrie

### Bibliographie

- [1] C. Baillet and M. Hanauer. Cinétique chimique suivie par spectrophotométrie - action du diiode sur la propanone. *BUP*, 762, 1994.
- [2] N. Coppens and al. *Sirius Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Nathan, 2012.
- [3] A. Durupthy, M. Barde, and al. *Physique-Chimie Première S : Programme 2011*. Hachette, 2011.
- [4] J. Mesplède and J. Randon. *100 manipulations de chimie générale et analytique*. Bréal, 2011.
- [5] F. Porteu de Buchère. *L'épreuve orale du CAPES de chimie*. Dunod, 2008.
- [6] V. Prévost and al. *Sirius Physique-Chimie Première S : Programme 2011*. Nathan, 2011.

### Introduction

- Contrôle de qualité omniprésent dans la vie courante : produits d'alimentation, cours d'eau, etc.
- Présenter le principe, les qualités et les limites, et les différentes méthodes de dosage par étalonnage.

## 1 Dosage par étalonnage : généralités [3, 6, 2, 5]

### 1.1 Définition

- Rappel de la différence entre dosage par étalonnage et dosage par titrage. Définitions.
- Cas où on utilise ces dosages. Exemples.

### 1.2 Mode opératoire

- Tracé d'une courbe d'étalonnage avec des solutions étalons.
- Comparaison avec la solution à doser.

**EXPÉRIENCE** – Réalisation d'une échelle de teinte (eau de Dakin).

### 1.3 Avantages et limites

- Facilité à mettre en oeuvre, détection de faibles concentrations.
- Peu de chiffres significatifs.

## 2 Exemples d'utilisation des dosages par étalonnage [3, 6, 2]

### 2.1 Dosage conductimétrique

**EXPÉRIENCE** – Dosage d'un sérum physiologique [4].

- Rappel de la loi de Kohlrausch. Courbe d'étalonnage et résultat.

## 2.2 Dosage spectrophotométrique

- Rappel de la loi de Beer-Lambert. Validité. Linéarité.

EXPÉRIENCE – Dosage spectrophotométrique du sirop de menthe [4].

- Choix des longueurs d'onde de mesure. Liste des colorants. Conclusion.

## 2.3 Dosage par réfractométrie

- Principe. Nécessité d'une courbe d'étalonnage (pas forcément une loi linéaire).

EXPÉRIENCE – Dosage réfractométrique du saccharose [4].

- Courbes d'étalonnage et résultat. Utilisation en oenologie. Conclusion.

## 3 Application au suivi cinétique [1]

- Détail du protocole.
- Intérêt du dosage par étalonnage : rapide et non destructif.

EXPÉRIENCE – Faire le suivi cinétique.

- Conclusion.

## Conclusion

- Résumé précis et complet des idées fortes.
- Ouverture sur les dosages par titrage.

NOTES : Leçon pas très passionnante. Être précis dans les définitions.

## Dosage par titrage (L)

**OBJECTIF** – Comprendre les principales méthodes de dosage par titrage.

**NIVEAU** – Terminale STL.

**PRÉ-REQUIS :**

- Acide-base
- Équilibre en solution
- Précipitation
- Conductimétrie et pH-métrie

### Bibliographie

- [1] O. Buridant and al. *Travaux pratiques de physique-chimie : seconde, première, terminale*. Bordas, 2003.
- [2] N. Coppens and al. *Sirius Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Nathan, 2012.
- [3] A. Durupthy, M. Bigorre, and al. *Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Hachette, 2012.
- [4] B. Fosset and J. B. Baudin. *Chimie tout-en-un PCSI*. Dunod, 2013.
- [5] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.

### Introduction [3]

- Définition d'un dosage. Deux types de dosage. On a vu le dosage par étalonnage.
- But du dosage : bon déroulement des procédés industriels, contrôles de qualité, indication d'un fabricant.

## 1 Principe général et mise en oeuvre

### 1.1 Principe et définitions [3]

- Redéfinition d'un titrage.
- Trois conditions pour un titrage (rapide, totale et unique). Destructivité.

### 1.2 Définition de l'équivalence et mise en oeuvre expérimentale [3]

- Définition de la solution titrante et de la solution titrée. Schéma expérimental général et explication de la mise en oeuvre.
- Définition théorique de l'équivalence. Insister sur le fait que l'on repère une manifestation de l'équivalence.
- Types de dosages et méthodes pour détecter l'équivalence.

## 2 Titrage direct par suivi conductimétrique [3, 1]

### 2.1 Principe et mise en oeuvre

- Définition d'un titrage direct.
- Présentation du titrage. Réaction support.
- Principe du titrage conductimétrique et schéma du montage.

### 2.2 Interprétation et calcul de $\sigma = f(V)$

- Tableau d'avancement et calcul de  $\sigma = f(V)$ .

## 2.3 Détermination de la concentration en ion chlorure

EXPÉRIENCE – Réaliser le titrage.

- Calcul de la concentration. Évaluation des différentes incertitudes. Incertitude prépondérante.

## 3 Titrage indirect par suivi pH-métrique et colorimétrique

- Déterminer la quantité d'acide acétylsalicylique dans un médicament.

### 3.1 Principe du dosage indirect [4]

- Définition et principe.

### 3.2 Détermination d'une concentration par suivi pH-métrique [5]

- Première réaction du dosage. Réaction du titrage. Titrage par excès.

EXPÉRIENCE – Réaliser le titrage. Suivi pH-métrique.

- Interprétation des deux réactions (tableau d'avancement). Explication du saut de pH. Obtention des concentrations. Intérêt du dosage. Intérêt du dosage indirect sur les incertitudes.

### 3.3 Détermination d'une concentration par suivi colorimétrique [5, 2]

- Définition d'un indicateur coloré. Principe du titrage colorimétrique.
- Choix de l'indicateur coloré en lien avec la courbe de pH. Précaution à prendre (on dose aussi l'indicateur coloré : faible quantité).

EXPÉRIENCE – Réalisation du titrage avec la phénolphtaléine.

- Détermination de la concentration et incertitudes.

### 3.4 Conclusion

- Détermination de la concentration d'acide acétylsalicylique dans le comprimé. Incertitudes.

## Conclusion

- Résumé précis et complet des idées fortes.
- Précision et difficulté de mise en oeuvre des différentes méthodes.
- Suivi potentiométrique, titrage par production.

NOTES : Insister sur l'intérêt du dosage, sur le moyen de **détecter le passage** de l'équivalence. Exploiter à fond les dosages.

## Optimisation des cinétiques de réaction (L)

**OBJECTIF** – Comprendre l'importance des facteurs cinétiques et apprendre comment optimiser la cinétique d'un protocole.

**NIVEAU** – Terminale

**PRÉ-REQUIS :**

- Cinétique de réaction
- Réactions d'oxydoréduction
- Réactions d'estérification
- Notion d'avancement

### Bibliographie

- [1] S. Antczak, J. F. Le Maréchal, and al. *Microméga Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Hatier, 2012.
- [2] D. Cauchy, A. Durupthy, O. Durupthy, and al. *H-prépa chimie PC-PC\**. Hachette, 2004.
- [3] N. Coppens and al. *Sirius Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Nathan, 2012.
- [4] A. Durupthy, M. Bigorre, and al. *Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Hachette, 2012.
- [5] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.
- [6] J. Mesplède and J. Randon. *100 manipulations de chimie générale et analytique*. Bréal, 2011.
- [7] J. Mesplède and C. Saluzzo. *100 manipulations de chimie organique et inorganique*. Bréal, 2011.

### Introduction

- Réactions lentes et rapides, méthodes de suivi cinétique. Importance des critères cinétiques.
- Existence d'une vitesse finie : peut être un problème ou un avantage : bloquer certaines réactions et en accélérer d'autres.

## 1 Importance des caractéristiques du milieu réactionnel

### 1.1 Explication de l'importance de la température [3]

- Décrire l'importance de la température.

**EXPÉRIENCE** – Comparer les trois bécher à trois températures différentes. [6]

**ILLUSTRATION** – Logiciel de simulation Microméga [1].

### 1.2 Explication et illustration de l'importance de la concentration [1]

- Décrire l'importance de la concentration.

**EXPÉRIENCE** – La même chose que pour la température.

### 1.3 Autres paramètres : nature des solvants, des réactifs

- Il est évident que la nature des réactifs joue sur la cinétique.
- D'autres facteurs jouent. Diagrammes énergétiques.

## 2 Catalyse [3, 4]

### 2.1 Définition et propriétés du catalyseur

- Définition. Importance (chimie verte).
- Rôle purement cinétique.
- Mode d'action.
- Spécificité et sélectivité.

### 2.2 Différents types de catalyse

EXPÉRIENCE – Différents types de catalyse de la dismutation du peroxyde d'hydrogène.

- Rappeler avant la dismutation de  $H_2O_2$ .
- Définir les trois types. Citer une application industrielle pour chaque.

## 3 Application à l'optimisation de la cinétique d'une estérification [5, 2]

### 3.1 Présentation

- Bilan et mécanisme en présence d'un catalyseur acide non précisé.

### 3.2 Optimisation de la cinétique et mise en oeuvre expérimentale

- Solvant et réactif.
- Ajout du catalyseur.
- Chauffage.
- Retour sur le catalyseur : risque de carbonisation, utilisation d'APTS.

EXPÉRIENCE – Réalisation de l'estérification. [7]

### 3.3 Autres méthodes

- Utilisation d'un anhydride d'acide.

## Conclusion

- Importance de la catalyse dans la chimie verte.
- Augmentation de la température.
- Voir toute la chaîne : la production d'anhydride nécessite un fort chauffage.

NOTES : Leçon un peu bancale. La troisième partie permet de tout récapituler.

## Synthèse organique : caractérisation par spectroscopie (L)

**OBJECTIF** – Montrer l'importance des spectroscopies pour la caractérisation des produits organiques.

**NIVEAU** – Terminale

**PRÉ-REQUIS :**

- Principes de spectroscopie
- Chimie organique
- Techniques expérimentales de synthèse organique

### Bibliographie

- [1] M. Blanchard-Desce. *Chimie organique expérimentale*. Hermann, 1997.
- [2] N. Coppens and al. *Sirius Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Nathan, 2012.
- [3] A. Durupthy, M. Bigorre, and al. *Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Hachette, 2012.
- [4] B. Fosset, J. B. Baudin, F. Lahitète, and V. Prévost. *Chimie tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2009.
- [5] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.

### Introduction [4]

- Nécessité d'identifier les composés organiques pour suivre les étapes d'une synthèse et contrôler le produit final.
- On a vu certaines techniques (CCM, banc Kofler)
- Ici méthodes spectroscopiques. Trois types : UV-Visible, IR et RMN. On va voir leur apport.

## 1 Synthèse de la phénolphtaléine : spectroscopie UV/visible [3]

### 1.1 Synthèse de la phénolphtaléine [5]

**EXPÉRIENCE** – Synthèse de la phénolphtaléine. Filtration sur Büchner.

- Bilan de la synthèse. Mécanisme indicatif. Substitution électrophile aromatique.
- Origine de la couleur. Généralités.

### 1.2 Spectroscopie UV/visible

- Principe de la spectrophotométrie. Couleur perçue et longueur d'onde absorbée.
- Réalisation de  $A(\lambda)$  pour différents pH. Point isobestique. Caractérisation du maximum.

**EXPÉRIENCE** – Utilisation du spectrophotomètre.

## 2 Réaction de Cannizaro : spectroscopies IR et RMN [3, 2, 1]

### 2.1 Synthèse de Cannizaro

- Expliquer les différentes étapes de la synthèse.

**EXPÉRIENCE** – Synthèse de Cannizaro : début de la synthèse.

- Bilan de la synthèse. Mécanisme indicatif.
- On explique les techniques expérimentales.
- On repère les fonctions caractéristiques.

## 2.2 Spectroscopie infrarouge (IR)

- Rappel de ce qu'il y a un spectre IR, du principe et de l'interprétation.
- Application aux produits synthétisés. Analyse du spectre.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes. Importance de la spectroscopie.
- Ouverture sur l'importance en médecine, en histoire de l'art.

NOTES : Insister sur certains aspects qui ne sont pas liés au titre : fonctions caractéristiques, techniques expérimentales,... sinon la leçon est un peu courte. Les expériences marchent plutôt bien.

## Relation structure-réactivité en chimie organique (L)

OBJECTIF – Illustrer et comprendre la réactivité des fonctions, en fonction notamment de leur environnement.

NIVEAU – Terminale

### PRÉ-REQUIS :

- Fonction caractéristique
- Mécanismes réactionnels
- Estérification, aldolisation, crotonisation, substitution nucléophile
- Réactions d'oxydoréduction
- Liaison hydrogène

## Bibliographie

- [1] P. Arnaud and al. *Chimie organique*. Dunod, 2009.
- [2] J. Drouin, C. Bersaud, and al. *Manipulations commentées de chimie organique*. Librairie du Cèdre, 2006.
- [3] M. Escaffre. Étude comparée de l'oxydation ménagée des trois classes d'alcools par le permanganate de potassium. *BUP*, 865, 2004.
- [4] P. Grécias and S. Rédoglia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [5] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.
- [6] J. Mesplède and C. Saluzzo. *100 manipulations de chimie organique et inorganique*. Bréal, 2011.

## Introduction

- On a vu la notion de groupe caractéristique, qui sert à nommer les molécules, écrire leur formule chimique.
- On va voir maintenant comment réagissent les molécules.
- On va voir l'influence du voisinage des fonctions sur leur réactivité.

## 1 Différentes classes d'alcool [3, 1, 5]

- Différents types d'alcools par le nombre de carbones adjacents à celui portant le groupement hydroxyde. Exemples.

### 1.1 Test de Lucas

- Test de Lucas : mise en évidence de la classe de l'alcool.

EXPÉRIENCE – Test de Lucas. Comparaison des vitesses de réaction.

- Mécanisme et explication du test. Importance de la cinétique.

### 1.2 Oxydation ménagée d'un alcool

- Explication de l'oxydation ménagée. Principe du protocole. Conclusion.

EXPÉRIENCE – Quels alcools réagissent avec le permanganate ?

- Caractériser les produits formés.

EXPÉRIENCE – Quels sont les produits formés ?

- Observations et remarques expérimentales.

EXPÉRIENCE – Test à la 2,4-DNPH et avec le réactif de Tollens.

- Écrire les équations et les expliquer.
- Conclure.

## 2 Les fonctions carbonyles et carboxyles

### 2.1 La fonction carbonyle [2, 1]

- Voir un exemple où la fonction influence son environnement et modifie sa réactivité. Électrophilie. Nucléophilie.

EXPÉRIENCE – Synthèse de la chalcone.

- Mécanisme et explication des étapes expérimentales. Insister sur l'importance de la cétone pour déprotonner en  $\alpha$ .

### 2.2 La fonction carboxyle [6, 1]

- Voir un exemple où l'environnement influence et permet l'augmentation du rendement.

EXPÉRIENCE – Synthèse de l'aspirine avec un anhydride d'acide.

- Mécanisme et explication des étapes expérimentales. Réactif limitant et rendement.
- Si on remplace l'anhydride par un acide : rendement.

## 3 Liaison hydrogène et réactivité [4, 5]

### 3.1 Liaison hydrogène et pKa

- Présentation de l'acide maléique et fumarique.

EXPÉRIENCE – Titration acide maléique et fumarique.

- Discussion. Explications des différences de pKa.

### 3.2 Importance de la liaison hydrogène

- Rapidement, rôle de la liaison hydrogène en chimie organique.

## Conclusion [4]

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur les composés polyfonctionnels et les notions de protection de fonction.

NOTES : La leçon est un peu longue, faire bien apparaître la progression.

## Réaction chimique par échange de proton (L)

**OBJECTIF** – Comprendre les principes régissant l'équilibre d'une réaction par échange de proton.

**NIVEAU** – Terminale S

**PRÉ-REQUIS :**

- Transformation chimique
- Conductimétrie
- Titrages
- Estérification
- Notions de donneur et d'accepteur

### Bibliographie

- [1] S. Antczak, J. F. Le Maréchal, and al. *Microméga Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Hatier, 2012.
- [2] D. Cauchy, A. Durupthy, O. Durupthy, and al. *H-prépa chimie PC-PC\**. Hachette, 2004.
- [3] A. Durupthy, M. Bigorre, and al. *Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Hachette, 2012.
- [4] P. Grécias and S. Rédoglia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [5] J. F. Le Maréchal and B. Nowak-Leclerq. *La chimie expérimentale : tome 1. Chimie générale*. Dunod, 2004.

### Introduction

- Notion d'avancement de réaction, de réaction chimique. On cherche à avoir des catégories plus générales de réactions.
- Premier type : les réactions par échange de proton.

## 1 pH et théorie de Bronsted [3, 1]

### 1.1 Définition et mesure du pH

- Définition du pH avec la concentration de référence  $c_0$ . Concentration en  $\text{H}_3\text{O}^+$ .
- Mesure du pH avec un pH-mètre : précision maximale atteignable.
- Faire la transition avec l'origine des ions  $\text{H}_3\text{O}^+$ .

### 1.2 Acides et bases au sens de Bronsted

- Définition d'un acide. Cas général. Exemples. Schématisation avec des flèches.
- Définition d'une base. Cas général. Exemples. Schématisation avec des flèches.
- Notion de couple acide/base. Possibilité de réactions acido-basiques.

### 1.3 Réactions acido-basiques

- Définition. C'est une réaction par échange de proton.

**EXPÉRIENCE** – Vérification expérimentale de la réalisation effective de ces réactions. Soude+acide chlorhydrique avec conductimétrie.

- Dans quelles conditions ces réactions ont-elles lieu ?

### 1.4 Ampholytes

- Définition. Exemple de l'eau.

## 2 Propriétés des réactions acido-basiques [3]

### 2.1 Équilibre chimique

- Exemple de la réaction de l'acide éthanoïque avec l'eau : deux cas possibles.

EXPÉRIENCE – Mesure du pH d'une solution d'acide acétique. Ajout d'acide pur. Ajout d'éthanoate de sodium.

- Définition d'un acide fort ou d'une base forte, d'un acide faible ou d'une base faible. Donner des exemples.

### 2.2 Constante d'acidité

- Définition du  $K_A$  après avoir écrit la réaction considérée. Définition du  $pK_A$ .
- Cas particulier de l'eau.  $pK_E$ . Parler des deux couples.
- Diagrammes de prédominance.

### 2.3 Préviation des réactions [4]

- Calcul de la constante de réaction. Lien avec les diagrammes de prédominance.

## 3 Utilisation des réactions acido-basiques

### 3.1 Titrage acido-basique [3, 1]

- Rappel rapide du principe d'un titrage et de la définition de l'équivalence.
- Écriture de la réaction support.

EXPÉRIENCE – Titrage de l'aspirine. Calcul de la masse contenue dans le comprimé. [5]

- Explication qualitative du saut de pH. Incertitudes.
- Éventuellement indicateur coloré et repérage de l'équivalence.

### 3.2 Solution tampon [3]

- Définition.

EXPÉRIENCE – Réalisation d'une solution tampon. Vérification de la stabilité du pH par ajout de soude ou par dilution.

- Intérêt des solutions tampon dans la régulation du pH dans les milieux biologiques.

### 3.3 Utilisations des réactions acido-basiques en chimie organique [3, 2]

- Rappel de l'estérification. Catalyse acide. Mécanisme qualitatif : on montre où se fait l'échange de proton.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur la grande variété des réactions acido-basiques, leur utilisation en chimie organique, pour les titrages, ...

NOTES : Ne pas utiliser trop de composés abstraits, garder assez de temps pour parler des applications tranquillement. Ne pas ignorer le rôle du solvant !

## Capteurs électrochimiques (L)

OBJECTIF – Comprendre l'intérêt et le fonctionnement de capteurs électrochimiques sur plusieurs exemples.

NIVEAU – Terminale STL

PRÉ-REQUIS :

- Bases d'oxydoréduction
- pH, réaction acide-base
- Loi d'action des masses

### Bibliographie

- [1] G. Asch. *Les capteurs en instrumentation industrielle*. Dunod, 2010.
- [2] P. Grécias and S. Rédolia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [3] J. F. Le Maréchal and B. Nowak-Leclercq. *La chimie expérimentale : tome 1. Chimie générale*. Dunod, 2004.
- [4] C. Lefrou and P. Fabry. *Électrochimie, concepts fondamentaux illustrés*. EDP Sciences, 2013.
- [5] F. Miomandre, S. Sadki, P. Audebert, and R. Méallet-Renault. *Électrochimie, des concepts aux applications*. Dunod, 2005.
- [6] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

### Introduction [1, 6]

- Définition d'un capteur. Citer quelques exemples de capteurs.
- Critère pour avoir un bon capteur : sensibilité, fiabilité, coût, environnement,...
- Pas un cours introductif à l'oxydoréduction.

## 1 Principe d'un capteur potentiométrique

### 1.1 Structure d'une électrode [3, 5]

- Définition d'une électrode.

EXPÉRIENCE – Mise en évidence du potentiel d'électrode. Construction d'une pile Daniell.

- On a constitué une pile car on a deux potentiels différents.

### 1.2 Potentiel d'électrode et équation de Nernst [4]

- Rappel de la formule de Nernst. Domaine de validité.
- Calcul de la différence de potentiel de la pile Daniell par la formule de Nernst, explication des éventuels écarts (assez faible avec la pile Daniell car elle débite peu vu la résistance du pont salin).
- Définition : capteur potentiométrique, association d'une électrode de travail et d'une électrode de référence.

## 2 Différents types d'électrodes

### 2.1 Trois espèces fondamentales [2]

- Électrode de première espèce. Définition. Exemples.
- Électrode de deuxième espèce. Définition. Exemples.
- Électrode de troisième espèce. Définition. Exemples.

EXPÉRIENCE – – Potentiel d'une électrode Zn/Zn<sup>2+</sup>.

- Électrolyse d'une électrode d'argent dans de l'acide chlorhydrique à 1M. Apparition d'un composé solide. On trempe dans KCl et on mesure le potentiel par rapport à l'électrode au calomel saturé.
- Potentiel d'une électrode avec platine dans sel de Mohr à 0.1M.

## 2.2 Électrodes de référence [4]

- Électrode standard à hydrogène. Importance. Réalisation pratique et schéma.
- Électrode au calomel saturé. Importance pratique. Schéma. Potentiel.
- Autres électrodes usuelles.

## 2.3 Application à un titrage potentiométrique

EXPÉRIENCE – Titration du sel de Mohr (à 0.1M environ) par du sulfate de cérium. [3]

- Expliquer le principe. Réaction support de titrage. Volume équivalent. Concentration et incertitudes.

# 3 Électrodes ioniques spécifiques

## 3.1 Le pH-mètre [3, 4, 5]

- Schéma de l'électrode de verre. Principe. Schéma. Formule de Nernst.
- Relation entre le potentiel et le pH. Intérêt de l'étalonnage.
- Limites du capteur.

EXPÉRIENCE – Mesure du pH de la soude à 0.1M.

- Problème de sélectivité ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ).

## 3.2 Application à un capteur à urée [5]

- Principe de la réaction. Intérêt pratique. pH. Partie sensible, transducteur et acquisition.

# Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur la grande diversité des capteurs électrochimiques et leur intérêt (contrôle de qualité).

NOTES : Leçon préparée à l'origine sans le Asch, mais sa lecture peut être fructueuse !

## Molécules de la santé (L)

OBJECTIF – Réinvestir les notions acquises en cours dans le cadre des molécules de la santé.

NIVEAU – Terminale

### PRÉ-REQUIS :

- Banc Kofler
- Chromatographie sur couche mince
- Formules topologiques
- Mécanismes réactionnels
- Réactions d'oxydoréduction

## Bibliographie

- [1] X. Bataille, J. M. Parisi, and al. *Physique-Chimie Seconde : Programme 2010*. Belin, 2010.
- [2] M. Busnel and al. *Physique-chimie Terminale ST2S*. Nathan, 2008.
- [3] A. Durupthy, M. Bigorre, and al. *Physique-Chimie Terminale S : Programme 2012*. Hachette, 2012.
- [4] J. Mesplède and J. Randon. *100 manipulations de chimie générale et analytique*. Bréal, 2011.
- [5] J. Mesplède and C. Saluzzo. *100 manipulations de chimie organique et inorganique*. Bréal, 2011.
- [6] V. Révost, C. Langrand, and J. Vidal. L'aspartame : un édulcorant intense. *BUP*, 847, 2002.

## Introduction [1]

- Définition de la santé. Apport de la chimie.
- Processus de découverte et de synthèse des médicaments : exemple de l'aspirine.
- Autres exemples : contrôle de qualité, désinfectants, régimes alimentaires.

## 1 Un exemple de médicament : le paracétamol [3]

### 1.1 Présentation

- Médicament analgésique, antipyrétique. Formule topologique. Historique. Avantages par rapport à l'aspirine.
- Présentation des différents groupes caractéristiques.

### 1.2 Synthèse [5]

- Présentation des réactifs. Description du mécanisme. Rapport avec la synthèse peptidique.

EXPÉRIENCE – Synthèse du paracétamol. Attention à ne pas utiliser le protocole du Durupthy.

### 1.3 Purification et caractérisation [5]

EXPÉRIENCE – Recristallisation avec bain eau/glace. Produit à l'étuve et banc Kofler.

- Expliquer précisément le protocole expérimental. Conclusion.

## 2 L'édulcorant le plus utilisé : l'aspartame [2, 6]

### 2.1 Présentation

- Présentation. Définition d'un édulcorant. Formule topologique de l'aspartame. Histoire. Définition du pouvoir sucrant. Comparaison.

- Description des fonctions. Dose maximale admissible (DJA) : transition sur l'origine de la nocivité de l'aspartame.

## 2.2 Hydrolyse de l'aspartame

- Définition de l'hydrolyse. Deux fonctions à hydrolyser. Ne pas donner le mécanisme mais directement le bilan.
- Libère du méthanol : toxique. On montre que cette réaction se produit.

EXPÉRIENCE – Réaliser l'hydrolyse de l'aspartame.

- Explication des étapes du protocole.

## 2.3 Caractérisation

EXPÉRIENCE – CCM de l'hydrolysât. Nihydrine.

- Expliquer les étapes du protocole. Toxicité de la nihydrine.

# 3 L'eau de Javel [3, 4]

## 3.1 Présentation et intérêt

- Composition de l'eau de Javel. Intérêt (bactéricide).
- Intérêt d'un titrage (baisse de la concentration sur des longs temps).

## 3.2 Titrage indirect de l'eau de Javel

- Explication du principe du titrage indirect. Équation-bilan.

EXPÉRIENCE – Titrage de l'eau de Javel. Iotect.

- On déduit de  $V_{eq}$  la concentration en ion  $\text{ClO}^-$ .

## 3.3 Degré chlorométrique

- Définition. Calcul.

## Conclusion

- Molécules de la santé : partout.
- Permet aussi de voir des notions de chimie.
- Acides aminés.

NOTES : Leçon préparée par mon binôme, bien accueillie. Passer du temps à discuter la chimie : fonctions, techniques expérimentales...

## Structure et propriétés des molécules du vivant (L)

OBJECTIF – Réinvestir les connaissances acquises en chimie pour comprendre le fonctionnement des molécules du vivant.

NIVEAU – Terminale

### PRÉ-REQUIS :

- Chiralité
- Acide-base
- Chimie organique
- Formules topologiques
- Liaisons hydrogène
- Estérification et hydrolyse

## Bibliographie

- [1] P. Arnaud and al. *Chimie organique*. Dunod, 2009.
- [2] M. Blanchard-Desce. *Chimie organique expérimentale*. Hermann, 1997.
- [3] J. Bourdais and al. *Physique-chimie Terminale D*. Bordas, 1989.
- [4] M. Busnel and al. *Physique-chimie Terminale SMS*. Nathan, 2002.
- [5] M. Busnel and al. *Physique-chimie Terminale ST2S*. Nathan, 2008.
- [6] A. Cunnington and al. *Physique-chimie Terminale C,D,E*. Hatier, 1989.
- [7] O. Durupthy, A. Durupthy, and M. Dubusc. Chromatographie sur papier et électrophorèse d'acide  $\alpha$ -aminés. *BUP*, 714, 1989.
- [8] R. Gourdiolle. Chromatographie sur papier et électrophorèse d'acide  $\alpha$ -aminés. *BUP*, 664, 1984.
- [9] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.
- [10] J. Mesplède and C. Saluzzo. *100 manipulations de chimie organique et inorganique*. Bréal, 2011.
- [11] G. Purenne and al. *Sciences physiques et chimiques Première ST2S*. Foucher, 2012.
- [12] R. Vento. *Physique-Chimie Terminale ST2S*. Bordas, 2009.

## Introduction

- Pendant le fonctionnement de l'organisme : nombreuses réactions chimiques.
- Le corps utilise de nombreuses molécules.
- Le but de cette leçon est d'étudier ces molécules. On se limitera aux acides aminés et peptides, aux glucides et aux lipides.

## 1 Les acides aminés [12, 1, 5]

### 1.1 Présentation

- Définition. Acides  $\alpha$ -aminés. Nomenclature. 20 acides aminés naturels.
- Importance du radical sur les propriétés.

### 1.2 Propriétés acido-basiques

- Pour un acide aminés issu d'un groupement alkyle : deux pKa. Domaines de prédominance.

EXPÉRIENCE – Application à la détermination de la nature des acides aminés dans un jus d'orange. [8, 7]

- Interprétation des résultats et conclusion.

## 1.3 Chiralité

EXPÉRIENCE – Mise en évidence de la chiralité des acides  $\alpha$ -aminés sur des modèles moléculaires (à l'exception de la glycine).

- Représentation de Cram des deux énantiomères. Représentation de Fisher (convention et règles utilisées).
- Configuration L et D. Remarque sur les acides aminés naturels.

## 2 Les protéines et les peptides [12, 1, 5]

### 2.1 La liaison peptidique

- Groupement amide. Synthèse.
- Lien avec les acides aminés. Caractéristique de la liaison peptidique.

EXPÉRIENCE – Synthèse du nylon ou Synthèse du paracétamol et filtration devant le jury.

### 2.2 Peptides et protéines

- Faire plusieurs liaisons peptidiques.
- Problème de régiosélectivité. Illustration sur un couplage glycine/alanine. Nécessité de blocage de réaction.

### 2.3 Protéines [3, 6, 4]

- Définition. Exemple de masse molaire.

EXPÉRIENCE – Test du biuret. [2]

- Conformation spatiale : quatre niveaux de structure. Importance de la liaison hydrogène.
- Rôle des protéines dans le monde vivant et importance de la configuration (vache folle, dénaturation d'un enzyme en fonction de la température).

## 3 Les glucides [1]

### 3.1 Une source d'énergie pour l'organisme [11]

- Définition et propriétés. Exemples. Solubilité dans l'eau.

EXPÉRIENCE – Hydrolyse enzymatique de l'amidon. Liqueur de Fehling. [10]

- Explications et interprétation.

### 3.2 Les familles de sucre

- Monosaccharides (oses). Définition et exemples. Chiralité : glucose, fructose.
- Polysaccharides (ases). Définition et exemples.

## 4 Les lipides

- Peu d'énergie contenue dans les glucides : lipides.

EXPÉRIENCE – Saponification d'un triester [9].

### 4.1 Les triglycérides [5, 1]

- Généralités sur les lipides.
- Triester d'acide gras. Exemple.
- Différence entre acide gras saturé et insaturé.

## 4.2 Hydrolyse basique des lipides [5, 9]

- Hydrolyse par la bile dans le corps humain.

EXPÉRIENCE – Relargage et filtration.

- Mise en évidence du passage de triglycéride à acide gras.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur la synthèse de matériaux bioinspirés, et sur l'importance de la structure spatiale des protéines.

NOTES : Beaucoup d'expériences, les avoir testé avant le jour J. Être assez rapide, sans pour autant bacler les aspects théoriques.



## Solvants (CP)

OBJECTIF – Montrer l'importance du solvant dans un processus de synthèse.

NIVEAU – PCSI première période / MP

### PRÉ-REQUIS :

- Cinétique
- Solubilité (lycée)
- Techniques expérimentales
- Conductimétrie
- Substitution nucléophile
- Forces intermoléculaires

## Bibliographie

- [1] M. Blanchard-Desce. *Chimie organique expérimentale*. Hermann, 1997.
- [2] F. Daumarie, P. Griesmar, and S. Salzard. *Florilège de chimie pratique*. Hermann, 1998.
- [3] B. Fosset and J. B. Baudin. *Chimie tout-en-un PCSI*. Dunod, 2013.
- [4] P. Gréacias and S. Rédoglia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [5] J. F. Le Maréchal and B. Nowak-Leclerq. *La chimie expérimentale : tome 1. Chimie générale*. Dunod, 2004.
- [6] J. Mesplède and C. Saluzzo. *100 manipulations de chimie organique et inorganique*. Bréal, 2011.

## Introduction [3]

- Solvant : espèce placée en excès qui permet la dissolution des solutés et leur mise en contact.
- On oublie souvent le solvant dans l'étude de la réactivité, pourtant son rôle est fondamental.

## 1 Caractéristiques des solvants [4, 3]

### 1.1 Cas général

- Polarité. Pouvoir dispersant. Proticité.

EXPÉRIENCE – Solubilité de l'eau dans les solvants organiques.

- Classification de quelques solvants. Règle "Like dissolves like".

### 1.2 Le solvant eau

- Espèces ioniques dissoutes. Étapes. Caractéristiques de l'eau. Liaisons hydrogène.

EXPÉRIENCE – Expérience du jet d'eau [5]. Dissolution de quelques composants ioniques et moléculaires.

- Cas des miscelles.

## 2 Application des propriétés physiques des solvants à l'isolement de produits de synthèse [4, 3]

### 2.1 Réaction considérée [6, 1]

- Réaction de Cannizaro. Dismutation d'un aldéhyde. Bilan. On montre le protocole expérimental.

## 2.2 Séparation liquide-liquide [6, 1, 5]

- Partage entre deux solvants et principe d'une extraction liquide-liquide. Un peu de thermochimie.

EXPÉRIENCE – Lavage par l'éther diéthylique. Manipulation de l'ampoule à décanter.

## 2.3 Recristallisation [4]

- Présentation du principe et intérêt. Utilisation pratique.

EXPÉRIENCE – Recristallisation de l'acide benzoïque issu de la réaction de Cannizaro.

# 3 Influence du solvant sur la cinétique d'un processus [4]

## 3.1 Stabilité des solutés

- Dissolution d'un acide : le solvant réagit.
- Réaction entre un organomagnésien et un acide.

## 3.2 Influence du solvant sur la cinétique

EXPÉRIENCE – Hydrolyse du chlorure de tertio-butyle [2].

- Influence du solvant sur la stabilité d'un intermédiaire réactionnel.
- Étude de la cinétique. Mécanisme avec étape cinétiquement déterminante. Comparaison des énergies d'activation et conclusion.

## Conclusion

- Rôle du solvant essentiel : comment on extrait et purifie des produits naturels ou de synthèse.
- Rôle fondamental dans la réactivité en chimie.
- Ouverture sur la chimie verte (solvants moins polluants, extraction par CO<sub>2</sub> supercritique).

NOTES : Leçon assez longue : être efficace.

## Classification périodique (CP)

**OBJECTIF** – Comprendre la classification périodique et l'évolution de différentes propriétés physiques et chimiques dans celle-ci.

**NIVEAU** – MPSI

**PRÉ-REQUIS :**

- Atomistique
- Acide-base
- Réactions d'oxydation-réduction
- Solutions aqueuses
- Forces de Van der Waals

### Introduction

- Beaucoup de molécules mais finalement peu d'atomes. Une centaine d'atomes pour des dizaines de milliers de molécules.
- Les matériaux formés avec ces atomes ont des propriétés variées : la première approche historique a été de recenser ces propriétés. Par un besoin de généralité est apparue la classification périodique des éléments.

### Bibliographie

- [1] D. Cahcau-Herreillat. *Des expériences de la famille Réd-Ox (81 manipulations)*. De Boeck, 2011.
- [2] B. Fosset and J. B. Baudin. *Chimie tout-en-un PCSI*. Dunod, 2013.
- [3] M. Giacino, A. Durupthy, and al. *H-prépa chimie PCSI*. Hachette, 2010.
- [4] P. Grécias and S. Rédoglia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [5] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.
- [6] J. F. Le Maréchal and B. Nowak-Leclercq. *La chimie expérimentale : tome 1. Chimie générale*. Dunod, 2004.
- [7] R. Parisot. Comparaison du pouvoir oxydant du dichlore, du dibrome et du diiode. *BUP*, 684, 1986.

## 1 Construction de la classification périodique

### 1.1 Aspect historique [4]

- Une soixantaine d'éléments connus au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. Identification de propriétés analogues : notion de famille.
- Premier essai : classification par masse molaire atomique croissante.
- Apport de Mendeleïev : masse atomique croissante, inversion de certains atomes pour garder une cohérence chimique. Prédiction d'éléments en laissant des trous. Gaz nobles : ajout d'une colonne.

### 1.2 Construction moderne de la classification [4]

- Rappel des notions d'élément, de numéro atomique et de construction de la structure électronique.
- Construction de la classification périodique des éléments.

### 1.3 Périodicité des propriétés : familles [5]

**EXPÉRIENCE** – Action de  $\text{Ag}^+$  sur les halogénures en tubes à essai.

- Propriétés semblables : notion de famille.

**EXPÉRIENCE** – Ajout d'ammoniac puis de thiosulfate. On constate des différences.

- Propriétés semblables mais pas identiques : nécessité de nouveaux outils de caractérisation.

## 2 Propriétés physiques

### 2.1 État physique des dihalogènes [5]

EXPÉRIENCE – Synthèse du dichlore. Eau de brome et diiode. État physique constatés.

- Expliquer en termes de polarisabilité, donc de taille.

### 2.2 Énergie de première ionisation, affinité électronique et électronégativité [4, 2]

- Définition de l'énergie de première ionisation. Ordres de grandeur. Évolution dans la classification.
- Définition de l'affinité électronique. Ordres de grandeur. Évolution dans la classification.
- Lien des deux avec la règle de l'octet.
- Définition de l'électronégativité de Mulliken, de Pauling. Évolution dans la classification. Retour sur l'action de  $\text{Ag}^+$  sur les halogénures.

### 2.3 Rayon atomique, rayon ionique [2]

- Définition (au moins qualitative). Évolution dans la classification. Lien avec  $\text{AgX}$ .

## 3 Propriétés chimiques

### 3.1 Propriétés oxydo-réductrices [7, 5, 6, 3, 4]

EXPÉRIENCE – Caractère réducteur de Na. Si le temps (et si possible), comparer avec Li et K.

- Lien avec l'électronégativité.

EXPÉRIENCE – Caractère oxydant comparés des dihalogènes.

- Lien avec l'électronégativité.

### 3.2 Propriétés acido-basiques des oxydes [1, 4]

- Définition d'un oxyde.

EXPÉRIENCE – Oxyde basique  $\text{MgO}$ , oxyde amphotère ( $\text{Al}(\text{OH})_3$  ou  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ) et un oxyde acide ( $\text{SO}_2$ ).

- Expliquer.

## Conclusion

- Résumé précis des idées fortes.
- Ouverture sur les molécules et la chimie organique.

NOTES : Leçon présentée le jour J. 10/15. Le jury aime bien voir le pouvoir oxydant comparé des dihalogènes. Faire attention à la sécurité.

## Solides cristallins (CP)

OBJECTIF – Présenter des modèles simples rendant compte des principales propriétés des solides cristallins.

NIVEAU – MPSI

PRÉ-REQUIS :

- Forces intermoléculaires
- Rayons métalliques et ioniques, électronégativité
- États de la matière

### Bibliographie

- [1] Collectif. *H-prépa chimie des matériaux inorganiques PC-PC\**. Hachette, 2004.
- [2] B. Fosset and J. B. Baudin. *Chimie tout-en-un PCSI*. Dunod, 2013.
- [3] P. Grécias and S. Rédoglia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [4] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.
- [5] A. L. Martin-Christol. Présentation de structures compactes des métaux. *BUP*, 623, 1980.

### Introduction [1]

ILLUSTRATION – Observation : sucre cristallisé, quelques roches, métaux, verre.

- Origine de la structure cristalline. États cristallisés et états amorphes.

## 1 Modèle du cristal parfait [1, 3]

### 1.1 Définition

- Cristal parfait : ordre absolu.
- Aspect pratique : considération à prendre en compte pour avoir un cristal parfait.

### 1.2 Description du cristal parfait [2]

- Motif. Définition et exemples.
- Réseau. Maille élémentaire. Schémas.

ILLUSTRATION – Avec des billes.

### 1.3 Caractéristiques d'une maille

- Géométrie. Population, coordinence, compacité, masse volumique.

## 2 Les cristaux métalliques [1, 2, 3]

### 2.1 Modèle des sphères dures et assemblage compact

- Présentation du modèle des sphères dures. Modes d'empilement.
- Coordinence.
- Aspect microscopique : cohésion du cristal - énergie de liaison.

## 2.2 Mailles cfc et cc

- Présentation de la maille cfc et calculs.

EXPÉRIENCE – Mesure de la masse volumique du cuivre à la fiole jaugée (pycnométrie). Paramètre de maille. Comparaison avec valeur tabulée (Bragg).

- Présentation rapide de la structure cc.

EXPÉRIENCE – Transition de phase entre variétés allotropiques du fer [4]. Attention, erreur dans les notations  $\alpha$  et  $\gamma$ .

## 2.3 Sites interstitiels

- Les dénombrer et les repérer sur la structure cfc. Rayon de ces sites.

## 3 Les alliages

Si on traite cette partie, on y met la présentation des sites interstitiels.

### 3.1 Alliages [5, 1, 3]

- Définition. Intérêt.
- Présentation des différents types. Exemples (métallurgie).

### 3.2 Stockage du dihydrogène [1]

- Exercice corrigé dans le H-prépa.

## 4 Les cristaux ioniques [3, 1, 2]

### 4.1 Définition du rayon ionique

- Condition de remplissage. Rayon ionique, liaison ionique.
- Cohésion et relation avec les propriétés thermodynamiques et mécaniques.

### 4.2 Structure des cristaux ioniques

- Présentation de la structure CsCl en détail.
- Structure type NaCl et blende plus rapidement.
- Conclusion et exemples.

## Conclusion

- Permet de comprendre beaucoup de choses.
- Ouverture sur la sciences des matériaux qui peut être très complexe (dislocations, défauts).

NOTES : Leçon préparée en oral blanc. Tout au long de la leçon, éclairer le propos avec les billes en polystyrène et le logiciel. On traite la partie sur les alliages ou les cristaux ioniques en fonction du temps restant. Peu d'expériences : beaucoup de temps restant en préparation : soigner le passage. Ne pas endormir le jury avec trop de calculs.

## Réactions d'oxydoréduction (CP)

**OBJECTIF** – Introduire les notions nécessaires à l'étude des réactions d'oxydoréduction pour l'appliquer à la compréhension de dispositifs électrochimiques et aux dosages.

**NIVEAU** – MPSI

**PRÉ-REQUIS :**

- Réactions d'oxydoréduction (lycée)
- Réactions de complexation, acido-basiques
- Titrage
- Formule de Lewis

### Bibliographie

- [1] S. Bach, F. Buet, and G. Volet. *CAPES de sciences physiques, tome 2 : Chimie*. Belin, 2006.
- [2] R. Didier and P. Gréacias. *Chimie Sup. PCSI*. Tec&Doc, 2000.
- [3] B. Fosset and J. B. Baudin. *Chimie tout-en-un PCSI*. Dunod, 2013.
- [4] P. Gréacias and S. Rédoglia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [5] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.
- [6] J. F. Le Maréchal and B. Nowak-Leclercq. *La chimie expérimentale : tome 1. Chimie générale*. Dunod, 2004.

### Introduction [3]

- Réaction acido-basique : échange de proton  $H^+$ .
- Transfert d'électrons : réaction d'oxydoréduction.
- Distinguer oxydation par voie sèche et oxydation par voie humide.

## 1 Couple oxydant-réducteur

### 1.1 Transfert électronique et réaction d'oxydoréduction [3]

**EXPÉRIENCE** – On met en évidence l'existence des réactions rédox par ajout de fer à une solution de  $CuSO_4$ . Disparition du bleu, dépôt de cuivre, mise en évidence de  $Fe^{2+}$  par  $SCN^-$  [2].

- Définition d'un oxydant, d'un réducteur. Transfert électronique. Oxydation et réduction. Bilan rédox. Le tout sur l'expérience introductive.

### 1.2 Nombres d'oxydation [3]

- Définition. Exemples. Équilibrage d'une réaction rédox.

## 2 Potentiel d'électrode, piles et accumulateurs

### 2.1 Approche expérimentale d'une pile [4, 6]

- Réaction chimique spontanée.
- Demi-pile et électrode.
- Pile. Force électromotrice. Fonctionnement en générateur.

**EXPÉRIENCE** – On constitue une pile Daniell. Force électromotrice. Résistance interne.

## 2.2 Potentiel d'électrode

- Définition théorique. Lien avec la pile. Électrode standard à hydrogène. Électrodes usuelles.
- Formule de Nernst. Application au calcul de  $K^0$ .

## 2.3 Accumulateur au plomb [1, 6]

- Définition d'un accumulateur et constitution.

EXPÉRIENCE – Décharge de l'accumulateur. Charge. Comparaison des temps et fem.

- Bilan de charge et de décharge.
- Aspect industriel.

## 2.4 Pile à combustible [1, 6]

- Principe d'une pile à combustible.

EXPÉRIENCE – Pile à combustible de démonstration.

- Constitution. Bilan. Anode et cathode.
- Aspect industriel.

## 3 Utiliser les réactions d'oxydoréduction pour doser [3]

### 3.1 Mise en oeuvre expérimentale [5]

- Dosage du sel de Mohr par les ions cériques. Explication des électrodes utilisées (platine et ECS).

EXPÉRIENCE – Réalisation du titrage.

- Constante de réaction. Incertitudes.

### 3.2 Courbe $E = f(V)$ et indicateur coloré [5]

- Calcul de la courbe  $E = f(V)$ .
- Définition d'un indicateur coloré. Conclusion quant à l'utilisation d'indicateur coloré (zone de virage).

EXPÉRIENCE – Titrage avec indicateur coloré.

- Éventuellement calcul du  $E^0$  du complexe.

## Conclusion

- Intérêt des réactions d'oxydoréduction.
- Ouverture sur les réactions en voie sèche et les diagrammes d'Ellingham.

NOTES : Leçon préparée en cours d'année. Un peu longue, on peut enlever au choix l'accumulateur au plomb ou la pile à combustible.

## Réactions de précipitation (CP)

**OBJECTIF** – Expliquer les réactions de précipitation, en donner une description théorique et des applications.

**NIVEAU** – MPSI

**PRÉ-REQUIS :**

- Solubilité (lycée)
- Réactions acide-base et de complexation
- Architecture de la matière
- Titrages

### Bibliographie

- [1] B. Fosset and J. B. Baudin. *Chimie tout-en-un PCSI*. Dunod, 2013.
- [2] P. Grécias and S. Rédoglia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [3] I. Wetzel. Titrage direct des ions chlorures par argentimétrie et sans ion chromate : la méthode de fajans. *BUP*, 841, 2002.

### Introduction [1, 2]

- Notion de solubilité niveau lycée : quelques rappels.
- Agrégats entre molécules sous forme de complexe en solution déjà vus.
- Nombreuses implications dans la vie quotidienne.

## 1 Produit de solubilité [1, 2]

### 1.1 Origine de la solubilité

- On a supposé les équilibres homogènes. Il se peut qu'une solution soit saturée : apparition d'un précipité.
- Deux moyens d'obtenir un précipité.

**EXPÉRIENCE** – Mise en évidence de l'existence d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{Ca}^{2+}$ .

- Bilan des réactions.

### 1.2 Produit de solubilité

- Mise en solution d'un sel. Définition du  $K_S$ .
- Condition de précipitation.
- Solubilité dans l'eau pure.

## 2 Paramètres influençant la solubilité [2]

### 2.1 Température

- Distinction de deux facteurs. Cas usuel. Application à la recristallisation.

**EXPÉRIENCE** – Application à la recristallisation de l'acide benzoïque.

### 2.2 Le pH

- Cas des hydroxydes amphotères. On fait le calcul pour  $\text{Al}^{3+}$ . On expose les résultats de Mg et Fe.

EXPÉRIENCE – Séparation sélective des ions fer et magnésium.

- Procédé utilisé en hydrométallurgie.

## 2.3 Effet d'ion commun

- Exposé du principe.

EXPÉRIENCE – Ajout de HCl à une solution de NaCl saturée.

# 3 Application à la chimie analytique

## 3.1 pH-métrie et précipitation [2]

- On étudie le dosage de  $\text{Al}^{3+}/\text{H}_3\text{O}^+$  (solution de nitrate d'aluminium acidifiée) par la soude. Rappel du diagramme de  $\text{Al}^{3+}$  (existence du précipité et prédominance des espèces en solution).

ILLUSTRATION – Simulation de dosage.

- On explique les espèces présentes, les points anguleux, les sauts.

## 3.2 Dosage par précipitation [1, 3]

- Déterminer les taux de  $\text{Cl}^-$  dans de l'eau minérale.
- Méthode de Vollaradt ou de Mohr avec déchets toxiques.
- Principe de la méthode de Fajans. Propriétés de AgCl.

EXPÉRIENCE – Réalisation du dosage.

## Conclusion

- Précipitation : permet de faire plein de choses.
- Importantes applications en chimie organique, en métallurgie et en chimie analytique.

NOTES : Être précis, bien interpréter et détailler les protocoles.

## Dosage par potentiométrie (CP)

**OBJECTIF** – Comprendre l'intérêt des dosages potentiométriques et être capable d'en tirer des informations.

**NIVEAU** – MPSI

**PRÉ-REQUIS :**

- Dosages (lycée)
- Oxydo-réduction (CP)
- Réactions de précipitation, de complexation
- Courbes intensité/potentiel

### Bibliographie

- [1] B. Fosset and J. B. Baudin. *Chimie tout-en-un PCSI*. Dunod, 2013.
- [2] P. Grécias and S. Rédoglia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [3] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.
- [4] J. F. Le Maréchal and B. Nowak-Leclerq. *La chimie expérimentale : tome 1. Chimie générale*. Dunod, 2004.
- [5] J. Mesplède and J. Randon. *100 manipulations de chimie générale et analytique*. Bréal, 2011.
- [6] J. Sarrazin and M. Verdaguer. *L'oxydoréduction, concepts et expériences*. Ellipses, 1991.

### Introduction [2]

- Nécessité d'un contrôle de qualité. Détecter et doser des éléments nocifs, des polluants entre autres exemples.
- Deux types de dosages : par étalonnage et par titrage. Ici, dosage par titrage uniquement.
- Utiliser la potentiométrie pour déterminer des concentrations inconnues, mais aussi pour remonter à des grandeurs thermodynamiques.

## 1 Principe d'un dosage potentiométrique [1, 2]

### 1.1 Rappels des principes généraux d'un titrage

- Principe d'un dosage par titrage direct, indirect et par retour. Équivalence.
- Réaction rapide, totale, unique et d'équivalence repérable.

### 1.2 Mesure d'un potentiel [6]

- L'électrode indicatrice : rappel des électrodes de première, de deuxième et de troisième espèces. Exemples.

**EXPÉRIENCE** – Montrer une électrode de chaque type.

- L'électrode de référence : ESH, électrode au calomel saturé. Schéma. Électrode d'argent, schéma.

## 2 Titrage du sel de Mohr par cérimétrie [5, 1, 3]

- Problématique de la conservation du sel de Mohr.

### 2.1 Réaction de dosage et réalisation

- Réaction. On vérifie qu'elle est quantitative.
- Principe du titrage. Électrode de référence et de mesure.

**EXPÉRIENCE – Dosage par suivi potentiométrique.**

- Prévion de la forme de la courbe et méthode de repérage de l'équivalence.
- Volume équivalent et concentration. Incertitudes. Conclusion.

**2.2 Prévion de grandeurs thermodynamiques [6]**

- Potentiel à la demi et à la double équivalence. Différences.
- Explication : complexe  $\text{Fe}(\text{SO}_4)^+$  et potentiel mixte  $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ . Explication des différences.

**2.3 Détermination de la stoechiométrie d'un complexe [5]****EXPÉRIENCE – Dosage 15.2.**

- Explication des différentes étapes du dosage. Conclusion sur la stoechiométrie.
- Remarque sur les potentiel du couple  $\text{Fe}(\text{III})/\text{Fe}(\text{II})$  complexé et non complexé.
- Indicateurs colorés rédox.

**3 Titrage des ions chlorure (ou mélange d'halogénures) par conductimétrie [4, 5]**

- Dosage des ions chlorures ou d'un sérum physiologique.

**3.1 Protocole expérimental**

- Réaction support de dosage.

**EXPÉRIENCE – Dosage n°21.**

- Électrodes utilisées.

**3.2 Interprétation**

- Repérage de l'équivalence. Concentration et incertitudes. Valeur attendue.

**3.3 Calcul des grandeurs thermodynamiques**

- Obtention des  $K_S$ .

**Conclusion**

- Intérêt des dosages potentiométriques pour déterminer une concentration, mais aussi des grandeurs thermodynamiques. Dosage par étalonnage non pertinent.

**NOTES :** Savoir de quoi on parle, notamment sur les courbes  $i/E$ . Leçon pas très difficile sinon.

## Dosage acido-basiques (CP)

**OBJECTIF** – Utiliser les dosages acido-basiques pour obtenir les concentrations et des grandeurs thermodynamiques.

**NIVEAU** – MPSI

**PRÉ-REQUIS :**

- Réactions acido-basiques
- Dosages (lycée)
- Stéréoisomérisation Z/E
- Liaison hydrogène

### Bibliographie

- [1] D. Cahcau-Herreillat. *Des expériences de la famille Acide-Base (50 manipulations)*. De Boeck, 2009.
- [2] B. Fosset and J. B. Baudin. *Chimie tout-en-un PCSI*. Dunod, 2013.
- [3] P. Grécias and S. Rédoglia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [4] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.
- [5] J. Mesplède and J. Randon. *100 manipulations de chimie générale et analytique*. Bréal, 2011.

### Introduction [3]

- Problématique des contrôles de qualité, en particulier dans les domaines environnementaux.

**EXPÉRIENCE** – Papier pH : insister sur l'imprécision.

- Voir plusieurs méthodes de titrage et ce que l'on peut en tirer comme informations supplémentaires.

## 1 Dosage simple d'un acide [2, 3]

### 1.1 Dosage d'un monoacide faible

- Position du problème. Calcul de la courbe  $\text{pH} = f(V)$ .

**ILLUSTRATION** – Simulation du dosage de l'acide éthanoïque par la soude.

- Méthode de détermination de l'équivalence : méthode des tangentes, de la dérivée, de Gran. Avantages et inconvénients de chacune. Indicateurs colorés.

**EXPÉRIENCE** – Concentration en  $\text{CH}_3\text{COOH}$  dans un vinaigre blanc.

- Volume équivalent. Concentration. Incertitudes.  $\text{pK}_a$  du couple.

### 1.2 Dosage de polyacides – Séparation de deux stéréoisomères [4]

- Position du problème. Formules topologiques.

**EXPÉRIENCE** – Dosage de l'acide maléique.

- Différenciation des pics. Deux équivalences.

**EXPÉRIENCE** – Dosage pH-métrique et conductimétrique de l'acide fumarique.

- Un seul saut mais deux ruptures de pentes : apport de la conductimétrie.
- Explication des différences de  $\text{pK}_a$  : un moyen de caractérisation des stéréoisomères.

## 2 Doser un acide trop faible [3, 1]

- Acide borique : pKa.
- Utilisation des équilibres de complexation.

### 2.1 Principe

- Calcul du pKa du nouveau couple.

ILLUSTRATION – Simulation du dosage avant et après l'ajout.

### 2.2 Réalisation expérimentale

EXPÉRIENCE – Réaliser les deux courbes de dosages.

- Calculer les pKa. Commenter les résultats du titrage pour avoir les constantes thermodynamiques.
- Concentrations et incertitudes.

## 3 Doser pour caractériser un ion métallique [3, 5]

Ici, on s'intéresse à l'ion  $\text{Al}^{3+}$ .

### 3.1 Réalisation expérimentale

- Explication du principe. Domaines d'existence, de prédominance en solution. Protocole expérimental.

EXPÉRIENCE – Faire le dosage.

### 3.2 Interprétation

- Interpréter correctement chaque étape du dosage. En déduire les concentrations avec incertitudes et les grandeurs thermodynamiques.
- Reconstruction des diagrammes d'existence et de prédominance.

## Conclusion

- Résumé des techniques d'un titrage, de ce qu'il peut apporter en plus des concentrations.
- Ouverture sur les dosages potentiométriques ou sur les contrôles de qualité.

NOTES : Il faut déduire des constantes thermodynamiques, utiliser des logiciels de simulation, parler d'indicateur coloré (voir BO de PCSI).

## Cinétique homogène (CP)

**OBJECTIF** – Illustrer et étudier l'importance des phénomènes cinétiques en chimie et les quantifier.

**NIVEAU** – PCSI

**PRÉ-REQUIS :**

- Cinétique (lycée)
- Bilans de matière, étude d'équilibre
- Conductimétrie

### Bibliographie

- [1] S. Bach, F. Buet, and G. Volet. *CAPES de sciences physiques, tome 2 : Chimie*. Belin, 2006.
- [2] B. Fosset and J. B. Baudin. *Chimie tout-en-un PCSI*. Dunod, 2013.
- [3] P. Gréacias and S. Rédoglia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [4] J. Mesplède and J. Randon. *100 manipulations de chimie générale et analytique*. Bréal, 2011.

### Introduction [2]

- Intérêt et nécessité d'étudier la cinétique des réactions en plus de la thermodynamique.
- Existence de réactions lentes, voire cinétiquement bloquées (exemple diamant  $\rightarrow$  graphite, dismutation de l'eau oxygénée, réduction du permanganate en solution).
- Quantifier théoriquement et expérimentalement la cinétique macroscopique.

## 1 Vitesse de réaction [2, 3]

### 1.1 Système considéré

- Étude de l'évolution sur un plan macroscopique, par opposition au plan microscopique. Réactions thermodynamiquement possibles.
- Cinétique homogène et hétérogène.
- Système étudié.

### 1.2 Vitesses de formation et de disparition

- Réaction générale  $\alpha A + \beta B \rightarrow \gamma C + \delta D$ . Exemples. Définition des vitesses de formation et de disparition. Toujours définissable.

### 1.3 Vitesse de réaction

- Cas où une seule réaction se passe. Conséquence de la conservation de la matière. Définition de la vitesse de réaction.

### 1.4 Paramètres influençant la cinétique [1]

- Rappel de lycée : réaction=choc (très qualitativement). Influence de la concentration et de la température.

## 2 Influence de la concentration [2, 3]

- Postuler une loi de vitesse que l'on vérifie ensuite.

## 2.1 Notion d'ordre

- Définition de l'ordre. Unité de  $k$ . Limite de la notion d'ordre (loi de vitesse différentes, catalyse enzymatique). Ordre vis-à-vis d'un réactif et ordre global. Notion expérimentale.
- Origine : décomposition en actes élémentaires simples.

## 2.2 Étude expérimentale [4]

- Hydrolyse du chlorure de tertiobutyle.

EXPÉRIENCE – Suivi conductimétrique pour deux mélanges acétone/eau différents.

- L'eau n'est pas un réactif de l'ECD. Explication de la dépendance de  $k$ . Commencer un suivi devant le jury.
- Temps de demi-réaction, méthode du mélange équimolaire, méthodes différentielles et intégrales. Intérêt et limites.

## 3 Influence de la température

- On a vu que la constante dépendait du solvant. Dépend-elle aussi de la température ?

### 3.1 Loi empirique d'Arrhénius

- Énoncé. Caractère empirique. [Justification par l'équation de Fokker-Planck](#). Contenu physique de l'énergie d'activation.

### 3.2 Détermination expérimentale d'une énergie d'activation

EXPÉRIENCE – Manipulation n°79 [4].

- Explication du protocole et interprétation. Calcul de l'énergie d'activation.

## Conclusion

- Rappel des méthodes de suivi.
- Ouverture sur la catalyse, sur le contrôle cinétique en chimie organique.

NOTES : Faire attention au contrôle de la température si on compare présentation/passage. Parler un peu de mécanismes réactionnels sans entrer dans les détails.

## Évolution et équilibre chimique (CP)

**OBJECTIF** – Comprendre les mécanismes définissant l'équilibre chimique, et comment l'appliquer au contrôle des synthèses.

**NIVEAU** – MP

**PRÉ-REQUIS :**

- Équilibre en solution aqueuse, loi d'action des masses
- Potentiel chimique, enthalpie libre, thermodynamique
- Estérification
- État standard

### Bibliographie

- [1] D. Cauchy, A. Durupthy, O. Durupthy, and al. *H-prépa chimie PC-PC\**. Hachette, 2004.
- [2] P. Grécias. *Chimie PC-PC\**. Tec&Doc, 2009.
- [3] J. Jézéquel, H. Monin-Soyer, and G. Dupuis. étude de l'équilibre entre  $\text{NO}_2(\text{g})$  et  $\text{N}_2\text{O}_4(\text{g})$ . *BUP*, 879, 2005.
- [4] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.
- [5] F. Porteu de Buchère. *L'épreuve orale du CAPES de chimie*. Dunod, 2008.

### Introduction

- Introduction des potentiels chimiques. Critère d'évolution avec le quotient de réaction. Mettre en lien ces deux notions.

**EXPÉRIENCE** – Déplacement de l'équilibre de précipitation de NaCl par ajout de HCl.

- Cas général d'une réaction. Équilibre chimique et dépendance en fonction de divers paramètres.
- On ne revient pas sur les équilibres en solution aqueuse et on ne traitera pas les ruptures d'équilibre.

## 1 Évolution et équilibre chimique [1, 2]

### 1.1 Définition de l'affinité chimique

- On part de l'identité thermodynamique pour G, on introduit  $\Delta_r G$  et le critère d'évolution  $\Delta_r G d\xi < 0$  ou  $\mathcal{A} d\xi > 0$ .

### 1.2 Loi d'action des masses

- On démontre la loi d'action des masses, avec équilibre chimique et la condition d'évolution. On traite toujours le cas général.

### 1.3 Déplacement d'équilibre et principe de modération

- Énoncé du principe de modération, et le raisonnement avec trois états, deux à l'équilibre et un a priori hors d'équilibre.

## 2 Influence de la pression [1, 2]

### 2.1 Illustration expérimentale

**EXPÉRIENCE** – Changement de couleur par changement de pression [3].

- Bien expliquer le protocole. Dimérisation du  $\text{NO}_2$  : formules de Lewis.

## 2.2 Justification théorique

- Exposer le résultat expérimental : loi de Le Châtelier.
- Démonstration de la loi de Le Châtelier.

## 2.3 Application à la synthèse de l'ammoniac

- Justifier les conditions expérimentales de la synthèse de l'ammoniac.

# 3 Influence de la température

## 3.1 Illustration expérimentale [1, 2]

EXPÉRIENCE – Une seringue dans la glace, l'autre à 35°C (bain-marie) et l'autre à température ambiante [3].

## 3.2 Justification théorique : loi de Vant'Hoff

- Exposer le résultat. Démonstration.

## 3.3 Application à la recristallisation [5]

- Expliquer le principe de la recristallisation bien en détail, son intérêt.

EXPÉRIENCE – Recristallisation de l'acide benzoïque (la pluie d'or, c'est joli mais pas très éthique et responsable).

# 4 Influence de la composition du système [1, 2]

## 4.1 Principe de modération, constituants actifs et passifs

- Définition des constituants actifs et passifs.
- Ajout ou retrait d'un réactif ou d'un produit.

## 4.2 Application au Dean-Stark [4]

EXPÉRIENCE – Synthèse de l'éthanoate d'isoamyle.

- Expliquer tant l'aspect expérimental que l'aspect théorique.
- Mesure du volume d'eau. Si le temps, purification et rendement de la synthèse. Illustrer l'intérêt du dispositif.

# Conclusion

- Intérêt de l'affinité chimique pour prévoir l'évolution et l'équilibre chimique.
- Compétition avec des phénomènes cinétiques (synthèse de l'ammoniac).

NOTES : Être assez direct dans les démonstrations. Le BFR de thermo (et oui !) peut être assez utile dans cette leçon. Soigner les illustrations expérimentales.

## Optimisation d'un processus de synthèse industrielle (CP)

**OBJECTIF** – Comprendre comment optimiser un processus de synthèse industrielle réalisé à grande échelle.

**NIVEAU** – MP

**PRÉ-REQUIS :**

- Thermodynamique chimique
- Dosages par potentiométrie

### Bibliographie

- [1] S. Bach, F. Buet, and G. Volet. *CAPES de sciences physiques, tome 2 : Chimie*. Belin, 2006.
- [2] D. Cauchy, A. Durupthy, O. Durupthy, and al. *H-prépa chimie PC-PC\**. Hachette, 2004.
- [3] R. Grüber and É. Martinand-Lurin. *40 expériences illustrées de chimie générale et organique*. De Boeck, 2012.
- [4] P. Grécias and S. Rédoglia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [5] J. Jézéquel, H. Monin-Soyer, and G. Dupuis. étude de l'équilibre entre  $\text{NO}_2(\text{g})$  et  $\text{N}_2\text{O}_4(\text{g})$ . *BUP*, 879, 2005.
- [6] R. Perrin and J. P. Scharff. *Chimie industrielle*. Dunod, 2002.
- [7] A. Simaan. Grandeur et décadence de fritz haber. *BUP*, 874, 2005.
- [8] F. Souil and L. Leboutet. *Expériences de chimie, CAPES de sciences physiques. Tome 2 : chimie minérale*. Bréal, 2000.

### Introduction

- On a vu plusieurs protocoles de synthèse, souvent optimisés pour produire de petites quantités en TP.
- L'industrialisation nécessite de produire de gros volumes avec des contraintes en terme de coût, de rendement horaire, d'énergie, de sécurité et d'écologie.
- On va appuyer cette leçon sur la synthèse du nitrate d'ammonium  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , qui sera l'occasion de réinvestir les connaissances acquises.

## 1 Première étape : la synthèse de l'ammoniac [2, 1]

### 1.1 Généralités [7]

- Équilibre de synthèse de l'ammoniac : petit aperçu historique.
- Aspect thermodynamique :  $\Delta_r H^0$ ,  $\Delta_r S^0$ ,  $\Delta_r G^0$  et  $T_i$ .

### 1.2 Influence des grandeurs thermodynamiques [5, 4]

- Influence de la pression, puis de la température sur l'équilibre de synthèse.

**EXPÉRIENCE** – Illustration expérimentale sur l'équilibre de dimérisation du dioxyde d'azote.

- Taux de conversion en fonction de la température et de la pression. Graphique.
- Influence de la composition du mélange.

### 1.3 Importance de la cinétique de réaction

- Influence de la température. Lien avec la thermodynamique.
- Catalyseur.

## 1.4 Aspect industriel [6]

- Matières premières et obtention du dihydrogène.
- Élimination de l'ammoniac et déplacement d'équilibre.

## 2 Deuxième étape : synthèse de l'acide nitrique [6, 1, 8]

### 2.1 Présentation de la synthèse

- Réaction réalisée.
- Étapes de la réaction. Problèmes posés et résolution.

### 2.2 Modèle expérimental

EXPÉRIENCE – Montage de la synthèse de l'acide nitrique. Mise en évidence.

- Présentation des différentes étapes, et de leur illustration expérimentale. Insister sur le fait que l'on optimise.

### 2.3 Aspect industriel et obtention du nitrate d'ammonium

- Décrire les procédés de synthèse, du traitement des effluents.
- Utilisation de l'acide nitrique.
- Synthèse et utilisation des engrais. Ordres de grandeur.

## 3 Caractérisation d'un engrais liquide : titrage des ions nitrates [3, 4]

### 3.1 Présentation du protocole

- Présentation du protocole de titrage et de la préparation des solutions.

EXPÉRIENCE – Réalisation du titrage et points expérimentaux.

### 3.2 Interprétation

- Réaction de titrage, volume équivalent, méthode de Gran et conclusion. Incertitudes.

## Conclusion

- Aspect cinétique et thermodynamique des synthèses industrielles. Contrôles de qualité.
- Ouverture sur d'autres synthèses, des procédés de la chimie verte.

NOTES : Être assez rapide pour tout montrer. La manipulation de synthèse de l'acide nitrique ne permet pas d'obtenir une quantité quantifiable, mais on peut montrer qu'on en produit.

## Hydrométallurgie (CP)

OBJECTIF – Comprendre un processus d'hydrométallurgie et son intérêt.

NIVEAU – PSI

PRÉ-REQUIS :

- Diagrammes E/pH
- Courbes i/E
- Réactions acido-basiques
- Pyrométallurgie

### Bibliographie

- [1] Collectif. *H-prépa chimie des matériaux inorganiques PC-PC\**. Hachette, 2004.
- [2] B. Fosset, J. B. Baudin, F. Lahitète, and V. Prévost. *Chimie tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2009.
- [3] J. Philibert and Y. Bréchet. *La métallurgie : du minerai au matériau*. Dunod, 2003.
- [4] J. L. Vignes, M. Abdrabah, J. M. Baby, and C. Eusèbe. Une vie de zinc. *BUP*, 770, 1995.
- [5] J. L. Vignes and Y. Jehanne. L'hydrométallurgie. *BUP*, 857, 2003.

### Introduction [5, 3]

- Définition de la métallurgie. Distinguer pyrométallurgie (diagrammes d'Ellingham) et hydrométallurgie.
- Développement de l'hydrométallurgie plus récent.
- Pourcentage en importance (Zn, Au, Cu, ...). Ici, on étudiera le zinc.
- Avantage (coût énergétique, CO<sub>2</sub>) et inconvénients (déchets).

## 1 Du minerai à la solution aqueuse

### 1.1 Étapes préliminaires [5, 3, 1]

- Minerai de blende. Teneur en zinc dans le minerai. Traitement par flottation.
- Grillage de la blende.

### 1.2 Lixiviation [4, 1]

- Définition de la lixiviation.

EXPÉRIENCE – Réalisation de la lixiviation. Filtration.

- Réaction de solubilisation. On filtre PbSiO<sub>2</sub> qui ne se dissout pas en milieu sulfate (PbSO<sub>4</sub>). Remarque sur le choix de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (pas de gaz toxique et produit lors du grillage).

## 2 Purification

### 2.1 Précipitation des hydroxydes [1]

EXPÉRIENCE – Précipitation du fer après oxydation par MnO<sub>2</sub> [4].

- Interpréter avec les diagrammes E/pH. pH de début de précipitation (tableau).

EXPÉRIENCE – Formation de la jarosite et filtration. Test avec KSCN [4].

- Réaction de précipitation du fer.

## 2.2 Cémentation [5, 1]

- Bilan des ions en présence. Principe de la cémentation.
- Courbes intensité-potentiel.

EXPÉRIENCE – Ajout d'un spatule puis filtration. Test de  $\text{Cu}^{2+}$ .

- Industriellement, cas du cobalt, du nickel et du cadmium (catalyseur).

## 3 Électrolyse [5, 4, 3, 1]

### 3.1 Choix des électrodes [2]

- Anode en plomb. Étude cinétique et thermodynamique.
- Cathode en zinc. Étude thermodynamique. Étude des courbes intensité-potentiel.
- Différence de potentiel à imposer.

### 3.2 Réalisation

- Réalisation de l'électrolyse.

EXPÉRIENCE – Réaliser l'électrolyse. Observer le dégagement de gaz et la formation de zinc métallique.

- Aspects industriels.

### 3.3 Rendement

- Calcul du rendement.

## Conclusion

- Intérêt de l'hydrométallurgie.
- Grande utilisation de celle-ci.
- Ouvrir sur les applications industrielles du zinc, notamment la protection contre la corrosion.

NOTES : Leçon pas trop longue, être très clair et précis, soigner les manipulations. Bien maîtriser les courbes  $i/E$  et les diagrammes  $E/\text{pH}$ .

## Diagrammes potentiel-pH (construction exclue) (CP)

OBJECTIF – Voir et comprendre les applications des diagrammes E/pH.

NIVEAU – MPSI

PRÉ-REQUIS :

- Thermodynamique rédox
- Construction des diagrammes E/pH
- Dosages

### Bibliographie

- [1] D. Cauchy, A. Durupthy, O. Durupthy, and al. *H-prépa chimie PC-PC\**. Hachette, 2004.
- [2] Collectif. *H-prépa chimie des matériaux inorganiques PC-PC\**. Hachette, 2004.
- [3] B. Fosset and J. B. Baudin. *Chimie tout-en-un PCSI*. Dunod, 2013.
- [4] P. Grécias. *Chimie PC-PC\**. Tec&Doc, 2009.
- [5] P. Grécias and S. Rédolia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [6] J. F. Le Maréchal and B. Nowak-Leclerq. *La chimie expérimentale : tome 1. Chimie générale*. Dunod, 2004.
- [7] J. Philibert and Y. Bréchet. *La métallurgie : du minerai au matériau*. Dunod, 2003.
- [8] J. Sarrazin and M. Verdaguer. *L'oxydoréduction, concepts et expériences*. Ellipses, 1991.
- [9] J. L. Vignes, M. Abdrabah, J. M. Baby, and C. Eusèbe. Une vie de zinc. *BUP*, 770, 1995.
- [10] J. L. Vignes and Y. Jehanne. L'hydrométallurgie. *BUP*, 857, 2003.

### Introduction [4, 1]

- On a vu dans une leçon précédente la construction de diagrammes potentiel-pH, basés sur des données thermodynamiques, en particulier la formule de Nernst.

EXPÉRIENCE – Variation du pouvoir oxydant des ions permanganate [8].

- Mise en évidence expérimentale de variations des propriétés en fonction du pH. Mais l'interprétation de cette expérience n'est pas simple, d'où cette leçon.

## 1 Lecture des diagrammes E/pH [4, 1]

### 1.1 Pour une espèce seule

- Diagramme potentiel-pH du cuivre. Stabilité des espèces de l'élément cuivre, après rappel rapide des conventions et du principe de tracé.
- Lecture des constantes thermodynamiques.

EXPÉRIENCE – Formation de  $\text{Cu}_2\text{O}$  en milieu basique, de  $\text{Cu}$  et  $\text{Cu}^{2+}$  en milieu acide.

### 1.2 Superposition au diagramme de l'eau

- Stabilité du cuivre métallique. Origine du vert de gris.

### 1.3 Superposition des diagrammes halogènes et manganèse : retour sur l'expérience introductive [8]

- Explication de l'expérience introductive.

## 1.4 Cas de l'eau de Javel

- Cette partie est facultative.
- Stabilité des espèces. Attention avec l'eau de Javel.

## 2 Application aux dosages : méthode de Winkler [5, 3, 6]

### 2.1 Protocole et justification

- But : doser le dioxygène. Problème qui se pose : loi de Henry.
- Principe détaillé des étapes du dosage. Résumé.

### 2.2 Réalisation expérimentale

EXPÉRIENCE – Dosage.

- Conclusion.

## 3 Hydrométallurgie du zinc [10, 7, 2, 9]

- Rappel de ce qu'est l'hydrométallurgie et de son importance industrielle.
- Étapes préliminaires à l'obtention de l'oxyde de zinc.

### 3.1 Lixiviation

- Définition de la lixiviation.

EXPÉRIENCE – Réalisation de la lixiviation. Filtration.

- Réaction de solubilisation. On filtre. Remarque sur  $H_2SO_4$ .

### 3.2 Précipitation des hydroxydes

EXPÉRIENCE – Précipitation du fer (III) après oxydation par  $MnO_2$ .

- Interpréter avec les diagrammes E/pH. pH de début de précipitation.

EXPÉRIENCE – Formation de la jarosite et filtration. Test à KSCN.

- Réaction de précipitation du fer.

### 3.3 Cémentation

- Bilan des ions en présence. Principe de la cémentation.

EXPÉRIENCE – Ajout d'une spatule puis filtration.

- Les diagrammes E/pH ne suffisent pas, nécessite la prise en compte de la cinétique.
- Fin du processus.

## Conclusion

- On peut faire plein de choses avec les diagrammes E/pH.
- Ouverture sur les courbes intensité-potentiel.

NOTES : Insister à chaque étape sur l'apport des diagrammes E/pH à la compréhension.

## Corrosion humide des métaux (CP)

**OBJECTIF** – Présenter les phénomènes de corrosion humide et les différents moyens pour y remédier.

**NIVEAU** – MP

**PRÉ-REQUIS :**

- Diagrammes E/pH
- Courbes i/E
- Oxydoréduction

### Bibliographie

- [1] Collectif. *H-prépa chimie des matériaux inorganiques PC-PC\**. Hachette, 2004.
- [2] P. Grécias. *Chimie PC-PC\**. Tec&Doc, 2009.
- [3] J. Sarrazin and M. Verdaguer. *L'oxydoréduction, concepts et expériences*. Ellipses, 1991.

### Introduction

- Lutter contre la corrosion : souci économique, gros enjeu industriel. Met en cause la longévité des structures en acier, omniprésentes.
- Étude de la corrosion d'un point de vue chimique pour la comprendre et lutter contre.
- Contextualisation.

## 1 Le phénomène de corrosion [1, 2]

### 1.1 Corrosion humide et corrosion sèche

- Définition de la corrosion. Présence d'un oxydant. Exemples.
- Corrosion sèche et corrosion humide.

### 1.2 Facteurs de la corrosion humide

- Observations expérimentales (pas fait car la corrosion est un phénomène lent).
- Conclusion. Lister les facteurs et les classer en deux types.

### 1.3 Corrosion uniforme et corrosion différentielle

- Corrosion uniforme (ou chimique) et différentielle (ou électrochimique) : définitions. Insister sur le fait qu'un métal est aussi un bon conducteur.
- Exemples.

## 2 La corrosion uniforme [1, 2]

### 2.1 Aspect thermodynamique

- On rappelle les règles pour construire un diagramme E/pH et on donne celui du fer. Définition des trois domaines. Superposition avec celui de l'eau.

### 2.2 Exemples de passivation

**EXPÉRIENCE – Protection et déprotection du fer par les ions nitrate.**

- Importance du caractère protecteur ou pas de l'oxyde solide (rouille poreuse). Aluminium :  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ok.

**2.3 Protection électrochimique par courant imposé [3]**

- On impose au système d'être dans son domaine de passivation (si efficace) ou d'immunité. Utilisation des courbes intensité/potentiel.

**2.4 Cinétique de la corrosion et anode sacrificielle [3]****EXPÉRIENCE – Attaque de HCl sur différents métaux (Pb, Fe, Ag, Zn). Tests de  $\text{Fe}^{2+}$  avec  $\text{SCN}^-$ , de  $\text{Zn}^{2+}$  avec  $\text{HO}^-$ .**

- Interprétation pour les courbes anodiques et cathodiques de l'eau. Conclusion.
- Protection anodique par anode sacrificielle. Application sur les cuves dans la terre, les bateaux.

**3 Corrosion différentielle [3, 1, 2]****3.1 Mise en évidence expérimentale****EXPÉRIENCE – Clou dans un solution de sel (zone d'écrouissage).**

- Explication : la phénolphthaléine indique la basicité, le ferricyanure caractérise  $\text{Fe}^{2+}$ .
- Observations et interprétations. Rôle de NaCl. Fonctionnement en micropile.

**3.2 Hétérogénéité de concentration****Aération différentielle****EXPÉRIENCE – Clou vertical en tube à essai.**

- Explication du protocole et interprétation. Corrosion des poteaux métalliques dans la terre.

**Différence de concentration**

- Représentation par une pile. Sens du courant et conclusion.

**3.3 Protection contre la corrosion****EXPÉRIENCE – Clou avec fil de cuivre et de zinc.**

- Explication du protocole, observation et interprétation.
- Traitement de surface. Galvanisation (40% du zinc produit), électrozingage. Conséquence d'une rayure.

**Conclusion**

- Résumé précis des idées fortes.
- Données industrielles, comparaison des différents modes de protection, prix.

**NOTES :** Ne pas rester trop près de la bibliographie, bien maîtriser les courbes  $i/E$ . Prévoir plusieurs boîtes de Pétri et tubes à essai et ne montrer que les plus beaux.

## Conformations et configurations (CP)

OBJECTIF – Comprendre les conséquences de la structure tridimensionnelle des molécules.

NIVEAU – PCSI

PRÉ-REQUIS :

- Règles CIP, isomérisation Z/E
- Formules brute, semi-développée, topologique
- Isomérisation de constitution
- Liaison hydrogène
- Représentation de Cram, de Newmann

### Bibliographie

- [1] B. Fosset and J. B. Baudin. *Chimie tout-en-un PCSI*. Dunod, 2013.
- [2] P. Gréacias and S. Rédoglia. *Chimie PCSI*. Tec&Doc, 2013.
- [3] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.

### Introduction

- Plusieurs manières de décrire les molécules : formule brute, développée, topologique.
- On veut différencier les espèces selon leurs propriétés.

EXPÉRIENCE – Bandelettes imbibées de (+)-carvone et de (-)-carvone [3]

- La formule semi-développée ne rend pas compte d'une différence de propriétés manifeste.

## 1 Stéréoisomérisation de conformation [1]

### 1.1 Rappel : isomérisation de constitution, de fonction

- Formule brute : pour accéder à cela, on peut par exemple réaliser une combustion.
- Plus précis : formule semi-développée : spectre infrarouge et RMN pour les distinguer.
- Cas de la carvone : même formules semi-développées : les atomes s'arrangent dans l'espace.

### 1.2 Énantioisomères et diastéréoisomères

- Définition des stéréoisomères de configuration.

ILLUSTRATION – Modèles moléculaires. Illustrer plusieurs exemples (R,S), (Z,E) avec les modèles.

- Distinction plus fine : définition des notions d'énantiomérisation et diastéréoisomérisation. Retour sur l'expérience introductive : énantiomères ou diastéréoisomères ?

### 1.3 Propriétés physico-chimiques et stéréoisomérisation [3]

- Retour sur la carvone : propriétés spatiales à l'origine de la différence d'odeur. Pourquoi différencier diastéréoisomères et énantiomères ? Propriétés physiques différentes.
- Température de fusion de l'acide fumarique et maléique.

EXPÉRIENCE – Mesure du point de fusion de l'acide maléique et de l'acide fumarique au banc Kofler.

- Explication chimique de la variation de température de fusion (liaison H). Conclusion : ce sont des diastéréoisomères.
- Indice de réfraction de la carvone.

EXPÉRIENCE – Mesure de l'indice de réfraction des deux carvones.

## 1.4 Chiralité [2, 3]

- Carvone : semblent énantiomères. Définition de la chiralité.
- Origine de la chiralité : définition d'un carbone asymétrique. Lien chiralité - carbone asymétrique.

EXPÉRIENCE – Mesure du pouvoir rotatoire des deux carvones (juste à la lampe QI, polariseur et analyseur).

- Caractérisation : règles CIP. Exemple sur la carvone.
- Cas des molécules à deux carbones asymétriques.
- On augmente d'un degré dans la description de la molécule.

## 2 Stéréoisomérisation de conformation [2, 1]

### 2.1 Notion de conformation et énergie de l'éthane

- Différence entre liaison simple et liaison double. (Rapidement) orbitales  $\pi$  et  $\sigma$ , recouvrement axial et latéral.

ILLUSTRATION – Sur des modèles moléculaires.

- Représentation de Neumann. Explication rapide. Répulsion entre les H. Diagramme des énergies potentielles (en  $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ).

### 2.2 Analyse conformationnelle de la molécule de butane

- De même : définitions et explications. Conformations symétriques, antisymétriques.

ILLUSTRATION – Sur des modèles moléculaires.

- Répartition statistique des conformères (qualitatif).

ILLUSTRATION – Logiciel gabedit pour le tracé du diagramme énergétique.

## 3 Applications en synthèse organique

### 3.1 Importance de la distinction d'énantiomères [1]

- Retour sur la carvone : le corps humain ne réagit pas de la même manière.
- Exemple de la thalidomide (à retenir) : un est un tranquillisant, l'autre toxique pour le fœtus.

### 3.2 Dédoublage d'un racémique [3]

- Exposé du protocole expérimental, des deux énantiomères à séparer, du principe du dédoublage.

EXPÉRIENCE – Dédoublage de l'acide phénylsuccinique.

## Conclusion

- Résumé précis et complet des idées fortes.
- Importance en biologie. Acide aminés chiraux, un seul énantiomère existe.

NOTES : Leçon très longue, aller assez vite sur la partie 1. Leçon assez déséquilibrée car seuls l'éthane et le butane sont au programme de PCSI option SI.

Troisième partie

Montages de physique

## Conseils pour les montages

THÉORÈME – Dès que possible, faire une droite au lieu d'un seul point (par exemple pour les temps de vol).

THÉORÈME – – Détailler au moins un calcul d'incertitude

- Toutes les incertitudes doivent être dûment justifiées (données constructeurs,...)
- Ne pas sous-estimer certaines incertitudes (état de surface, déclenchement humain) : considérer la dispersion des mesures
- Discuter un  $\chi^2$

THÉORÈME – Avoir un Handbook ostensiblement posé sur la table.

**Faire des sauvegardes** sur papier des mesures, et faire un imprimécran des courbes.

Le tableau doit être **propre**, garder assez de temps pour le préparer. Y inclure un schéma de chaque expérience, l'allure des courbes, la loi théorique, le résultat avec incertitude et la valeur attendue.

**Se poser des questions** sur la visée du montage, exploiter au maximum les manipulations.

Ne pas faire des mesures absurdes (mesure d'une longueur par écoulement de Poiseuille).

**Montrer** son savoir-faire expérimental, sa connaissance du matériel, sa capacité à exploiter des mesures, à interpréter les résultats et à faire preuve d'esprit critique.

**Consulter** les rapports du jury.

# Dynamique newtonienne

OBJECTIF – Mettre en évidence les lois régissant la dynamique newtonienne, les notions de quantité de mouvement, d'énergie et de moment cinétique.

## Bibliographie

- [1] R. Duffait. *Expériences de physique au CAPES de sciences physiques*. Bréal, 2011.
- [2] T. Gibaud and A. Gibaud. Etude des effets non-linéaires sur les oscillations d'un pendule simple. *BUP*, 891, 2007.
- [3] L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 1 : Mécanique*. Pierron, 1992.
- [4] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

## Introduction

- Dynamique newtonienne : basée historiquement sur le principe fondamental de la dynamique.
- Définition des principales grandeurs cinétiques : permet une étude du mouvement plus commode.

## 1 Quantité de mouvement en mécanique classique

- Principe fondamental de la dynamique.

### 1.1 Conservation de la quantité de mouvement

- Mobiles autoporteurs : quantification du frottement.
- Choc entre deux mobiles : vérifier la conservation de la quantité de mouvement. Voir aussi l'évolution de l'énergie cinétique.

MANIPULATIONS : Mettre en route le dispositif pour mobiles autoporteurs et vérifier que tout marche. Régler la période de marquage sur 40 ms et sélectionner "enregistrement en mode séparé". Régler l'horizontalité de la table à coussin d'air.

Lancer le mobile pour faire un marquage d'un bout à l'autre de la table. Mesurer l'écart entre les deux points initiaux et finaux et quantifier la variation de vitesse dues aux frottements.

Lester un des deux mobiles, et peser les deux. Faire rentrer dans une collision assez frontale ( $90^\circ$ , pour voir la diminution puis restitution, même partielle, de l'énergie cinétique). Montrer la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement avant et après le choc.

Faire l'analyse sur Cineris, après avoir pris en photo la page A2 marquée et une règle. Définir l'origine du repère, réaliser un étalonnage de longueur. Démarrer le traitement, spécifier le temps (40 ms) et le nombre de mobiles. Analyser ensuite le tableau de données.

### 1.2 Chute libre d'une bille

- Expérience avec la chute d'une bille. Principe fondamental de la dynamique. Calcul de l'accélération de la pesanteur et étude énergétique.

MANIPULATIONS : On utilise un fil à plomb pour vérifier la verticalité de l'ensemble. On met 1A dans la bobine pour faire tenir la bille. Un premier capteur est placé à quelques centimètres (pas trop près pour ne pas ressentir l'effet de l'aimant), et déclenche le comptage (compteur Jeulin), un second, placé à une distance précisément connue du premier, arrête le compteur. On mesure pour plusieurs hauteurs le temps de chute. De  $t_c = f(h)$  on peut déduire  $g$  et faire une étude énergétique.

## 2 Moment cinétique

- Théorème du moment cinétique et cas particulier des forces centrales.

### 2.1 Mouvement à force centrale

- Expériences avec un mobile lourd sans coussin d'air et un mobile bougeant lié par un ressort.
- Analyser la conservation du moment cinétique (malgré les variations de  $r$  et de  $v$  à mettre en évidence en appliquant une condition initiale adéquate).

MANIPULATIONS : Lester lourdement un des mobiles et ne pas activer son coussin d'air, de manière à le laisser fixe. Attacher un ressort entre les deux mobiles. Lancer le mobile sur coussin d'air, avec si possible une variation de  $r$ . Définir l'origine sur Cineris sur le mobile fixé, pour le calcul du moment cinétique.

### 2.2 Moment d'inertie du pendule pesant

- Étalonnage du potentiomètre et détermination de la période des oscillations.
- Portraits de phase et non-linéarités.

MANIPULATIONS : Brancher le pendule sur son boîtier, observer rapidement le signal à l'oscilloscope, vérifier que celui-ci est sinusoïdal. Si celui-ci est composé de créneaux brutaux, c'est que la masse est du mauvais côté. Régler le gain pour avoir la tension maximale dans la zone d'étude. Régler le zéro sur l'oscilloscope en mode Roll. Étalonner le pendule : noter pour chaque angle (de  $10^\circ$  en  $10^\circ$ ) la tension : on obtient un étalonnage assez précis malgré la grande incertitude sur  $\theta$ .

Mesurer la période des oscillations pour différentes longueurs (cran par cran) entre la masse et le centre. Mesurer précisément la masse (avec la vis) et la longueur au centre (pied à coulisse et datasheet).

## 3 Extension aux référentiels non-galiléens (facultatif)

- Calibrage de l'accéléromètre avec la rotation du plateau.
- Étude de la déviation due à l'accélération de Coriolis.

## Conclusion

- Résumé clair et précis des expériences.
- Large gamme d'applications. Limites quantique et relativiste.

OBJECTIF – Montrer le rôle déterminant que peuvent avoir les effets de surface dans la dynamique des systèmes.

## Bibliographie

- [1] P. G. De Gennes, F. Brochard-Wyart, and D. Quéré. *Gouttes, bulles, perles et ondes*. Belin, 2013.
- [2] R. Duffait. *Expériences de physique au CAPES de sciences physiques*. Bréal, 2011.
- [3] É. Guyon, J. P. Hulin, and L. Petit. *Hydrodynamique physique*. CNRS Éditions, 2012.
- [4] B. Le Neindre. Tensions superficielles et interfaciales. *Techniques de l'ingénieur*, 1993.
- [5] L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 1 : Mécanique*. Pierron, 1992.
- [6] M. N. Sanz and B. Salamito. *Tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2009.

## Introduction

- Le volume occupant l'essentiel de la place, les interfaces semblent jouer un faible rôle.
- Pourtant, leur rôle est primordial dans beaucoup de domaines : ondes/optique (conditions aux limites), mécanique (frottements), mécanique des fluides (tension de surface).

## 1 Interface solide-solide et frottements

### 1.1 Mise en évidence

- Plan inclinable avec support boy. Angle critique. Coefficients de frottements statiques et dynamiques en ordre de grandeur. Différences.

### 1.2 Mouvement frotté-collé (*stick-slip*)

- Étude du stick-slip avec dispositif ENSL. Acquisition VideoCom. Garder à l'esprit que si la mesure semble précise, elle n'est vraie que pour un état précis : forte dispersion des mesures. Applications.

MANIPULATIONS : Prendre l'enregistreur exprès et y disposer du papier. Scotcher le papier sur lui-même pour ajouter une barre d'aluminium pour le lester (pas d'acier car trop lourd). Tester rapidement le stick-slip (en général, ne marche pas pour toutes les vitesses), lester peut-être le mobile (pas trop non plus).

Fixer l'enregistreur VideoCom le plus de niveau possible, assez haut de manière à suivre le mouvement, pas trop pour détecter le mobile. Se référer à la notice pour la connection à l'ordinateur.

## 2 Tension de surface et phénomène de capillarité

### 2.1 Mise en évidence

- Mise en évidence avec un support métallique trempé dans de l'eau savonneuse. Interprétation énergétique.

### 2.2 Balance d'arrachement

- Présentation du principe et réalisation. Tension de surface de l'eau et de l'éthanol. Discuter l'hypothèse  $\theta = 0$ .

**MANIPULATIONS :** Étalonner le dynamomètre pour des petites masses (entre 1 et 10 g). Régler le niveau de l'anneau en jouant sur les fils. Suspendre l'anneau au dynamomètre au dessus d'une boîte de Pétri. Avant chaque mesure, nettoyer le dynamomètre à l'alcool et le rincer à l'eau (ou au fluide dont on veut mesurer la tension de surface), de manière à éliminer le plus possible toute trace d'éthanol.

Mesurer la force due au poids de l'anneau, puis la force à la limite d'arrachement (en utilisant un boy qui n'a pas d'à-coup) et en déduire la tension de surface. Mesurer le rayon intérieur de l'anneau au pied à coulisse.

## 2.3 Ascension capillaire et loi de Jurin

- Faire l'expérience avec un coin et l'objectif macro. Tension de surface de l'éthanol.

**MANIPULATIONS :** On prend en photo avec l'objectif macro l'hyerbole qui apparaît dans la cuve en coin. Pour plusieurs abscisses  $x$ , on note la hauteur  $h$ , on en déduit l'épaisseur  $e$  à l'abscisse  $x$  par des mesures au pied à coulisse. Il est également possible d'utiliser les tubes prévus mais le mouillage est très capricieux.

## 2.4 Ondes gravito-capillaires

- Manifestation dynamique de l'effet de surface. Relation de dispersion et tension de surface de l'eau.

**MANIPULATIONS :** Bien nettoyer la cuve à l'éthanol et la rincer à l'eau. Bien régler le niveau de la cuve. Remplir la cuve d'eau distillée. Utiliser le générateur prévu, la partie "fréquence" pour le stroboscope et "vibreux" pour le pot. Plonger la tige excitatrice préalablement nettoyée pour obtenir des ondes raisonnablement planes à l'écran. Mesurer le grandissement de la cuve avec un objet de taille connue.

Fixer la fréquence d'excitation du pot vibrant et la mesurer au fréquencemètre, ajuster le stroboscope de manière à fixer l'image à l'écran. Mesurer la longueur d'onde et vérifier la relation de dispersion.

## 3 Contact à trois phases et mouillage

- Loi de Young et utilisation de l'appareil photo avec objectif macro. Angles de contact.

## Conclusion

- Nombreuses applications. Ouverture sur les tensio-actifs.

# Dynamique des fluides

OBJECTIF – Comprendre l'intérêt du nombre de Reynolds pour prévoir les régimes d'écoulement et les forces exercées sur les solides.

## Bibliographie

- [1] M. Brizard and al. Un viscosimètre absolu pour la mesure de la viscosité des fluides. *Revue française de métrologie*, 2007.
- [2] É. Guyon, J. P. Hulin, and L. Petit. *Hydrodynamique physique*. CNRS Éditions, 2012.
- [3] L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 1 : Mécanique*. Pierron, 1992.

## Introduction

- Outils théoriques : équation de Navier-Stokes, d'Euler et de Bernoulli. Différentes conditions d'application et résolution analytique inexistante.
- Aspect expérimental prépondérant : vérification des hypothèses et établissement de lois phénoménologiques.

## 1 Différents régimes d'écoulement

### 1.1 Loi de Poiseuille

- Différence de pression due à une différence de hauteur. Résolution de Navier-Stokes avec une géométrie correcte. Débit en fonction de  $\Delta p$ . Viscosité dynamique de l'eau.

MANIPULATIONS : Remplir le vase de Mariotte d'eau, le fermer avec un bouchon 1-trou et placer un tube de verre de manière à contrôler la différence de pression. Repérer l'origine là où l'air ne bulle pas mais ne remonte pas le tuyau non plus. On mesure la hauteur d'eau par des marques sur le tuyau. Mesurer le débit moyen sur une minute environ.

### 1.2 Retour sur les hypothèses

- Tube infini : faux. Longueur d'établissement du régime. Calcul à partir de la formule théorique.
- Autres limites du modèle (nombre de Reynolds trop grand, pas de turbulence ici).

### 1.3 Transition laminaire-turbulent

- Expérience de l'ampoule à décanter. Importance du nombre de Reynolds.

## 2 Force exercée par un écoulement à bas Reynolds sur un solide

### 2.1 Dispositif expérimental

- Chute d'une bille dans le rotitherm. Tracé de la vitesse en fonction de  $r^2$ .
- Calcul de la viscosité dynamique et comparaison avec la mesure au viscosimètre de Ubbelohde. Constater une différence.

MANIPULATIONS : Remplir le tube de fluide et le fermer avec un bouchon troué au centre. Laisser le fluide au repos de manière à éliminer les bulles d'air. Graduer le tube.

Mesurer au palmer le diamètre des billes. Mesurer le temps de chute une fois le régime permanent établi (assez bas). Attendre que le fluide revienne au repos avant de renouveler l'expérience avec une bille différente.

## 2.2 Retour sur les hypothèses

- Nombre de Reynolds, régime permanent, effet du fond, position de la bille : hypothèses vérifiées.
- Effet des parois : terme correctif. Nouveau calcul de la viscosité. Consulter la référence (non disponible à l'oral a priori) de la Revue Française de Métrologie.

## 3 Force exercée par un écoulement à haut Reynolds sur un solide

### 3.1 Mesure de la vitesse

- Étalonage de l'anémomètre à fil chaud. Explication de possibles écarts.

MANIPULATIONS : Veiller à garder la grille car elle permet d'orienter correctement l'écoulement, en plus de protéger le dispositif. En l'absence de tout obstacle dans la soufflerie, on étalonne le fil chaud à l'aide du tube de Pitot.

### 3.2 Mesures de forces

- Dispositif de mesure de forces. Mesure de  $c_x$  pour différents profils. Explication qualitative des différences.
- Principe des similitudes pour un même objet avec plusieurs tailles différentes.

MANIPULATIONS : Le tube de Pitot est dans le sillage donc donne des valeurs faussées. On utilise donc l'anémomètre à fil chaud pour mesurer la vitesse moyenne. Étalonner (si il y a assez de temps) le dispositif de mesure de force avec un dynamomètre (on peut aussi faire confiance à l'étalonnage déjà fait). Pour différentes vitesses, mesurer la force de traînée pour en déduire le coefficient de traînée par régression linéaire. Comparer pour différents objets (taille ou forme différente).

## Conclusion

- Importance du nombre de Reynolds pour classer la dynamique, obtenir les expressions des forces.
- Outil fréquemment utilisés en recherche comme dans l'industrie.

## Capteurs de grandeurs mécaniques

OBJECTIF – Étudier quelques capteurs de grandeurs mécaniques d'usage courant et leurs caractéristiques.

### Bibliographie

- [1] G. Asch. *Les capteurs en instrumentation industrielle*. Dunod, 2010.
- [2] R. Duffait. *Expériences d'électronique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 2010.
- [3] S. Durand. Mesures d'accélération. *Techniques de l'ingénieur*, 2008.
- [4] J. L. Le Goër and J. Avril. Capteurs à jauges extensométriques. *Techniques de l'ingénieur*, 1992.
- [5] P. Leblois. Mesures tachymétriques. *Techniques de l'ingénieur*, 2006.
- [6] Y. Parmantier and F. Kratz. Capteurs - définition, principe de détection. *Techniques de l'ingénieur*, 2009.
- [7] J. Pérez, É. Bellanger, X. Ducros, V. Renvoizé, and P. Roux. *Physique MPSI-PCSI-PTSI*. Cap prépa – Pearson, 2013.
- [8] Y. Rocard. *Dynamique générale des vibrations*. Masson, 1960.
- [9] B. Velay. Modélisation d'un accéléromètre mems. *BUP*, 920, 2010.

### Introduction

- Capteurs, définition. Chaîne de mesure. Types de capteurs.
- Caractéristiques métrologiques et définitions.

## 1 Jauge de déformation

- Principe de la mesure. Phénomène physique utilisé. Variation de résistance.
- Conditionnement du capteur. Pont de Wheatstone, amplificateur.
- Étalonnage avec masse croissante. Domaine de linéarité. Explications des non-linéarités. Sensibilité et fiabilité. Temps de réponse. Inconvénient : forte dépendance en température.
- Autres capteurs de déformation.

MANIPULATIONS : On utilise la jauge de contrainte fixée sur la lame de scie. Attention à prendre le bon boîtier de conditionnement du capteur (numéros qui correspondent). Étalonner la jauge de contrainte avec des masses croissantes, repérer la limite de linéarité (autour de 150 g), ne pas dépasser 200 g. Peser précisément les masses avec un balance de précision. On peut faire une mesure de fiabilité en utilisant un petit pot vibrant et voir l'effet du conditionnement (passe-bas).

## 2 Accéléromètres

### 2.1 Principe et caractéristiques

- Principe de l'accéléromètre. Conditionnement (explication rapide).
- Étalonnage statique avec écran inclinable. Linéarité des capteurs et sensibilité. Avantages et inconvénients. Utilisation pratique.
- Autres capteurs d'accélération.

MANIPULATIONS : On fixe l'accéléromètre sur un petit écran d'optique que l'on fixe avec un statif. Y coller un fil à plomb et un rapporteur de manière à mesurer l'angle (être précautionneux pour ne pas avoir d'erreur systématique). Pour chaque valeur d'angle de  $10^\circ$  en  $10^\circ$ , noter l'affichage de l'accéléromètre. Faire la moyenne des angles opposés. Retourner l'accéléromètre et faire la même mesure. On peut également profiter de ce dispositif pour étalonner la composante verticale de l'accéléromètre (autre sortie). Une mesure de précision ou de temps de réponse est assez difficile à faire ici.

## 2.2 Application à la détermination d'un module de Young

- Principe de la mesure. Hypothèse (une seule harmonique). Conclusion.
- Incertitude précise avec propagation.

MANIPULATIONS : Coller l'accéléromètre au bout d'une barre d'acier et bien l'encastrier avec des planches en bois et serre-joints. Pour différentes mesures de flèche, mesurer la fréquence du fondamental. En déduire le module d'Young.

## 3 Mesures tachymétriques : génératrice à courant continu

### 3.1 Principe et caractéristique du capteur

- Principe de la génératrice et phénomène physique. Absence de conditionnement (capteur actif).
- Étalonnage avec hacheur optique du capteur. Linéarité. Sensibilité. Parler aussi de la fidélité.
- Domaine de non-détérioration et de non-destruction. Autres types de capteur.

MANIPULATIONS : Démontez le plastique de protection de la roue tournante à gauche du banc MCC. Coller un bout de papier replié ou un bout de carton. Placer un capteur optique (ceux utilisés pour la chute libre) de manière à couper le rayon lumineux avec le bout de papier. Mettre en route le moteur : on obtient un créneau. Étalonner ainsi le boîtier mesure de vitesse angulaire du banc MCC (qui est également une machine à courant continu). Les incertitudes sur la vitesse de rotation et sur la tension mesurée sont assez faibles : on peut évaluer la fidélité.

### 3.2 Application à l'étude d'un moteur à courant continu

- Tracer la caractéristique  $\Gamma = f(\omega)$  ou  $\mathcal{P} = f(\omega)$  ou encore  $\eta = f(\omega)$ .

## Conclusion

- Résumé précis et complet des caractéristiques des capteurs.
- Ouverture sur les capteurs capacitifs et inductifs.
- Rapidement, principe du détecteur de niveau d'eau.

## Mesures de température

OBJECTIF – Comprendre comment est définie expérimentalement la température, comment la mesure-t-on et le rôle des étalons.

### Bibliographie

- [1] G. Asch. *Les capteurs en instrumentation industrielle*. Dunod, 2010.
- [2] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Thermodynamique*. Dunod, 1989.
- [3] M. Cantagrel. Thermistances à ctn. *Techniques de l'ingénieur*, 2006.
- [4] J. M. Donnini and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 2 : Thermodynamique et applications*. Pierron, 1997.
- [5] F Durand. Etude d'une lampe à incandescence. *BUP*, 827, 2000.
- [6] L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 1 : Mécanique*. Pierron, 1992.
- [7] M. Sadli. L'échelle internationale de température eit-90. *Techniques de l'ingénieur*, 2006.

### Introduction

- Origine sensorielle de la température.
- Difficulté à mesurer la température. Définition de l'EIT 90.
- Thermomètre primaires (dont le but est de déterminer la position des points fixes) et secondaires (pratiques, étalonnés avec les points fixes). Domaines de températures.

## 1 Étude de deux thermomètres primaires

### 1.1 Le thermomètre à gaz

- Principe du thermomètre à gaz.
- Diagramme d'Amagat de l'air. Rapport des ordonnées à l'origine pour deux températures différentes.
- Mesure de la température d'ébullition de l'eau : le principe est d'illustrer la progression : définition de la température puis détermination de la position de points fixes avec thermomètre primaire.
- Utilisations pratiques.

MANIPULATIONS : Fixer le bain-marie à une bassine remplie d'eau. Prendre une seringue avec assez de graduations, avec des petits tuyaux flexibles et des adaptateurs, connecter cette seringue à un manomètre Jeulin, mesurer la pression en fonction de la tension au Fluke (l'affichage du manomètre est assez imprécis, voir notice). Pour différentes valeurs de volume, on mesure la pression (attendre la thermalisation à chaque changement de pression) : tracer le diagramme d'Amagat et obtenir les ordonnées à l'origine pour deux valeurs de température différentes. La température est mesurée par une sonde Pt100 reliée au multimètre de précision Fluke 8846A pour cette étape.

Prendre un petit ballon avec un bouchon un trou et le relier au manomètre. À partir de la température de fusion (première mesure de pression) qu sert ici d'étalon absolu pour l'illustration, obtenir la température d'ébullition de l'eau (seconde mesure de pression).

### 1.2 Le tube de Kundt

- Autre type de thermomètre utilisé. Constitution et principe.
- On vérifie  $c_s^2 = f(T)$ .

MANIPULATIONS : Préférer les thermostats les plus récents (type expérience SF<sub>6</sub>). On peut régler la température de consigne, le débit de la pompe (2 ou 3 typiquement), l'actionnement du réfrigérateur et d'autres paramètres dans le menu. Faire les mesures en augmentant la température, le refroidissement prenant plus de temps. Bien attendre la thermalisation à chaque fois (autour de 10 minutes). Mettre la tige du micro le plus loin pendant le chauffage pour la thermaliser également.

Fixer le GBF à une fréquence voisine de 2 kHz. Chercher alors la fréquence de résonance (mode XY, méthode de Lissajous). La recherche de la résonance permet d'avoir des zéros donc de repérer plus précisément les nœuds.

Repérer le maximum le plus proche du haut-parleur, faire un trait sur la tige au feutre, passer deux ou trois minimas, faire un second trait. Mesurer la longueur. Effacer les traits à l'éthanol, remettre la tige dans le tube. Préférer mesurer la température dans le tube, plutôt que celle affichée par le chauffage.

Répéter tous les 5 à 10 °C. Attention, mettre le micro le plus au milieu du tube. Regarder l'accord entre référence et mesure avec le tube de Kundt, la linéarité, la précision.

## 2 Thermomètres secondaires

- On continue la progression : l'utilisation de thermomètres secondaires étalonnés avec des points de référence, eux-mêmes déterminés avec des thermomètres primaires.

### 2.1 Thermomètre à résistance de platine

- Domaine pratique.  $R = f(T)$  théorique.
- On câble la sonde Pt100 avec trois points fixes : fusion de l'eau, ébullition de l'eau et fusion de l'étain. Mesure de la résistance avec montage 4 fils. On repère la fusion de l'étain par le plateau lors du refroidissement de l'étain liquide.

### 2.2 Thermomètres secondaires pratiques

- EIT 90 peut être coûteuse.
- Thermocouple à deux soudures (une dans la glace) et CTN.
- Linéarité (bain thermostaté, mesure de T avec Pt100), sensibilité, temps de réponse.
- Tableau récapitulatif. Intérêts comparés.

### 2.3 Pyromètre optique (facultatif)

- Couleur du fil de fer chauffé avec manip de recalescence.
- Manipulation avec petite ampoule.

## Conclusion

- Bien résumer la démarche expérimentale pour mesurer la température.
- Ouverture sur le pyromètre si non traité, sur quelques exemples pratiques si traité.

# Transitions de phase

OBJECTIF – Comprendre les différentes caractéristiques expérimentales des transitions de phase.

## Bibliographie

- [1] J. Cavoret, C. Mulet-Marquis, and S. Rochefeuille. Quelques aspects expérimentaux des transitions de phase. *BUP*, 956, 2013.
- [2] A. Deguin, J. P. Gauthier, G. Mesnard, and P. Michel. Appareil d'enseignement pour l'étude des propriétés des fluides aux voisinage du point critique. *BUP*, 589, 1976.
- [3] B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, and B. Roulet. *Thermodynamique*. Hermann, 2007.
- [4] J. M. Donnini and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 2 : Thermodynamique et applications*. Pierron, 1997.
- [5] P. Papon and J. Leblond. *Thermodynamique des états de la matière*. Hermann, 1990.
- [6] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

## Introduction

- Transition de phase : phénomène courant.
- Expérience de la bouteille au congélateur : discontinuité de  $\rho$ .
- Classification des transitions de phase.

## 1 Transitions du premier ordre

### 1.1 Transition solide-solide

- Entre deux états différents, peut aussi être entre variétés allotropiques.
- Recalescence du fer : variation et discontinuité du volume massique.

MANIPULATIONS : On chauffe le fil de fer au rouge en le faisant traverser par une intensité assez forte. On coupe brutalement l'alimentation : on voit une remontée qui s'arrête quelques instants avant de continuer : on observe le changement de la phase  $\gamma$  (cfc) à  $\alpha$  (cc).

### 1.2 Transition liquide-vapeur : chaleur latente

- Mesure de la chaleur latente de vaporisation avec résistances chauffante. Discussion des incertitudes et des hypothèses.

MANIPULATIONS : On utilise le dispositif avec trois résistances chauffantes de  $2 \Omega$  à  $6 \Omega$ . Faire une marque de manière à toujours immerger les résistances dans le même volume d'azote liquide. Après avoir câblé les résistances avec deux multimètres ( $UII$ ), remplir le Dewar d'azote liquide et y immerger les résistances. Un fois que tout est calme, tarer la balance et immédiatement après, lancer le chronomètre et l'alimentation. L'ordonnée à l'origine est dûe à un coefficient de perte supposé constant. Répéter pour plusieurs alimentations et tracer  $\Delta m = f(UI)$  à durée de chauffe constante (autour de 60s).

### 1.3 Diagramme de Clapeyron

- Mesure de la quantité de matière. Tracé de quelques isothermes.
- Pression de saturation, formule de clapeyron et chaleur latente à différentes températures.
- Bien discuter des incertitudes et ouverture sur le point critique.

**MANIPULATIONS :** Commencer par repérer la température (qualitativement) à laquelle la transition se fait. Se placer à basse pression et calculer ainsi la quantité de matière après avoir mesuré  $p$  et  $V$ .

On fixe le thermostat à des températures croissantes pour tracer plusieurs isothermes. On laisse à chaque compression l'équilibre s'établir pendant quelques minutes. L'équilibre est très long à s'établir lorsque l'on a le changement d'état. Entre deux changements de température, attendre au moins un quart d'heure. Montrer au moins une isotherme au dessus du point critique.

## 2 Transitions du second ordre

### 2.1 Opalescence critique

- Observation de l'opalescence critique du  $\text{SF}_6$ . Explications.

**MANIPULATIONS :** Éclairer avec QI et AC le boîtier à  $\text{SF}_6$ . Projeter l'interface sur un écran. Chauffer le boîtier jusqu'à  $48^\circ\text{C}$  (avec le dispositif bain thermostaté). Arrêter le chauffage et placer un bûcher de glace.

### 2.2 Supraconductivité

- Utilisation du morceau de  $\text{YBaCuO}_4$  pour mesurer  $R(T)$ . Prendre quelques points. Ordres de grandeur de la température de transition.
- Effet Meissner. Explications.

**MANIPULATIONS :** On utilise le module avec thermocouple et le montage en 4-fils. On câble comme indiqué sur la notice avec le bon thermocouple. On trempe le module dans l'azote liquide et on observe la chute brutale de la résistivité. On repère la tension où se produit le saut de résistance pour en déduire la température de transition. Il est possible d'utiliser la sortie à l'arrière du multimètre pour faire une acquisition simultanée de la température et de la résistance sur LatisPro.

On peut montrer l'effet Meissner : on fait léviter un aimant au dessus du supraconducteur trempé dans l'azote.

### 2.3 Transition ferro-para

- Observation de la transition avec le dispositif classique clou+thermocouple. Ordre de grandeur de la température de Curie.

**MANIPULATIONS :** On accroche un aimant derrière la plaque réfractaire et on fixe le clou de l'autre côté. On chauffe le clou de façon homogène (éviter de trop chauffer la plaque, elle se brise au-dessus de  $1000^\circ\text{C}$  environ). On observe la chute du clou et on repère l'ordre de grandeur de la température à cet instant.

## Conclusion

- Récapitulatif de ce qui a été dit.
- États métastables : expérience de surfusion de l'étain.
- Ouverture sur l'importance des transitions de phase en thermométrie (points fixes).

**MANIPULATIONS :** Placer dans un creuset un peu d'étain pur et placer le thermocouple dans l'étain. Faire l'acquisition de la température au thermocouple. Faire fondre l'étain et observer la surfusion avant le palier de solidification. Mesurer également la température de fusion.

MP 7

## **Instruments d'optique**

Vous êtes dans une impasse : veuillez faire demi-tour.



## Interférences lumineuses

OBJECTIF – Montrer expérimentalement les interférences lumineuses, les conditions de leur obtention et la notion de cohérence.

### Bibliographie

- [1] R. Duffait. *Expériences d'optique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 1997.  
 [2] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PC-PC\**. Cap prépa – Pearson, 2010.  
 [3] Sextant. *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.

### Introduction

- Interférences : résultat de la superposition avec  $I_{12} \neq I_1 + I_2$ .
- Deux lampes de poches  $\neq$  éclairage d'une bifente.

## 1 Influence de l'extension spatiale : fentes d'Young

- Éclairage en lumière blanche des fentes d'Young. Observation de franges.

MANIPULATIONS : On éclaire avec une lampe QI une fente sur laquelle on fait converger la lumière. On place directement la bifente ensuite et on observe les franges sur un écran placé assez loin.

### 1.1 Interfrange en fonction de la longueur d'onde

- On utilise un filtre interférentiel et on mesure l'interfrange pour plusieurs longueurs d'onde avec Caliens. Remonter à l'écart entre les deux fentes.

MANIPULATIONS : Faire l'expérience sur un banc optique. On détermine l'interfrange en mesurant avec Caliens une dizaine de franges pour différents filtres interférentiels. Utiliser une densité si le capteur CCD est saturé. Pour les petites longueurs d'onde, l'intensité est faible, régler la sensibilité.

### 1.2 Cohérence spatiale

- Observation de l'influence de l'écart entre les fentes et de la largeur de la fente source. Inversion de contraste.

MANIPULATIONS : On étudie la cohérence spatiale en augmentant la largeur de la fente source : perte puis inversion de contraste ; et la cohérence temporelle avec les filtres interférentiels ou une lampe spectrale.

## 2 Interférences par division d'amplitude

### 2.1 Localisation des franges

- Montrer la localisation des franges dans les deux configurations. Utiliser un diaphragme. Lentille de projection et contraste.

MANIPULATIONS : Régler l'interféromètre de Michelson (réglage du parallélisme séparatrice compensatrice au laser, réglage grossier de l'angle entre les miroirs au laser, rapprochement du contact optique avec un laser et un objectif de microscope, obtention des anneaux d'égal inclinaison avec la lampe à vapeur de sodium). Voir [3].

Détailler les conditions d'éclairage et d'observation dans le cas de l'éclairage par une source étendue. Montrer la localisation. Passer en coin d'air (rejoindre le contact optique en diminuant le nombre d'anneaux, ajouter un petit angle, changer les conditions d'éclairage (éclairage parallèle) et d'observation (lentille de plus courte focale)) : observer les franges de coin d'air. Détailler là encore les conditions d'éclairage et d'observation, et la localisation des franges.

## 2.2 Interférences en lumière blanche

- Cohérence temporelle de la source.
- Application à la mesure de l'épaisseur d'une lame de microscope.

MANIPULATIONS : Éclairer le Michelson avec la lumière blanche sans oublier le filtre AC. Si les franges ne sont pas visibles, utiliser un filtre interférentiel vert pour les obtenir en cherchant le meilleur contraste.

## 2.3 Spectroscopie par transformée de Fourier

- Faire fonctionner le moteur avec le doublet du sodium (ou faire la mesure en repérant dix anticoïncidences à la main).

MANIPULATIONS : Utiliser le réglage en lame d'air par une lampe à vapeur de sodium.

## 3 Cohérence de polarisation (facultatif)

- Montrer les différents résultats de l'expérience de Fresnel-Arago.

## Conclusion

- Intérêt des interférences, condition d'observation.
- Ouverture sur la spectroscopie.

## Diffraction des ondes lumineuses

OBJECTIF – Voir le phénomène de diffraction, les cas limites de Fresnel et de Fraunhofer et leurs applications.

### Bibliographie

- [1] R. Duffait. *Expériences d'optique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 1997.
- [2] E. Hecht. *Optique*. Pearson, 2002.
- [3] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PC-PC\**. Cap prépa – Pearson, 2010.
- [4] Sextant. *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.
- [5] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

### Introduction

- Introduction historique : première preuve du caractère ondulatoire de la lumière.
- Expérience de la fente fermée et du laser.

## 1 Diffraction de Fresnel par un trou circulaire

- Mesure de la focale par méthode de Bessel.
- On observe plusieurs zones de Fresnel. On repère le nombre de zones en fonction de la position de la lentille.
- On montre également la diffraction de bord d'écran.

MANIPULATIONS : Élargir un laser (vert de préférence) avec un élargisseur de faisceau. Vérifier que l'éclairement est assez homogène (propreté de l'objectif). Placer le tout sur un banc optique. Sur la course du faisceau, placer un trou (le plus circulaire possible, prendre ceux percés exprès). Avec une lentille d'assez courte focale (10 cm typiquement), sonder plusieurs plans de Fresnel. Compter le nombre de cercles sombres lorsque le centre est un point noir et relever la position de la lentille correspondante. En mesurant la focale de la lentille par la méthode de Bessel, on remonte à la positions des plans de Fresnel.

## 2 De Fresnel à Fraunhofer

- On change de trou et on passe à des trous de plus en plus petits. On observe la disparition de la diffraction de Fresnel et l'apparition de cercles concentriques autour de la tache de diffraction. Jouer également sur la petite lentille.

MANIPULATIONS : Changer de trous et prendre un trou de plus en plus petit et observer la transition entre les cas de Fresnel et de Fraunhofer.

## 3 Diffraction de Fraunhofer

### 3.1 Propriétés de la diffraction de Fraunhofer

- Translation de la source et de l'objet diffractant. Rotation de l'objet diffractant.
- Élargissement de l'objet diffractant. Théorème de Babinet.

### 3.2 Mesure du diamètre d'un cheveu

- Interfrange pour différents fils calibrés. Mesure du diamètre d'un cheveu.

MANIPULATIONS : L'expérience est réalisée sur un banc optique. On utilise un simple laser. On place un fil calibré sur la course du faisceau. On observe la figure de diffraction. On mesure l'interfrange pour différents fils. On se sert de cette courbe de calibration pour mesurer le diamètre d'un cheveu.

## 4 Applications de la diffraction de Fraunhofer

### 4.1 Filtrage spatial

- Expérience d'Abbe et striescopie. Filtrage passe-haut et passe-bas.
- Applications : détramage d'une photo, microscopie à contraste de phase.

MANIPULATIONS : On fait l'image d'une grille par une lentille sur l'écran (grille éclairée par un laser élargi). On place une fente au point de convergence du laser. On la ferme et on constate la disparition des lignes horizontales si la fente est verticale et inversement. Observer également le cas de la fente en diagonale. On peut également faire l'expérience en lumière blanche.

Pour la striescopie, reprendre le même montage et remplacer la grille par une tête d'épingle. Au point de convergence, placer un cercle cachant le centre de la tache : on ne voit plus que le contour de l'objet.

### 4.2 Critère de Rayleigh

- Présentation de l'expérience avec Caliens.

MANIPULATIONS : On reprend le même dispositif : on éclaire la bifente avec la lampe QI convergeant sur la bifente. Par autocollimation, avec une lentille de courte focale ( $f \approx 20$  cm), on fait l'image de la bifente à l'infini. On place une deuxième lentille ( $f \approx 50$  cm) de manière à obtenir de nouveau l'image de la bifente sur l'écran. On place la fente entre les deux lentilles et on repère sur Caliens le moment où les deux fentes ne sont plus discernables. On mesure à cet instant la taille de la fente au pied à coulisse.

## Conclusion

- Résumer proprement ce qui a été dit et fait.
- Ouverture sur le réseau : manipuler un peu en fonction du temps restant.

# Spectrométrie optique

OBJECTIF – Comprendre comment résoudre plus finement le spectre des ondes lumineuses visibles.

## Bibliographie

- [1] R. Duffait. *Expériences d'optique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 1997.
- [2] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PC-PC\**. Cap prépa – Pearson, 2010.
- [3] Sextant. *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.

## Introduction

- Spectroscopie : séparer le spectre en ses longueurs d'ondes.
- Systèmes dispersifs : exemple avec le PVD.

## 1 Spectrométrie à réseau

### 1.1 Principe et étalonnage

- Principe du montage. Lumière blanche, puis étalonnage avec le mercure. Interpolation linéaire.

MANIPULATIONS : Faire converger la source (lampe spectrale ou quartz-iode) sur une fente source, dont on fait l'image sur un écran. Placer le réseau juste après la lentille (il faut une lentille de grande focale dans ce cas pour avoir un éclairage quasi-parallèle).

### 1.2 Pouvoir de résolution

- Mesure de la longueur d'onde moyenne du doublet jaune du sodium. Limite de résolution.

### 1.3 Monochromateur à réseau

- Présentation du fonctionnement. Vérification de l'étalonnage au mercure. Mesure de la constante de Rydberg.

MANIPULATIONS : Utiliser le spectromètre OceanOptics HR2000+ si possible. Le principe du spectromètre est d'envoyer la lumière à analyser sur un réseau par réflexion et de récupérer l'amplitude de chaque longueur d'onde à l'aide d'une barette CCD. Deux longueurs d'ondes sont résolues si elles sont détectées par des pixels différents.

Étalonner le spectromètre avec la lampe à vapeur de mercure en connaissant la longueur d'onde des différentes raies et un filtre interférentiel adéquat pour sélectionner chacune d'entre elles.

Utiliser la lampe à hydrogène pour mesurer la constante de Rydberg en mesurant les quatre premiers pics en longueur d'onde.

## 2 Spectrométrie interférentielle

### 2.1 Spectrométrie par transformée de Fourier

- Résolution du doublet jaune du sodium (si possible avec le moteur).
- Résultat de la transformée de Fourier en fonction du temps d'acquisition. Avantage.

MANIPULATIONS : Régler l'interféromètre de Michelson en lame d'air avec une lampe à vapeur de sodium. Vérifier d'abord que l'on observe bien une alternance de coïncidences et d'anticoïncidences. Raccorder le moteur et acquérir pour observer les battements. Faire la transformée de Fourier numérique du signal ainsi acquis.

## 2.2 Utilisation de la spectrométrie pour le calcul de l'épaisseur d'une lame de verre

- Analyse du blanc d'ordre supérieur avec un bon spectromètre. Epaisseur de la lame. Conclusion.

MANIPULATIONS : Obtenir les franges de coin d'air en lumière blanche. Placer une lame de verre sur la course d'un des bras du Michelson. En recherchant de nouveau les franges, on constate qu'elles n'ont pas les mêmes teintes qu'avant : c'est une conséquence du caractère dispersif du verre. Revenir au contact optique et faire l'analyse du blanc d'ordre supérieur, en numérotant quelques longueurs d'onde dans un intervalle de longueur d'onde assez réduit pour que l'indice optique ne varie que très peu.

## 3 Cavité confocale Fabry-Pérot

- Modes du laser hélium/néon. Bien expliquer tout ce que l'on voit. Discuter de la résolution.

MANIPULATIONS : Brancher l'amplificateur Melles-Griot à l'oscilloscope et à la cavité confocale en suivant les schémas de la notice. L'alignement du laser est assez délicat : pour ce faire, régler la cavité confocale de niveau avec un niveau à bulle, et le laser en alignant un écran. Régler ensuite la hauteur du laser avec un bon calibre (gros calibre temporel, GHz) et guetter l'apparition des pics. On peut observer la puissance en activant le mode persistant, le décalage des pics est de moins en moins rapide au fur et à mesure du chauffage. Interpréter le signal obtenu en s'aidant de la notice.

## Conclusion

- Caractérisation de la source. Résumé précis des manipulations effectuées.
- Composition des étoiles en astronomie.

# Émission et absorption de la lumière

OBJECTIF – Illustrer les phénomènes d'absorption et d'émission de la lumière dans leur richesse.

## Bibliographie

- [1] P. Atkins and J. De Paula. *Chimie physique*. De Boeck, 2008.
- [2] R. Duffait. *Expériences d'optique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 1997.
- [3] F. Durand. Etude d'une lampe à incandescence. *BUP*, 827, 2000.
- [4] J. Mesplède and J. Randon. *100 manipulations de chimie générale et analytique*. Bréal, 2011.
- [5] Sextant. *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.

## Introduction

- Différents processus. Complexité de l'interaction lumière-matière.

## 1 Absorption de la lumière

### 1.1 Spectre d'absorption du permanganate

- Spectre de la lampe QI avec un réseau ou un PVD puis solution de permanganate devant : disparition du vert dans le spectre.
- Spectroscope Ulice. Couleurs absorbées et complémentaires. Absorbance.

### 1.2 Loi de Beer-Lambert

- Vérification de la loi de Beer-Lambert. Coefficient d'extinction molaire.

MANIPULATIONS : On utilise le mode Absorbance du spectromètre Ulice pour la longueur d'onde d'absorption maximale.

## 2 Rayonnement du corps noir

- Étude du rayonnement émis par une petite ampoule. Éventuellement pyromètre.

MANIPULATIONS : Mesurer d'abord la résistance du fil de tungstène à l'ohmmètre. Pour différentes valeurs de tensions délivrées par un module Hameg, mesurer la tension à ses bornes et l'intensité dans le circuit. Interpréter les mesures en s'aidant de [3].

## 3 Émission de la lumière

### 3.1 Spectre de raies

- Spectre de raies de Hg. Étalonnage du spectromètre. Mesure de la constante de Rydberg.

MANIPULATIONS : Étalonner le spectromètre avec la lampe à vapeur de mercure en connaissant la longueur d'onde des différentes raies et un filtre interférentiel adéquat pour sélectionner chacune d'entre elles.

Utiliser la lampe à hydrogène pour mesurer la constante de Rydberg en mesurant les quatre premiers pics en longueur d'onde.

### 3.2 Fluorescence de la rhodamine

- Spectre d'absorption de la rhodamine (sans Beer-Lambert).
- Spectre d'émission perpendiculairement. Fluorescence pour différentes concentrations. Explications.

MANIPULATIONS : Dissoudre une très petite quantité de rhodamine en poudre dans l'éthanol : la solution doit être colorée mais assez pâle. Remplir une cuve à face parallèle avec cette solution. On peut également utiliser des solutions déjà préparées. Réaliser le blanc avec une cuve d'éthanol et réaliser le spectre d'absorption de la solution.

Éclairer une longue cuve de rhodamine avec un laser (Nd-YAG). Observer la diminution progressive de l'intensité lumineuse et la fluorescence sur le côté de la cuve. Réaliser le spectre dans la direction normale au laser.

On peut également observer le déplacement du pic de fluorescence en fonction de la concentration pour des concentrations allant de  $10^{-3}$  à  $10^{-7}$  mol.L<sup>-1</sup> par exemple.

### Conclusion

- Résumé précis des manipulations effectuées.
- Ouverture sur l'émission stimulée avec modes du laser He-Ne de démonstration.

# Photorécepteurs

OBJECTIF – Montrer expérimentalement les propriétés des photorécepteurs : caractéristiques, linéarité, réponse spectrale et temps de réponse.

## Bibliographie

- [1] G. Asch. *Les capteurs en instrumentation industrielle*. Dunod, 2010.
- [2] R. Duffait. *Expériences d'optique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 1997.
- [3] Sextant. *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.

## Introduction

- Définition d'un photorécepteur. Types de photorécepteurs : photoniques et thermiques.
- Caractéristiques des photorécepteurs.

## 1 Caractéristiques, linéarité et sensibilité

### 1.1 Photodiode

- Description de la photodiode et tracé de sa caractéristique. Variation de  $I_d$  quand on augmente l'intensité de la lampe QI.
- Éclairage par une diode laser et vérification de la linéarité avec la loi de Malus. Sensibilité avec puissance-mètre Thorlabs.

MANIPULATIONS : Câbler un GBF à masse flottante en série avec une résistance de quelques  $k\Omega$  variable et la photodiode. On trace en XY la caractéristique de la photodiode. Avec le condensateur de la QI, sans oublier le filtre anticalorique, focaliser la lumière sur la photodiode (configuration QI pleine gueule). Constaté le mouvement de la caractéristique.

Polariser la photodiode pour avoir le niveau du plateau ( $E = -2.5$  V environ). On mesure alors l'intensité en fonction de l'angle entre le polariseur et l'analyseur.

On mesure la sensibilité en faisant le rapport de l'intensité circulant dans la photodiode et de la puissance mesurée au puissance-mètre. On peut également calculer le rendement quantique :

$$\eta = \frac{\text{nombre de paires créées}}{\text{nombre de photons incidents}} = \frac{I/e}{\phi \frac{\lambda}{hc}}$$

### 1.2 Photorésistance

- Mesure de la résistance dans l'obscurité et avec QI pleine gueule. La résistance va de  $1 k\Omega$  à  $1 M\Omega$ .
- Tracé de la caractéristique.
- Mesure de la résistance. Vérification de la linéarité avec diode laser. Limite de linéarité. Sensibilité dans le domaine linéaire.

MANIPULATIONS : On réalise le même montage que pour la photodiode à différents flux. On mesure ensuite la résistance à l'ohmmètre standard en fonction de l'angle entre polariseur et analyseur. On constate le domaine de linéarité. Sensibilité dans le domaine linéaire.

## 2 Réponse spectrale de la photodiode

- En étant très propre, mesurer l'intensité  $I_d$  circulant dans la photodiode pour différents filtres interférentiels et comparer à la thermopile.

- Réponse spectrale de la photodiode.
- Mentionner la réponse spectrale de la photorésistance.

MANIPULATIONS : Pour différents filtres interférentiels , on mesure la tension aux bornes de la thermopile (prendre la plus petite des deux) au nanovoltmètre et l'intensité circulant dans la photodiode. Le flux dépend du filtre interférentiel et de la longueur d'onde (la QI n'a pas une spectre plat), la thermopile donne accès au véritable flux. Il est également possible (plus facile) d'utiliser le puissance-mètre Thorlabs en lieu et place de la thermopile. On trace le rapport des deux mesures en fonction de la longueur d'onde.

## 3 Temps de réponse

### 3.1 Photodiode

- Si on trouve une DEL dont on peut facilement moduler la luminosité. Limite de la mesure : temps de réponse de la DEL.

MANIPULATIONS : On utilise une DEL modulée par un créneau.

### 3.2 Photorésistance

- On fait la même mesure si possible. On utilise un hacheur optique sinon. Mesure du temps de recombinaison de la photorésistance.

## Conclusion

- Résumé des propriétés des capteurs utilisés (caractéristiques, linéarité, sensibilité, réponse spectrale, temps de réponse, coût, encombrement).
- Utilisation pratique de chacun.
- Barrettes CCD.

## Biréfringence, pouvoir rotatoire

OBJECTIF – Montrer expérimentalement les propriétés des matériaux anisotropes, et l'influence de la façon dont on les taille.

### Bibliographie

- [1] R. Duffait. *Expériences d'optique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 1997.  
 [2] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.  
 [3] Sextant. *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.

## 1 Biréfringence

### 1.1 Mise en évidence de la biréfringence

- Expérience avec le bon rhomboèdre de spath. Rotation du rhomboèdre. Éclairage en lumière polarisée, analyse en sortie du rhomboèdre. Bien tout expliquer. Origine du terme biréfringence.

MANIPULATIONS : On place un diaphragme derrière une lampe QI et un filtre AC, dont on fait l'image sur un écran. On interpose un rhomboèdre de spath sur la course du faisceau : on observe deux taches. On ajoute un analyseur avant puis après le polariseur.

### 1.2 Détermination de la biréfringence du quartz

- Utilisation du spectre cannelé en sortie de la lame épaisse du quartz taillée parallèlement à l'axe optique.
- Réseau puis Ulice. Calcul du  $\Delta n$  et incertitudes.

MANIPULATIONS : Avec une lampe QI, un filtre AC, une fente et une lentille de focale moyenne, on éclaire une lame de quartz taillée parallèlement à l'axe optique. On fait l'image de la fente avec une seconde lentille de courte focale. Placer un réseau entre la lentille et l'écran : observer alors les cannelures du spectre. Observer l'influence de l'angle entre le polariseur et l'analyseur sur le contraste entre longueurs d'onde lumineuses et sombres.

Repérer les lignes neutres, c'est-à-dire les directions (orthogonales) pour lesquelles l'état de polarisation est inchangé par le passage dans la lame.

Avec une lame plus épaisse, faire le spectre du blanc d'ordre supérieur sur SpidHR.

### 1.3 Détermination de l'épaisseur d'une lame mince

- Étalonnage puis utilisation du compensateur de Babinet. Calcul des incertitudes et discussion des observations et des résultats.

MANIPULATIONS : On reprend le même montage avec P et A à  $45^\circ$  des lignes neutres, croisés. On observe maintenant des teintes et l'absence de cannelures.

Étalonner le compensateur de Babinet : le placer à  $45^\circ$  de P et A (luminosité maximale). On fait l'image du réticule du Babinet sur l'écran. On place un filtre interférentiel et on translate le vernier de façon à déplacer de quelques franges.

On repasse en lumière blanche, on remet la frange sombre au centre. On replace la lame mince et on constate un déplacement du système de franges : on en déduit le déphasage et donc l'épaisseur de la lame.

### 1.4 Biréfringence provoquée

- Touillette à café ou bout de scotch éclairé en lumière parallèle entre polariseur et analyseur.

## 2 Polarisation rotatoire

### 2.1 Pouvoir rotatoire du saccharose

- Vérification de la loi de Biot (en lumière monochromatique). Utiliser une photodiode pour quantifier précisément l'extinction.

MANIPULATIONS : Avec la lampe QI, un filtre AC, une diaphragme et une lentille, éclairer en lumière parallèle une solution de glucose. La placer entre P et A. Faire l'image du diaphragme sur l'écran.

Croiser P et A, puis ajouter la solution : il n'y a plus extinction. Avec un filtre interférentiel, rétablir l'extinction et noter l'angle correspondant. On peut repérer l'extinction en utilisant une photodiode polarisée en inverse, ce qui rend plus précis le repérage de l'extinction (mais l'essentiel de l'incertitude est due à la mesure). Vérifier la loi de Biot pour différentes concentrations (importantes car sinon l'effet est trop faible).

### 2.2 Dispersion rotatoire du quartz

- Obtention de teintes en lumière blanche quand on tourne A.
- Angle d'extinction en fonction de la longueur d'onde.

MANIPULATIONS : Avec une lampe QI, filtre AC, diaphragme et lentille de courte focale, créer un faisceau parallèle. Entre P et A croisés, placer une lame de quartz taillée perpendiculairement à l'axe optique. Faire l'image du diaphragme sur un écran avec une seconde lentille.

En lumière blanche, on observe des teintes, changeant lorsque l'on fait tourner l'analyseur. Placer un filtre interférentiel. À chaque couleur, repérer l'angle qui permet l'extinction.

### 2.3 Polarisation rotatoire provoquée

- Électroaimant étalonné avec pièces polaires plates percées et barreau de flint.
- Laser vert. Rotation du plan en fonction du champ magnétique.

MANIPULATIONS : Étalonner l'électroaimant (voir [MP15](#)). En l'absence de courant, placer le polariseur et l'analyseur croisés sur la course du laser. Placer le barreau de flint. Appliquer un champ et mesurer l'angle de rotation du plan de polarisation pour différentes valeurs du champ  $\vec{B}$ .

## Conclusion

- Résumé précis des manipulations.
- Importance en géologie, en chimie, dans l'industrie. Expérience de la cellule à cristaux liquides.

# Polarisation des ondes électromagnétiques

OBJECTIF – Distinguer les différents types de polarisation, et les produire.

## Bibliographie

- [1] R. Duffait. *Expériences d'optique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 1997.
- [2] S. Houard. *Optique*. De Boeck, 2011.
- [3] M. N. Sanz and B. Salamito. *Tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2009.
- [4] Sextant. *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.

## Introduction

- Lampe QI avec polariseur et analyseur : on obtient une extinction. Avec seulement P ou A, non : limite du modèle scalaire de la lumière et définition de la polarisation.

## 1 Polarisation rectiligne

### 1.1 Dichroïsme et loi de Malus

- Définition de la polarisation rectiligne. Polariseur à grille. Vérification semi-quantitative de la loi de Malus avec les ondes centimétriques.
- Vérification plus rigoureuse avec une photodiode.

**MANIPULATIONS :** Monter le banc hyperfréquence (voir notice) et alimenter la diode à effet Gunn. On utilise un cornet en sortie et on place le récepteur à ondes centimétriques. On place une première grille, et une seconde inclinée. On lit l'angle à l'aide d'un rapporteur imprimé. Pour différentes valeurs d'angles, on mesure la tension aux bornes du récepteur à ondes centimétriques.

On éclaire en lumière convergente un diaphragme, dont on fait l'image sur un écran. On place un premier polariseur puis un analyseur, et on constate en tournant ce dernier une variation de l'intensité lumineuse sur l'écran. On peut illustrer avec un film de cellophane que l'on détend fortement le principe du polariseur.

Pour faire des mesures quantitatives, on utilise une diode laser (son intensité est plus stable dans le temps qu'un laser (temps de chauffage) ou qu'une lampe QI). On polarise la photodiode en inverse et on mesure le courant  $I_d$  y circulant par la mesure de la tension aux bornes de la résistance placée en série avec la photodiode. De  $5^\circ$  en  $5^\circ$  on obtient  $I_d$ . On fait la moyenne des mesures pour  $\theta$  et  $-\theta$ ,  $\theta = 0$  correspondant au minimum de luminosité, pour s'affranchir des effets d'offset.

Cela offre un premier moyen d'analyse de la lumière.

### 1.2 Polarisation par réflexion vitreuse

- Manipulation avec laser, lame de verre et goniomètre. Calcul de l'angle de Brewster. Comparaison et incertitude.

**MANIPULATIONS :** Faire le zéro. Pour ce faire, utiliser un laser et quelques densités et éclairer une lame de verre fixée sur le goniomètre. Obtenir le fait que le laser revienne en entrée par réflexion sur la lame de verre. Noter la valeur de l'angle correspondante.

Tourner ensuite le goniomètre de façon à observer un minimum de luminosité. Placer alors un polariseur sur la course du faisceau et constater l'extinction. Noter la valeur de l'angle.

### 1.3 Polarisation par transmission vitreuse

- Avec le même dispositif, placer une puis plusieurs lames en sortie. Mesurer le  $\eta$  en fonction du nombre de lames. Applications.

MANIPULATIONS : À l'angle de Brewster, le coefficient de réflexion en intensité est faible. On superpose plusieurs lames pour améliorer le rendement du polariseur.

On utilise un faisceau incident polarisé et stable (utiliser un laser polarisé déjà chaud). On envoie le faisceau sur une pile de lames en incidence de Brewster. À l'aide d'un polariseur et d'une photodiode, mesurer  $I_{\parallel}$  et  $I_{\perp}$  correspondant aux maxima et minima d'intensité, en fonction du nombre de lames.

$$\eta = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}$$

On attend :

$$\eta_N = \frac{1 - (1 - R_{\perp})^{2N}}{1 + (1 - R_{\perp})^{2N}} \quad \text{où} \quad R_{\perp} = \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right)^2$$

D'où :

$$\ln \left( \frac{1 - \eta_N}{1 + \eta_N} \right) = 2N \ln(1 + R_{\perp})$$

## 1.4 Polarisation par diffusion Rayleigh

- Expérience avec le lait. Bien expliquer ce que l'on observe.
- Si possible, ciel bleu.

MANIPULATIONS : On met un tout petit peu de lait dans une cuve remplie d'eau, et on envoie une lumière parallèle la lumière de la QI. On observe après la cuve une lumière orangée. On vérifie qu'il n'y a pas de variation en ajoutant un polariseur en sortie et en le tournant.

On observe sur le côté de la cuve une lumière bleutée. En plaçant un polariseur et en le tournant, on observe une atténuation importante de la luminosité.

On place un polariseur après le diaphragme : si la polarisation est parallèle au plan de diffusion, l'intensité diffusée est nulle, et inversement si elle est perpendiculaire.

## 2 Polarisation elliptique

### 2.1 Biréfringence et lame mince

- Rappel de la biréfringence. Rhomboèdre. Lames quart et demi-onde.
- Production de polarisation circulaire et elliptique.

### 2.2 Analyse d'une vibration elliptique

- Schéma du Duffait pour distinguer polarisations elliptique et circulaire.

## 3 Bilan : analyse d'une lumière polarisée

- Lumière non-polarisée : QI.
- Rectiligne totale : QI+polariseur.
- Elliptique totale : QI+polariseur+quart d'onde. Circulaire totale : idem avec angles différents.
- Elliptique partielle : par réflexion métallique.
- Rectiligne partielle : diffusion par le lait.
- Dans chaque cas, caractériser complètement l'état de polarisation (voir Duffait).

## Conclusion

- Récapitulatif avec schéma du Duffait.
- Applications : lunettes 3D, chiralité des solutions.

## Production et mesure de champs magnétiques

OBJECTIF – Comprendre les différentes manières de produire des champs magnétiques, les ordres de grandeur associés et le fonctionnement des appareils de mesures.

### Bibliographie

- [1] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Électromagnétisme IV : Milieux diélectriques et milieux aimantés*. Dunod, 1984.
- [2] P. Brenders, L. Douchet, and M. Sauzeix. *Électrotechnique et conversion de puissance PSI*. Les nouveaux précis Bréal, 2004.
- [3] J. M. Donnini and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 4 : Électricité et applications*. Pierron, 2004.
- [4] R. Duffait. *Expériences de physique au CAPES de sciences physiques*. Bréal, 2011.
- [5] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

### Introduction

- Bref historique, définition du champ magnétique.
- Ordres de grandeur.

## 1 Production de champ magnétique

### 1.1 Aimants permanents

- Aimant sur plaque à aiguille : lignes de champ. Direction : caractère vectoriel de  $\vec{B}$ .
- Ordre de grandeur de B pour un aimant droit, un aimant en U au teslamètre. Avantages et inconvénients.

MANIPULATIONS : On observe les lignes de champ sur le rétroprojecteur en posant l'aimant sur la plaque avec les petites boussoles. On mesure le champ magnétique créé par l'aimant en U au teslamètre, on compare la valeur obtenue avec l'aimant droit.

### 1.2 Bobine plate

- Dispositif bobines couplées mais avec une bobine loin. On déplace la sonde à effet Hall. On vérifie la formule du champ sur l'axe de la bobine.
- Avantages et inconvénients.

MANIPULATIONS : On place la sonde à effet hall sur l'axe de la bobine et on se sert des graduations de cette dernière pour obtenir l'évolution du champ magnétique en fonction de la distance au centre de la bobine.

### 1.3 Électroaimant

- Principe d'un électroaimant fait maison. Champ magnétique en fonction de  $e$ .
- Étalonnage du gros électroaimant.

MANIPULATIONS : Monter le fluxmètre (voir ci-dessous). Vérifier que le champ est presque nul à l'intérieur de l'électroaimant éteint. Sinon le désaimanter grossièrement en faisant un suite de cycles de plus en plus petits.

Pour alimenter l'électroaimant, utiliser l'alimentation 20V/9A branchée en série avec un ampèremètre et l'électroaimant. On utilise les pièces plates pour s'assurer de l'homogénéité du champ.

Avec potence, noix et pinces, placer la sonde à effet Hall dans l'entrefer, bien au milieu et verticale. Mettre à zéro le teslamètre hors de l'électroaimant. Pour différentes intensités, mesurer le champ magnétique avec la sonde dans un sens, puis retournée. Faire

la moyenne des deux mesures (on s'affranchit des effets dues aux soudures) : on obtient la courbe d'étalonnage, qui laisse apparaître une saturation pour des intensités supérieures à 5A environ.

Souligner le caractère vectoriel du champ magnétique.

Pour obtenir la dépendance en l'écartement, mesurer dans un électroaimant fait maison (ou l'électroaimant normal, mais on perd le bénéfice de l'étalonnage) le champ magnétique à la sonde à effet Hall (dans les deux sens là encore). Mesurer l'écartement au pied à coulisse.

## 2 Mesure de champ magnétique

### 2.1 Fluxmètre

- Mesure avec fluxmètre et intégrateur de qualité sur l'oscilloscope en mode Roll. Moyennage spatial.

MANIPULATIONS : Monter le fluxmètre. Pour cela, brancher la bobine exploratrice en entrée de l'intégrateur alimenté par boîtier séparé. Éviter d'utiliser un intégrateur fait soi-même (problème de dérive). Brancher la sortie en direct sur l'oscilloscope en mode Roll. Placer le fluxmètre dans l'électroaimant et vérifier que la tension croît : la différence de tension est reliée directement au champ magnétique par intégration de la loi de Faraday.

### 2.2 Sonde à effet Hall

- Principe avec la plaque de Germanium dopé. Densité de porteurs de charge. Réétalonnage de l'électroaimant.

### 2.3 Cycle d'hystérésis

- Cycle d'hystérésis d'un tore avec intégrateur tout fait. Avantages du fluxmètre.
- Bilan sonde à effet Hall/fluxmètre : avantages et inconvénients.

MANIPULATIONS : On utilise un amplificateur commandé par un GBF qui alimente en série un rhéostat et le primaire du tore. Au secondaire, on place directement un intégrateur. On mesure avec une sonde différentielle la tension aux bornes du rhéostat et la tension en sortie de l'intégrateur.

Pour le tore d'acier dur, il faut se placer à très basse fréquence (1 mHz) pour obtenir un courbe convenable. Faire l'acquisition sur LatisPro en préparation. Le tore de ferrite nickel donne de beaux cycles d'hystérésis à 100 mHz.

On obtient l'excitation magnétique à partir de la tension au primaire :

$$H = -n_1 v_X r_0 l$$

Et le champ magnétique à partir de l'intégration de la tension au secondaire :

$$B = \frac{RC}{n_2 S} v_Y$$

On en déduit des valeurs quantitatives (champ rémanent, champ de saturation, champ coercitif, aire du cycle d'hystérésis).

## 3 Champs tournants

- Illustration en faisant tourner un petit aimant.
- Production avec l'onduleur triphasé.

## Conclusion

- Avantages, inconvénients et applications de tout ce qui a été présenté.

# Milieux magnétiques

OBJECTIF – Illustrer les différents types de milieu magnétique et leurs propriétés.

## Bibliographie

- [1] M. Bertin, J. P. Faroux, and J. Renault. *Électromagnétisme IV : Milieux diélectriques et milieux aimantés*. Dunod, 1984.
- [2] P. Brenders, L. Douchet, and M. Sauzeix. *Électrotechnique et conversion de puissance PSI*. Les nouveaux précis Bréal, 2004.
- [3] J. M. Donnini and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 4 : Électricité et applications*. Pierron, 2004.
- [4] R. Duffait. *Expériences de physique au CAPES de sciences physiques*. Bréal, 2011.
- [5] C. Garing. *Milieux magnétiques*. Ellipses, 1995.
- [6] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

## Introduction

- Bref historique. Différents types de milieux. Ordres de grandeur.

## 1 Milieux dia- et paramagnétiques

### 1.1 Mise en évidence

- Barreaux de Bi, d'Al dans l'entrefer de l'électroaimant.
- Entrefer permanent :  $N_2$  et  $O_2$  : explication des observations.

MANIPULATIONS : Prendre l'électroaimant supportant 9A et placer des pièces tronconiques pour avoir un champ plus intense et des gradients de champ. L'aluminium est paramagnétique : placer le barreau dans l'entrefer de l'électroaimant sans alimentation, perpendiculairement au futur champ, aux bords des pièces tronconiques (là où les gradients sont forts). Appliquer un champ : le barreau tourne.

Le bismuth est diamagnétique : il fuit les zones de fort champ. Disposer donc le barreau parallèlement au futur champ, de la même manière sinon que l'aluminium. Appliquer un champ et observer la rotation du barreau.

En utilisant le dispositif conçu pour, avec ou sans champ magnétique, l'azote liquide s'écoule. Entre les pièces polaires de l'aimant, il se forme un pont de dioxygène liquide. Pour obtenir de l'oxygène liquide, il suffit de placer un tube à essais dans l'azote liquide et d'attendre car  $T_{v,N_2} < T_{v,O_2}$ .

### 1.2 Mesure de la susceptibilité de $FeCl_3$

- Étalonner l'électroaimant. Bien nettoyer le tube en U. Mesure de la susceptibilité. Loi de Wiedmann : susceptibilité de  $FeCl_3$  uniquement.
- Fortes incertitudes à bien discuter.

MANIPULATIONS : Étalonner l'électroaimant (voir [MP15](#)) en utilisant ici les pièces tronconiques. Rapprocher autant que possible les deux pièces.

Nettoyer les tubes avant si il ne sont pas propres. Utiliser la solution de chlorure ferrique la plus concentrée possible. Placer le gros tube dans l'entrefer de l'électroaimant et le petit en dehors. La surface libre du gros tube doit être légèrement en bas des pièces polaires tronconiques en l'absence de champ. Au franchissement de chaque graduation, mesurer l'intensité et en déduire le champ magnétique grâce à la courbe d'étalonnage.

Il existe parfois une hystérésis de mouillage avec retournement du ménisque : réaliser dans ce cas des moyennes en champ montant et descendant.

Il n'est pas nécessaire de se limiter au domaine de linéarité de l'électroaimant car celui-ci a été étalonné.

## 2 Milieux ferromagnétiques

### 2.1 Mise en évidence

- Barreau de fer dans l'électroaimant avec aimant permanent.

### 2.2 Cycle d'hystérésis

- Pour différents tores, tracer le cycle d'hystérésis. Faire des mesures quantitatives (champ rémanent, à saturation, coercitif).

**MANIPULATIONS :** On utilise un amplificateur commandé par un GBF qui alimente en série un rhéostat et le primaire du tore. Au secondaire, on place directement un intégrateur. On mesure avec une sonde différentielle la tension aux bornes du rhéostat et la tension en sortie de l'intégrateur.

Pour le tore d'acier dur, il faut se placer à très basse fréquence (1 mHz) pour obtenir un courbe convenable. Faire l'acquisition sur LatisPro en préparation. Le tore de ferrite nickel donne de beaux cycles d'hystérésis à 100 mHz.

On obtient l'excitation magnétique à partir de la tension au primaire :

$$H = -n_1 v_X r_0 l$$

Et le champ magnétique à partir de l'intégration de la tension au secondaire :

$$B = \frac{RC}{n_2 S} v_Y$$

On en déduit des valeurs quantitatives (champ rémanent, champ de saturation, champ coercitif, aire du cycle d'hystérésis).

### 2.3 Première aimantation et désaimantation

- Montrer la courbe de première aimantation et la désaimantation. Interpréter en terme de domaine de Weiss.

**MANIPULATIONS :** On peut montrer le principe de la désaimantation en utilisant l'alimentation de commande en DC (utiliser un module Hameg, car les changements intempestifs de calibre du GBF parasitent la courbe).

### 2.4 Domaine de Weiss

- Manipulation avec microscope et flexcam (grenat ferrimagnétique avec sourire). Aimant en U.

**MANIPULATIONS :** On utilise le microscope polarisé (p 16.21) préparé pour l'observation des domaines de Weiss. On éclaire le miroir avec une lampe QI et on le tourne de manière à maximiser la luminosité. On utilise un oculaire 6×. Utiliser la plaque avec un sourire et mettre au point pour avoir une image nette des domaines de Weiss. En passant à proximité un aimant permanent, ils disparaissent.

### 2.5 Transition ferro-para

- Dispositif classique avec clou et thermocouple. Ordre de grandeur de la température de Curie.

**MANIPULATIONS :** Voir [MP06](#).

## Conclusion

- Bien tout récapituler.
- Ouvrir sur les nombreuses applications : transformateurs, moteurs.

# Métaux

OBJECTIF – Montrer expérimentalement des propriétés caractéristiques des métaux et les relations entre elles.

## Bibliographie

- [1] J. Cavoret, C. Mulet-Marquis, and S. Rochefeuille. Quelques aspects expérimentaux des transitions de phase. *BUP*, 956, 2013.
- [2] J. M. Donnini and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 2 : Thermodynamique et applications*. Pierron, 1997.
- [3] J. M. Donnini and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 4 : Électricité et applications*. Pierron, 2004.
- [4] C. Garing. *Milieux magnétiques*. Ellipses, 1995.
- [5] J. F. Le Maréchal and R. Barbe. *La chimie expérimentale : tome 2. Chimie organique et minérale*. Dunod, 2007.
- [6] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

## Introduction

- Utilisation historique des métaux pour leurs propriétés mécaniques (outils) puis thermiques (casserolles). Beaucoup pour leur propriétés électriques maintenant.
- Définition d'un métal.

## 1 Propriétés thermiques des métaux

### 1.1 Coefficient de diffusion thermique du cuivre

- Manipulation avec barre de cuivre et module Peltier. Mesure de l'épaisseur de peau pour deux ou trois fréquences. Calcul de  $D_{Cu}$  puis  $\lambda_{Cu}$ .

MANIPULATIONS : On alimente les deux ventilateurs avec 12 V en parallèle. On alimente les capteurs avec une tension +15 V. On alimente le module Peltier avec un amplificateur de puissance Kepco piloté par un GBF Agilent : entrée sur Input, sortie entre Common et Output. Contrôler à un Hz que l'on ne débite pas une intensité trop importante. Abaisser la fréquence autour de 4 à 10 mHz (pour avoir un signal sur le dernier capteur, mais pas de réflexion en bout).

Acquérir la température pendant quelques périodes : on obtient une série de sinusoïdes d'amplitudes et de moyennes décroissantes, déphasées les unes par rapport aux autres. Obtenir par un fit sinusoïdal la valeur (relative) du déphasage. Représenter cette valeur en fonction de la position du capteur : on obtient l'épaisseur de peau.

### 1.2 Comparaison avec d'autres métaux

- Expériences du conductoscope. Ordres de grandeur du rapport  $\frac{\lambda_{Cu}}{\lambda_{Al}}$ . Les différentes couleurs sont dues au changement de phase d'un mélange de cristaux liquides, indiquant donc la température.

## 2 Propriétés électriques des métaux

### 2.1 Mesure de la conductivité du cuivre en fonction de la température

- Expérience de la bobine thermostatée. Calcul de la conductivité à 25°C et comparaison avec la valeur tabulée. Évolution linéaire de la résistivité en fonction de la température.

**MANIPULATIONS :** Chauffer un grand volume d'eau. Placer un agitateur magnétique dans un grand béccher et y verser l'eau. Placer la bobine adaptée dans l'eau et mesurer sa résistance en montage quatre fils. Placer au centre de la bobine un thermocouple. Mesurer pour différentes températures la résistance de la bobine et en déduire sa résistivité.

Faire la mesure à 25°C et comparer à la valeur tabulée.

## 2.2 Comparaison avec d'autres métaux

- Expérience de la chute d'un aimant dans un tube. Conductivité comparée (ne pas oublier l'épaisseur et le diamètre du tube).
- Rapport des conductivités électriques.

**MANIPULATIONS :** Avec une pince, suspendre par le haut un tube de cuivre, placer deux fluxmètre en dessous de cette pince (pour ne pas freiner l'aimant avec cette dernière), assez loin des extrémités (pour que la finitude du tuyau ne se fasse pas sentir). Contrôler la verticalité du tube.

Brancher les deux fluxmètres sur l'oscilloscope et observer en mode Roll les deux signaux : on observe le décalage des deux pics.

## 3 Loi de Wiedemann-Franz et densité de porteurs de charges

### 3.1 Loi de Wiedemann-Franz

- Observation de la constance du rapport  $\lambda/(\sigma T)$  en fonction du métal.
- Calcul de la constante de Lorenz avec les mesures faites sur le cuivre en supposant  $\lambda$  indépendant de la température. Comparaison avec la valeur issue du modèle de Sommerfeld.

### 3.2 Effet Hall

- Utiliser les nouvelles plaquettes PHYWE dans la collection. Valeur du nombre de porteurs de charge par unité de volume. Lien avec les propriétés électriques et thermiques.

**MANIPULATIONS :** Mettre les pièces plates pour assurer un champ homogène sur toute la plaque de cuivre. Étalonner l'électroaimant (voir [MP15](#)).

Disposer la plaque de cuivre (plaque PHYWE p64.32). Utiliser les deux sorties pour l'intensité (si l'alimentation est protégée contre les court-circuit, utiliser un rhéostat en série). Faire traverser la plaque par un courant de 10A (mesurer avec un multimètre). Mesurer la tension de Hall entre les deux bornes prévue avec un multimètre de précision pour différentes valeurs du champ magnétique et en déduire la constante de Hall.

## 4 Propriétés mécaniques des métaux

- Célérité du son dans le Dural par étude du temps de vol dans l'eau et dans l'eau avec le bloc de Dural. Module d'Young du Dural (comparaison avec valeur tabulée, à défaut celle de l'aluminium).

**MANIPULATIONS :** Entre deux transducteurs immergés dans l'eau, on fait se propager un signal ultrasonore. Commencer par relier l'eau à la masse, pour éviter la propagation de signaux électromagnétiques d'un transducteur à l'autre.

Les deux transducteurs sont espacés d'une distance  $d$ , le bloc de Dural étant mis de côté. On mesure le temps de vol des ondes acoustiques en utilisant un Burst de 400 kHz, écartés de 1 ms, pour différentes valeur de  $d$  : on en déduit la vitesse de propagation dans l'eau.

Pour la mesure dans le Dural, on fait la mesure du temps de vol pour un certain  $d$ , on intercale le bloc de Dural, le temps de vol diminue. En déduire la célérité du son dans le dural (mesure de l'épaisseur au pied à coulisse).

## 5 Structure cristalline (facultatif)

- Expérience de recalescence du fer avec flexcam.

**MANIPULATIONS :** On chauffe le fil de fer au rouge en le faisant traverser par une intensité assez forte. On coupe brutalement l'alimentation : on voit une remontée qui s'arrête quelque instants avant de continuer : on observe le changement de la phase  $\gamma$  (cfc) à  $\alpha$  (cc).

## Conclusion

- Résumé précis des manipulations effectuées.
- Différences de propriétés chimiques entre les métaux.

NOTES : Montage présentée pendant l'année et bien accueilli.



# Matériaux semi-conducteurs

OBJECTIF – Illustrer les principales caractéristiques des semi-conducteurs, l'influence du dopage et les applications.

## Bibliographie

- [1] D. Aubert and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 3 : Électronique*. Pierron, 1992.
- [2] J. M. Donnini and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 4 : Électricité et applications*. Pierron, 2004.
- [3] R. Duffait. *Expériences d'électronique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 2010.
- [4] H. Mathieu and H. Fanet. *Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques*. Dunod, 2009.
- [5] C. Ngô and H. Ngô. *Physique des semi-conducteurs*. Dunod, 2012.
- [6] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

## Introduction

- Définition d'un semi-conducteur en termes de théorie des bandes. Semi-conducteur intrinsèque et extrinsèque.

## 1 Influence de la température pour un semi-conducteur intrinsèque

- On mesure la résistance d'une thermistance CTN en fonction de la température, mesurée avec un thermocouple, en mesure 4-fils.
- Valeur du gap. Comparaison avec les ordres de grandeur usuels. Incertitude.

MANIPULATIONS : Mesurer la résistance (en utilisant le dispositif bloc de cuivre, thermistance et polystyrène) en deux fils. On chauffe la CTN avec une alimentation 2A/10V : utiliser les câbles de chauffage.

## 2 Étude d'un semi-conducteur extrinsèque : le germanium

### 2.1 Mesure de la conductivité

- Plaquette de germanium dopé. Mesure de la conductivité en quatre fils. Ordres de grandeur et incertitudes.

MANIPULATIONS : On utilise la plaquette de germanium conçue pour l'expérience. On alimente avec 15 mA (chauffage) et on mesure la résistance en 4-fils. Suivre la notice de la plaquette.

### 2.2 Densité de porteurs de charges et mobilité

- Calcul de la tension de Hall en fonction du champ magnétique, après étalonnage de l'électroaimant.
- Densité volumique de porteurs de charges. Mobilité des porteurs de charges.

MANIPULATIONS : Mettre les pièces plates pour assurer un champ homogène sur toute la plaque de germanium dopé. Étalonner l'électroaimant (voir [MP15](#)).

On fait circuler une petite intensité (50 mA) dans la plaquette entre les bornes prévues. Contrôler ce courant à l'ampèremètre. Mesurer la tension de Hall au multimètre entre les deux bornes prévues pour différentes intensités parcourant le bobinage de l'électroaimant, donc de champ magnétique. En déduire la constante de Hall.

Prendre garde à la verticalité de la plaque, et à sa position dans l'entrefer. Faire de même en retournant la plaque.

## 2.3 Influence de la température sur la tension de Hall

- $U_H = f(T)$  à champ magnétique fixé. Comportement intrinsèque et extrinsèque du germanium.

MANIPULATIONS : Chauffer la plaquette de germanium avec l'entrée prévue, la température mesurée au thermocouple augmente régulièrement. À champ magnétique constant, tracer l'évolution de la tension de Hall en fonction de la température.

# 3 Applications des semi-conducteurs

## 3.1 Photorésistance

- Caractéristiques de la photorésistance. Ordre de grandeur rapide de  $R$  pour différents éclairagements.
- Temps de recombinaison avec éclairage par hacheur.

MANIPULATIONS : On mesure le temps de réponse de la photodiode en utilisant un hacheur optique et une diode laser pour en déduire le temps de recombinaison.

## 3.2 Diode laser

- Seuil d'émission. Mesure de la longueur d'onde. Observation du speckle.
- Énergie de gap (a priori GaAs).

MANIPULATIONS : Mesurer la caractéristique courant-puissance lumineuse de la diode laser. Observer le seuil d'émission sur la courbe et également par l'apparition de speckle. En déduire l'énergie de gap.

## Conclusion

- Résumé des manipulations et des propriétés des semi-conducteurs.
- Jonctions et composants électroniques.

NOTES : Montage un peu baclé.

## Effets capacitifs

OBJECTIF – Étudier et quantifier les effets capacitifs, en voir les applications.

### Bibliographie

- [1] J. M. Donnini and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 4 : Électricité et applications*. Pierron, 2004.
- [2] R. Duffait. *Expériences d'électronique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 2010.
- [3] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PC-PC\**. Cap prépa – Pearson, 2010.
- [4] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

### Introduction

- Bref historique. Définition.
- Distinction condensateur / effet capacitif.

## 1 Dipôle capacitif : le condensateur d'Aepinus

- Modèle canonique d'un dipôle capacitif.

MANIPULATIONS : Fixer les fils au plan de travail et les éloigner le plus possible du condensateur d'Aepinus, afin de minimiser les capacités parasites, et leur fluctuation.

### 1.1 Influence de la distance inter-armatures

- Vérification de la loi. Permittivité relative de l'air.
- Quantifier les capacités parasites et détailler le calcul d'incertitudes.

MANIPULATIONS : Mesurer à l'aide d'un RLC-mètre réglé en capacimètre basses fréquences la capacité du condensateur d'Aepinus pour différentes valeurs d'écartement des plaques, mesurées au pied à coulisse.

### 1.2 Influence du diélectrique

- Rajouter une lame de verre. Ordre de grandeur de  $\epsilon_{r,\text{verre}}$ . Incertitudes.

MANIPULATIONS : Placer une plaque de verre entre les armatures et mesurer la capacité. On peut, si on dispose de plusieurs plaques, les serrer dans le condensateur pour faire une seconde droite  $C = f(1/e)$  et obtenir le  $\epsilon_r$  du verre.

## 2 Mesure de capacités

### 2.1 Multivibrateur stable

- Faire le montage et étalonner le multivibrateur avec des capacités mesurées au RLC-mètre.

## 2.2 Application au câble coaxial

- Modèle à constantes réparties : capacité linéique.
- Vitesse de propagation et importance pour comparaison.

**MANIPULATIONS :** Avec le GBF, générer un Burst à haute fréquence (autour du MHz) et l'envoyer sur le câble coaxial avec une impédance infinie (ou presque) au bout. Observer à l'oscilloscope le retour d'une onde. Calculer le retard.

Avec le même Burst, placer un potentiomètre de  $100\ \Omega$ . Essayer d'atténuer le plus possible le signal réfléchi. Mesurer la résistance correspondante : c'est l'impédance caractéristique du câble.

## 3 Application à des effets capacitifs

### 3.1 Électronique

- Filtre passe-bas RC. Fréquence de coupure et diagramme de Bode. Caractère intégrateur avec un créneau.
- Application à un détecteur d'enveloppe sur une sinusoïde puis un signal AM.

### 3.2 Capteurs capacitifs

- RLC mètre à la terre d'un côté et avec une grande plaque d'aluminium de l'autre. S'approcher et constater une variation de la capacité.
- Application : détecteur de niveau d'eau : principe, conditionnement et incertitudes.

**MANIPULATIONS :** Placer l'éprouvette assez loin du montage. Scotcher les fils reliant cette éprouvette au montage. Câbler le montage de la notice sans le comparateur et mesurer la tension de sortie au multimètre. Vérifier la linéarité du capteur et calculer sa sensibilité.

On peut terminer par illustrer en ajoutant un comparateur et une diode qui s'allume si on dépasse une tension de référence.

## Conclusion

- Résumé précis des manipulations.
- Importance des capacités en électronique, mais pas que.

# Induction, auto-induction

OBJECTIF – Illustrer expérimentalement les lois de l'induction, et leurs conséquences.

## Bibliographie

- [1] P. Brenders, L. Douchet, and M. Sauzeix. *Électrotechnique et conversion de puissance PSI*. Les nouveaux précis Bréal, 2004.
- [2] J. M. Donnini and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 4 : Électricité et applications*. Pierron, 2004.
- [3] R. Duffait. *Expériences d'électronique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 2010.
- [4] C. Garing. *Milieux magnétiques*. Ellipses, 1995.
- [5] V. Renvoizé, É. Bellanger, R. Girardi, S. Paulin, B. Portelli, and E. Saudrais. *Physique PC-PC\**. Cap prépa – Pearson, 2010.

## Introduction

- Définition de l'induction. Cas de Lorentz et Neumann. Loi de Lenz.

## 1 Lois de l'induction

### 1.1 Loi de Lenz

- Justifier le - dans la loi de Lenz avec l'approche d'un aimant permanent dans une bobine dont on connaît le sens d'enroulement.
- Facteurs de dépendance dans la loi de Faraday : vitesse, champ magnétique.

### 1.2 Loi de Faraday

- Électroaimant avec pièces plates. Comparaison de la mesure au Flucke en sortie de l'intégrateur avec l'indication de la sonde à effet Hall.
- Vérifier la linéarité et commenter les écarts (moyennage spatial).

MANIPULATIONS : Monter le fluxmètre. Pour cela, brancher la bobine exploratrice en entrée de l'intégrateur alimenté par boîtier séparé. Éviter d'utiliser un intégrateur fait soi-même (problème de dérive). Brancher la sortie en direct sur l'oscilloscope en mode Roll. Placer le fluxmètre dans l'électroaimant et vérifier que la tension croît : la différence de tension est reliée directement au champ magnétique. Comparer le résultat issu de la sonde à effet Hall avec le résultat par intégration et vérifier la loi de Faraday.

## 2 Coefficients d'inductance propre et mutuelle

### 2.1 Mesure d'une inductance par pont de Maxwell (facultatif)

- Manipulation du pont de Maxwell (équilibre par  $R$  et  $C$  variables mesurés au RLC-mètre).

### 2.2 Résonance en intensité d'un RLC série

- Diagramme de Bode. Mesure de  $r$  et  $C$  au RLC-mètre. On peut utiliser la méthode de Lissajous.

## 2.3 Inductance mutuelle

- Étude des oscillations couplées de deux bobines. Décalage en fréquence puis inductance mutuelle.

**MANIPULATIONS :** On étudie les deux circuits séparément en éloignant au maximum les bobines de Helmholtz. On ajuste les capacités pour avoir deux fréquences de résonance très proches. On contrôle toujours l'intensité circulant dans le circuit. Pour exciter les deux circuits, on utilise un ampli HSA4011 commandé par un GBF. On utilise des rhéostats de  $3\Omega$  pour ne pas atténuer trop vite les battements.

On rapproche ensuite les deux bobines et on détermine les fréquences de résonance du circuit. Pour différents  $d$ , on mesure le coefficient d'induction mutuelle entre les deux bobines. On peut enfin exciter le circuit avec un self de 44 mH alimenté à la fréquence de résonance. On voit les modes symétriques, antisymétriques et les désaccords de phases entre les tensions aux bornes des rhéostats.

## 3 Applications

### 3.1 Freinage par courant de Foucault

- Chute d'un aimant dans un tube. Rapport des conductivités de l'aluminium et du cuivre.
- Application : freinage des trains/camions, chauffage par induction.

**MANIPULATIONS :** Avec une pince, suspendre par le haut un tube de cuivre, placer deux fluxmètre en dessous de cette pince (pour ne pas freiner l'aimant avec cette dernière), assez loin des extrémités (pour que la finitude du tuyau ne se fasse pas sentir). Contrôler la verticalité du tube.

Brancher les deux fluxmètres sur l'oscilloscopes et observer en mode Roll les deux signaux : on observe le décalage des deux pics.

### 3.2 Transformateurs

- Étude d'un modèle fait maison. Rapport de transformation. Rester assez simple (ne pas faire l'étude énergétique).

**MANIPULATIONS :** Constituer un transformateur. Pour cela, mettre dans un circuit magnétique fermé deux bobines dont le nombre de spire est différent. Prendre des bobines qui supportent une intensité suffisante. Préférer construire un transformateur abaisseur de courant (plus grand nombre de spires au secondaire).

Allumer l'alternostat. Il crée de fortes surintensités au démarrage pouvant faire disjoncter. Pour éviter cela, on ne branche rien à ses bornes, on tourne la molette à 10 %, on allume et on rebranche le boîtier prise une fois que l'on a ramené la tension à 0.

Pour différentes valeurs de tension dans le primaire, mesurer à vide la tension au secondaire. Brancher ensuite directement l'ampèremètre aux bornes. Établir la relation entre l'intensité au secondaire et l'intensité au primaire.

### 3.3 Conversion électromécanique (facultatif)

- Présentation de l'expérience des rails de Laplace avec réversibilité.

**MANIPULATIONS :** Prendre une alimentation peu sensible aux courts-circuits (ou utiliser éventuellement un rhéostat). S'assurer en polissant les rails de Laplace du bon contact (on peut également les humidifier un peu) entre les rails et le barreau. Placer l'aimant en U dans les rails de Laplace. Faire débiter le générateur et augmenter doucement la tension : le barreau avance. Avec un microvoltmètre, il est également possible de montrer la production d'énergie électrique.

## Conclusion

- Résumé précis des manipulations.
- Applications : moteurs, transformateurs. Moteur asynchrone en manipulation qualitative.

# Production et conversion d'énergie électrique

OBJECTIF – Illustrer les étapes entre la source d'énergie et l'électricité conditionnée.

## Bibliographie

- [1] F. Bernot. Machines à courant continu - constitution et fonctionnement. *Techniques de l'ingénieur*, 1999.
- [2] F. Bernot. Machines à courant continu - construction. *Techniques de l'ingénieur*, 1999.
- [3] P. Brenders, L. Douchet, and M. Sauzeix. *Électrotechnique et conversion de puissance PSI*. Les nouveaux précis Bréal, 2004.
- [4] J. M. Donnini and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 4 : Électricité et applications*. Pierron, 2004.
- [5] R. Duffait. *Expériences d'électronique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 2010.
- [6] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Électronique II PSI*. Hachette, 1997.
- [7] T. Wildi and G. Sybille. *Électrotechnique*. De boeck, 2005.

## Introduction

- Modes de production de l'énergie électrique.
- Schéma de conditionnement de l'énergie.
- Annonce du plan avec intérêt de chaque dispositif.

## 1 Production d'énergie électrique : génératrice à courant continu

### 1.1 Principe de la génératrice et équation de fonctionnement

- Force de Laplace. Couple. Force électromotrice d'induction.
- Relations constitutives et schéma équivalent.

MANIPULATIONS : On alimente avec un premier générateur l'inducteur (bobinage du stator) à 110V. Au bornes de l'induit (bobinage du rotor), on alimente avec un second générateur de puissance placé en série avec un rhéostat de démarrage. Ce rhéostat a pour but d'éviter les surintensités au démarrage (ici il est plus pour un aspect pédagogique, mais est souvent utilisé sur les applications de forte puissance). Une fois le moteur lancé, on court-circuite le rhéostat de démarrage.

Sans charge sur la génératrice, on mesure  $U$ ,  $I$  et  $\omega$  : on en déduit le coefficient  $k\phi$  que l'on détermine ensuite pour d'autres valeurs de  $U_e$  : on obtient une droite  $k\phi = f(U_e)$ .

On fait ensuite une étude mécanique en charge. On fixe  $U$  et  $U_e$  aux valeurs nominales et on mesure, pour différentes résistances (rhéostats) aux bornes de la génératrice, le couple et la vitesse angulaire, ainsi que les intensités rotorique  $I$  et statorique  $I_e$ .

On obtient ainsi les deux relations de la MCC, on fait ensuite un bilan énergétique à partir des données acquises.

### 1.2 Énergie électrique

- Relation  $E = k\phi\Omega$  pour la génératrice. Calcul du coefficient  $k\phi$ .
- Résistance interne de l'induit.

### 1.3 Étude mécanique

- Calcul du couple et du couple de frottement. Même  $k\phi$ .

### 1.4 Calcul du rendement

- Calcul basique puis méthodes des pertes séparées. Conclusion.

## 2 Transformateur : conversion alternatif - alternatif

### 2.1 Principe du transformateur

- Définition, intérêt et construction expérimentale. Relation entre primaire et secondaire.
- Étude à vide et en court-circuit. Rapport de transformation.

**MANIPULATIONS :** Constituer un transformateur. Pour cela, mettre dans un circuit magnétique fermé deux bobines dont le nombre de spires est différent. Prendre des bobines qui supportent une intensité suffisante. Préférer construire un transformateur abaisseur de courant (plus grand nombre de spire au secondaire).

Allumer l'alternostat. Il crée de fortes surintensités au démarrage pouvant faire disjoncter. Pour éviter cela, on ne branche rien à ses bornes, on tourne la molette à 10 %, on allume et on rebranche le boîtier prise une fois que l'on a ramené la tension à 0.

Pour différentes valeurs de tension dans le primaire, mesurer à vide la tension au secondaire. Brancher ensuite directement l'ampèremètre aux bornes. Établir la relation entre l'intensité au secondaire et l'intensité au primaire.

### 2.2 Étude énergétique et étude en charge

- Estimation des pertes fer et des pertes cuivre.
- Rendement en charge et méthode des pertes séparées.

**MANIPULATIONS :** Les pertes fer viennent des propriétés magnétiques de la carcasse, des pertes de flux magnétique et des courants de Foucault dans le fer (atténués par le feuilletage). Ces pertes ne dépendent que du champ dans la carcasse. On se place à intensité négligeable donc à vide. On mesure  $u_2$ ,  $u_1$ ,  $i_1$  et  $\mathcal{P}_1$  pour différentes valeurs de la tension aux bornes du primaire. On retient  $i_1 = f(u_1)$  qui n'est pas une droite et on trace ensuite  $\mathcal{P}_1 = f(u_1^2)$  qui est une droite.  $u_1$  étant proportionnelle à  $B$ , les pertes fer sont en  $B^2$ .

On se place à petit  $u_1$  pour étudier les pertes cuivre (on s'affranchit des pertes fer en  $u_1^2$ ). On mesure en court-circuit  $u_1$ ,  $i_1$ ,  $i_2$  et  $\mathcal{P}_1$ .  $\mathcal{P} = f(i_2^2)$  est une droite.

Pour obtenir la caractéristique en charge, on branche un rhéostat de 100  $\Omega$ . On constate que  $u_2 - u_{2,\text{vide}}$  ne dépasse pas un certain pourcentage de la tension à vide. On trace  $\eta = f(\mathcal{P}_2) \mathcal{P}_1$  en fonction de  $i_2$ . Méthode des pertes séparées.

## 3 Redresseur : conversion alternatif - continu

- Principe et intérêt. Constitution expérimentale. Explications.
- Redressement double alternance (mono alternance avant si temps).
- Lissage, taux d'ondulation. Rendement.

**MANIPULATIONS :** Avant de commencer, pour éviter de griller un fusible, contrôler toutes les diodes au multimètre (diodemètre). Mettre en route l'alternostat (prendre les mêmes précautions que pour l'étude du transformateur). Observer l'entrée et la sortie sur l'oscilloscope par le biais de sondes différentielles. Contrôler également la tension d'entrée au multimètre. La sortie est observée aux bornes d'un rhéostat de charge.

Relever le redressement double-alternance, l'impact de la tension de seuil à faible et haute tension. Mettre les capacités chimiques en parallèle du rhéostat de charge, dans le bon sens et après les avoir déchargées. Faire l'expérience avec les trois capacités et observer l'efficacité du lissage.

Caractériser la sortie avec le taux d'ondulation (mesure avec un voltmètre **True RMS**). Faire un bilan de puissance, en déduire le rendement.

## Conclusion

- Résumé précis des manipulations effectuées.
- Ouverture sur d'autres types de conversion avec interrupteur commandé (thyristor, MOSFET) : hacheur, etc.

# Amplification de signaux

OBJECTIF – Étudier les caractéristiques des amplificateurs au travers d'amplificateurs à transistors.

## Bibliographie

- [1] D. Aubert and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 3 : Électronique*. Pierron, 1992.
- [2] R. Duffait. *Expériences d'électronique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 2010.
- [3] A. P. Malvino. *Principes d'électronique*. Mc Graw-Hill, 1991.

## Introduction

- Problématique du transfert d'énergie, mais aussi de l'asservissement.
- Définition et caractéristiques d'un amplificateur.
- Expérience introductive : micro/haut-parleur.

MANIPULATIONS : Micro branché directement sur le haut parleur : on n'entend rien. D'où la nécessité de l'amplification.

## 1 Le transistor bipolaire

- Présentation et schéma électrique pour le tracé des caractéristiques.

### 1.1 Tracé de $I_C=f(V_{CE})$

- On réalise un tracé de caractéristiques devant le jury pour une valeur de  $i_B$  fixe. Faisceau de caractéristiques.

MANIPULATIONS : On trace une première caractéristique à la main en relevant l'intensité  $I_b$  qui doit rester constante. Pour plusieurs alimentations entre émetteur et collecteur (masse flottante), on mesure  $V_{CE}$  et  $i_C$ . On alimente ensuite avec une sinusoïde TBF pour tracer les caractéristiques sur LatisPro, pour différents  $i_B$  (entre 0 et 100  $\mu A$  environ).

### 1.2 Tracé de $I_C=f(I_b)$

- Relevé de la valeur du plateau et tracé de la droite sur Régressi.

MANIPULATIONS : On repère à chaque fois la valeur de  $i_C$  sur le plateau des courbes précédemment acquises et on trace ainsi la caractéristique.

### 1.3 Tracé de $V_{BE}=f(I_b)$

- Tracé sans résistance de protection.

MANIPULATIONS : En gardant  $i_b$  assez faible, et en évitant de griller le transistor, tracer la caractéristique  $V_{BE} = f(i_B)$  sur Régressi.

## 2 Amplificateur à émetteur commun

### 2.1 Polarisation et paramètres hybrides

- Étude du circuit de polarisation. Choix des éléments et déterminations des paramètres hybrides.

- Au voisinage du point de fonctionnement :

$$\begin{cases} v_{BE} = h_{11} i_B + h_{12} v_{CE} \\ i_C = h_{21} i_B + h_{22} v_{CE} \end{cases}$$

## 2.2 Linéarité de l'amplificateur à petit signaux

- Observation avec la FFT du signal. Augmentation de l'amplitude et distorsion. Explication sur le faisceau de caractéristiques.

MANIPULATIONS : On monte l'émetteur commun (le n°3 du Duffait, attention au sens de branchement des capacités chimiques) et on vérifie que pour  $v_e = 10$  mV, on a bien un signal sinusoïdal en sortie. On fait la FFT à l'oscilloscope. On observe une distorsion en augmentant progressivement l'amplitude.

## 2.3 Gain et impédance

- Calcul du gain et dépendance en fréquence. Fréquence de coupure.
- Impédance d'entrée (ODG 220  $\Omega$ ) et de sortie (ODG 720  $\Omega$ ) par la méthode de la tension moitié.
- Expérience micro/ampli/haut-parleur ( $Z_{HP} \approx 6 \Omega$ ).

MANIPULATIONS : On trace le diagramme de Bode de gain de l'amplificateur en utilisant les mesures faites à l'oscilloscope : deux fréquences de coupure. Origine (capacité chimique puis effet Miller).

Par la méthode des tensions moitié, obtenir l'impédance d'entrée et de sortie de l'amplificateur émetteur commun. Origine du non-fonctionnement de l'association micro/ampli/haut-parleur.

## 3 Montage push-pull

- Présentation et explication rapide : un est bloqué quand l'autre est passant.

### 3.1 Montage initial

- Mesure de la sortie aux bornes d'une charge. Distorsion.

MANIPULATIONS : On fait le montage du push-pull non corrigé : observation de distorsions.

### 3.2 Montage corrigé

- Push-pull corrigé. Redressement du signal.
- Expérience micro/2 ampli/haut-parleur.

MANIPULATIONS : Utiliser un rhéostat (une simple résistance grillerait). Calcul du rendement. Expérience avec le haut-parleur.

## Conclusion

- Résumé des manipulations. Amplification en tension et en puissance.
- Ouverture sur les amplificateurs opérationnels.

## Mise en forme, transport et détection de l'information

OBJECTIF – Comprendre comment transmettre à distance un signal analogique.

### Bibliographie

- [1] R. Duffait. *Expériences d'électronique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 2010.
- [2] M. Krob. *Électronique expérimentale*. Ellipses, 2002.
- [3] F. Manneville and J. Esquieu. *Systèmes bouclés liés, de communication et de filtrage*. Dunod, 1996.

### Introduction

- Difficulté à transmettre à distance un signal.
- Bruit, atténuation, déformation à prendre en compte.

## 1 Transmettre l'information : le câble coaxial

- Proposition : le guidage d'une onde suffit pour le transport.

### 1.1 Vitesse de propagation et réception du signal

- Vitesse de propagation d'un pulse. Adaptation d'impédance.

MANIPULATIONS : Avec le GBF, générer un Burst à haute fréquence (autour du MHz) et l'envoyer sur le câble coaxial avec une impédance infinie (ou presque) au bout. Observer à l'oscilloscope le retour d'une onde. Calculer le retard.

Avec le même Burst, placer un potentiomètre de  $100 \Omega$ . Essayer d'atténuer le plus possible le signal réfléchi. Mesurer la résistance correspondante : c'est l'impédance caractéristique du câble.

### 1.2 Atténuation du signal

- Tracé du diagramme de Bode. Filtre passe-bas.
- Problèmes : un seul signal, beaucoup de bruit. D'où la nécessité d'une mise en forme. Plusieurs porteuses : plusieurs signaux.

MANIPULATIONS : À basse fréquence, il est difficile de séparer les deux Burst, on commence l'étude par un sinus en entrée, on mesure la tension à l'autre extrémité avec adaptation d'impédance.

À haute fréquence, des réflexions viennent perturber la mesure malgré l'adaptation d'impédance. Faire la mesure avec un Burst. Seul problème : on est assez limité en fréquence et l'atténuation est encore assez faible.

## 2 Modulation en amplitude

### 2.1 Modulation

- Modulation par multiplieur. Signal obtenu. Transformée de Fourier. Rapport de modulation.

MANIPULATIONS : Sur le signal modulé, faire apparaître le rapport de modulation (ajout d'un offset), le contenu spectral (transformée de Fourier).

## 2.2 Démodulation par détecteur d'enveloppe

- Présentation de la méthode sur un sinus et application à la démodulation. Condition à satisfaire.

**MANIPULATIONS :** Contruire le détecteur de crête du Krob, en utilisant une diode sans seuil (montage à AO). Calculer théoriquement la valeur des composants à utiliser (ajustement du produit RC). Pour que la détection marche, il faut que la porteuse et le signal modulant aient des fréquences assez éloignées.

## 2.3 Démodulation par détection synchrone

- Multiplication par la porteuse et filtre passe-bas. Montage du Duffait.
- Intérêt par ailleurs de la détection synchrone dans la détection de l'information.

**MANIPULATIONS :** On multiplie le signal par la porteuse, puis on utilise un filtre passe-bas à la bonne fréquence (préférer une réponse de Butterworth).

# 3 Modulation en fréquence

## 3.1 Oscillateur commandé en tension

- Réalisation d'un OCT. Étude.
- Calcul du  $k$  ( $f = f_0 + ku$ ) des Agilent avec Hameg en entrée.

**MANIPULATIONS :** Câbler le montage de d'OCT du Duffait (paragraphe oscillateur). Tester l'OCT avec une tension continue. Mesurer la fréquence en fonction de la tension. Montrer la modulation en fréquence.

Connecter un premier GBF à l'entrée OCT d'un second. Observer la modulation en fréquence si la sortie du premier est sinusoïdale. L'excursion  $\Delta f$  en fréquence autour de  $f_{\text{sinus}}$  est proportionnelle à la tension en entrée, elle est égale à l'affichage si la tension d'entrée est entre +5V et -5V (10V pic-à-pic). Mesurer les caractéristique de l'OCT des Agilent.

## 3.2 Modulation

- Réalisation de la modulation. Spectre du signal modulé. Caractéristiques.

## 3.3 Démodulation par PLL

- Étude de la PLL avec un sinus. Plage d'accrochage et de verrouillage.
- Application à la démodulation FM. Envoyer deux signaux différents à démoduler.

**MANIPULATIONS :** Câbler le montage du Duffait. En entrée, mettre un sinus à fréquence voisine du GBF fonctionnant en OCT. Repérer les plages d'accrochage, de verrouillage (hystérésis).

Pour démoduler en fréquence, choisir une excursion en fréquence assez petite (sinon apparaissent des distorsions) et choisir une fréquence de porteuse pour rester dans la phase de verrouillage de la PLL. On peut sommer deux signaux (par exemple un Do et un La, ou un sinus et un triangle) modulés et les démoduler séparément en changeant la fréquence du signal d'entrée de la PLL.

# Conclusion

- Test de l'ensemble du dispositif. Modulation du La à 100 kHz et d'un Do à 200 kHz : on capte radio "La" et radio "Do".
- Résumé précis des manipulations.
- Ouverture sur les signaux numériques.

# Acquisition, analyse et traitement des signaux

OBJECTIF – Illustrer les différentes étapes d'une stratégie d'acquisition.

## Bibliographie

- [1] G. Asch. *Acquisition de données : du capteur à l'ordinateur*. Dunod, 2010 ?  
 [2] R. Duffait. *Expériences d'électronique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 2010.

## Introduction

- Présentation de la chaîne d'acquisition : signal, capteur, acquisition, échantillonnage, etc. et définitions.
- Illustrer les deux premiers points avec un micro sur l'oscilloscope.

## 1 Mesure d'une tension continue : CAN

- Présentation du CAN simple rampe. Application à la détermination de la tension d'une pile après droite d'étalonnage.
- Mentionner les avantages du CAN double rampe.

MANIPULATIONS : Câbler le montage incluant l'intégrateur, le comparateur et le double interrupteur mécanique. Relier un des interrupteurs aux bornes de la capacité, relier l'autre aux bornes de l'entrée "Départ" du compteur (en mode ouverture). La sortie du comparateur est mise sur "Arrêt" du chronomètre, en fermeture. On repère le temps indiqué sur le chronomètre pour différentes valeurs de tension à mesurer.

## 2 Échantillonnage

- Rôle d'échantillonnage. Construction de l'échantillonneur bloqueur. Critère de Shannon.

MANIPULATIONS : Câbler le montage (le signal TTL est un signal délivré par un GBF, (V entre 0 et 10 V, pulses de 100  $\mu$ s, à fréquence assez élevée). Consulter le branchement du 4066 sur sa datasheet ou à la dernière page de [2]. On observe sur le GBF le signal réel et le signal échantillonné.

## 3 Acquisition numérique

### 3.1 Repliement spectral

- Présentation sur LatisPro du repliement spectral. Influence de l'acquisition finie dans le domaine de Fourier. Fenêtrage.

MANIPULATIONS : On prend une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz. Acquisition d'un signal à 49, 50 et 51 Hz.  
 Pour mettre en évidence le repliement spectral, on prend un signal créneau à 15 Hz : on a des pics à 15 Hz, 45 Hz, 25 Hz (75 Hz replié), etc.

### 3.2 Influence du calibre et nombre de bits

- Discrétisation du signal en fonction du calibre. Nombre de bits.
- Conclusion sur les critères pour une bonne acquisition.

## 4 Traitement analogique

- Acquisition d'un La dans un environnement bruité (bruit radio assez fort), on ne peut pas dépasser  $f_{\text{ech}} = 500$  Hz. Repliement et rapport signal/bruit.
- Multiplication puis filtre passe-bas. Signal aux différents endroits du circuit (temporel et Fourier).

## Conclusion

- Résumé précis des manipulations effectuées.
- Utilisations pratiques.

NOTES : Montage présenté en oral blanc, un peu court peut-être.

## Mesure de fréquences temporelles (domaine de l'optique exclu)

OBJECTIF – Illustrer différentes méthodes de mesure de la fréquence, et la nécessité d'un étalon.

### Bibliographie

- [1] D. Aubert and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 3 : Électronique*. Pierron, 1992.
- [2] R. Duffait. *Expériences d'électronique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 2010.
- [3] R. Duffait. *Expériences de physique au CAPES de sciences physiques*. Bréal, 2011.
- [4] L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 1 : Mécanique*. Pierron, 1992.
- [5] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

### Introduction

- Définition de la fréquence, à partir de la définition de la seconde selon le BIPM.

## 1 Mesures par comptage

### 1.1 Pendule simple

- Mesure de la fréquence par comptage et au chronomètre (référence de temps). Repérage quand la vitesse est maximale. Comparaison à l'oscilloscope.
- Incertitude : évaluée par la dispersion des mesures.

### 1.2 Fréquence à portes logiques

- Utiliser le boîtier tout fait. Bien expliquer le fonctionnement avec un oscilloscope quatre-voies. Référence : signal TBF
- Application à la détermination de la fréquence d'un La (440 Hz).

MANIPULATIONS : On alimente le compteur et le boîtier à portes logiques par une tension continue de 5V. Sur l'entrée TBF, on met un crêteau entre 0 et 5V (à 500 mHz typiquement). Sur l'entrée dite BF, on met un crêteau de la fréquence à mesurer, typiquement 10 à 20 Hz. Observer tous les signaux sur l'oscilloscope (à quatre voies si possible). On connecte la sortie sur le compteur. Pour de plus hautes fréquences, utiliser deux compteurs en mettant l'horloge du premier sur le dépassement du second.

Vérifier le signal du micro lorsque le diapason est frappé. Avec un comparateur à hystérésis (le comparateur simple étant sensible au bruit, on évite ainsi des basculements intempestifs). L'hystérésis doit être assez faible, la tension de sortie du micro l'étant. Cette tension est redressée par une diode, puis abaissée par un pont diviseur de tension. Il est possible que la connection de la tension aux bornes de la résistance (du pont diviseur) et du fréquencemètre s'accompagne de problèmes d'impédance : utiliser un suiveur.

## 2 Mesures par comparaison

### 2.1 Stroboscopie

- Caractériser la vitesse d'un moteur à courant continu en fonction de la tension délivrée. Faire une droite  $\omega = f(U)$ .

### 2.2 Battements acoustiques

- Expérience pour déterminer la fréquence d'un diapason désaccordé par l'obtention de battements (à l'oscilloscope). Facteur 2.

**MANIPULATIONS :** On place le micro entre le diapason à 440 Hz et le diapason désaccordé. Plus la masse est haute, plus le décalage en fréquence est faible.

## 2.3 Effet Doppler et hétérodynage

- Manipulation avec table traçante, émetteur et récepteur à ultrasons.
- Faire une droite pour différentes vitesses. Incertitude liée à l'atténuation du signal.

**MANIPULATIONS :** Placer l'émetteur sur la table traçante et resserrer correctement tout. Mettre l'émetteur parallèle à sa direction de déplacement. Mettre le récepteur bleu en face et au même niveau (récepteur air). Alimenter l'émetteur avec une tension 10 V et chercher la fréquence maximisant la réception. Mettre les tensions d'entrée et de sortie sur un multiplieur et filtrer avec le boîtier filtre de type Butterworth d'ordre 4 (si pas disponible, câbler un filtre actif) : observer le signal résultant sur l'oscilloscope en mode Roll pour différentes vitesses de la table traçante.

## 3 Mesures de fréquences et analyse de Fourier

- Faire la FFT des battements acoustiques.
- Sur l'exemple des battements quatre pendules VideoCom, montrer le rôle de la durée d'acquisition.
- Montrer le critère de Shannon.
- Timbre d'une flûte.

## Conclusion

- Fréquence souvent plus simples à mesurer.
- Spectrométrie optique.

## Mesure de longueurs

OBJECTIF – Montrer différentes techniques de mesure de longueurs, sur plusieurs ordres de grandeur, et le rôle des étalons.

### Bibliographie

- [1] N. W. Ashcroft and N. D. Mermin. *Physique des solides*. EDP Sciences, 2011.
- [2] J. P. Bellier, C. Bouloy, and D. Guéant. *Physique expérimentale aux concours de l'enseignement : optique, mécanique, fluides, transferts thermiques*. Dunod, 2012.
- [3] R. Duffait. *Expériences d'optique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 1997.
- [4] Sextant. *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.
- [5] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

### Introduction

- Définition historique des unités de longueurs, du mètre. Définition actuelle.
- Présentation des outils usuels : palmer, pied à coulisse, mètre ruban.

## 1 Mesure par parallaxe

- Expérience avec les deux goniomètres. Bien détailler le protocole et les incertitudes. Utilisation historique et actuelle.

MANIPULATIONS : On dispose deux goniomètres sur un même plan, à une distance connue l'un de l'autre. On mesure la distance entre les deux pieds cylindriques, constituant les axes de rotation des goniomètres au mètre ruban. On règle les oculaires des deux lunettes de façon à voir les réticules nets. On repère la direction joignant les centres des deux goniomètres. Pour cela, on éclaire une lunette à l'envers avec une lame QI, un verre dépoli et un filtre anticalorique. Avec l'autre, on cherche à observer net le réticule de la première, puis on joue sur l'orientation des deux lunettes de manière à confondre les deux réticules. On relève les angles correspondant à cette position.

On pointe ensuite avec chaque lunette un objet ponctuel. On relève les valeurs d'angle correspondantes.

## 2 Mesure par temps de vol

- Inconvénients de la parallaxe. Principe de la télémétrie avec récepteur et émetteur ultrasonore et réflexion d'un burst sur une plaque. Tracer une droite.
- Incertitude sur la température, sur le  $\Delta t$ .
- Application : télémètres de chantier, télémétrie optique.

MANIPULATIONS : Un émetteur d'onde ultrasonore émet un signal qui est réfléchi par l'objet dont on veut mesurer l'éloignement. On détecte l'écho en retour et on déduit du temps de propagation la distance à l'objet.

- On place côte-à-côte émetteur et récepteur et on place à une distance  $d$  une plaque.
- On alimente l'émetteur par une tension en "Burst" de fréquence  $f = 40.8$  kHz, correspondant à la fréquence de résonance du récepteur, chacun étant séparés de 10 ms pour éviter une confusion des signaux d'écho.
- On repère à l'oscilloscope la réception du signal. On mesure, en fonction de la distance  $d$  mesurée à la règle, le temps  $\Delta t$  de retard, à l'aide des curseurs de l'oscilloscope.

### 3 Mesures interférentielles

- Mesure de l'épaisseur d'une lame mince. D'abord avec la technique classique, expliquer pourquoi ça ne marche pas.
- Méthode du spectre cannelé sur une petite plage de longueur d'onde (car l'indice optique en dépend).
- Comparer avec la valeur attendue / le Palmer.

MANIPULATIONS : On place dans la configuration coin d'air l'interféromètre de Michelson. Une première méthode pour obtenir l'épaisseur de la lame mince de verre consiste à compenser le déphasage pour retrouver les franges. Or on constate que l'aspect des franges a changé. L'origine de ce changement est le caractère dispersif du verre. La méthode précédente permet d'obtenir un résultat qui est faussé de 10% environ.

On utilise donc une autre méthode. On place la lame sur un des bras de l'interféromètre de Michelson. On place le spectromètre OceanOptics HR4000 au niveau de l'endroit où était la frange centrale blanche. On fait l'analyse de ce spectre.

Les franges lumineuses correspondent à  $p_1\lambda_1 = 2(n(\lambda_1) - 1)e$  et  $p_2\lambda_2 = 2(n(\lambda_2) - 1)e$ , on choisit deux longueurs d'onde voisines pour avoir  $n(\lambda_1) \approx n(\lambda_2) \approx n(\lambda_m)$ . Ainsi :

$$e = (p_2 - p_1) \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \frac{1}{2(n(\lambda_m) - 1)}$$

### 4 Mesures par diffraction

#### 4.1 Épaisseur d'un fil fin

- On calibre avec des fils de diamètre connu (à mesurer avec le Palmer ou valeur donnée à 3 %). Déterminer le coefficient d'étalonnage.
- La mesure du diamètre d'un cheveu au Palmer est impossible car le cheveu est souple.

MANIPULATIONS : Le fil est placé sur la course du faisceau laser. La loi de la diffraction de Fraunhofer nous donne l'expression de l'interfrange  $i$  en fonction de l'épaisseur du fil :

$$i = \frac{\lambda D}{d}$$

Pour différents fils calibrés de diamètre connus, on mesure la longueur correspondant à dix interfranges à la règle graduée. On trace l'interfrange en fonction du diamètre. Cela constitue la courbe d'étalonnage. On s'en sert pour déterminer l'épaisseur d'un cheveu de diamètre inconnu. L'incertitude sur la largeur des fils est donnée sur les diapositives, celle sur la mesure de l'interfrange résulte du repérage de l'endroit sombre et est variable en fonction de la mesure effectuée.

#### 4.2 Diffraction électronique

- On envoie le faisceau sur un poudre de graphite. Calcul des deux rayons en fonction de la tension (à mesurer si possible avec un multimètre allant au dessus de 1 kV, pour connaître les incertitudes).
- Conclusion et incertitudes.

### Conclusion

- Rappeler chacune des méthodes. Insister sur l'étalon (règle, longueur d'onde) dans chaque cas.
- Autres méthodes.

NOTES : Montage présenté le jour J, voir montage de démonstration pour plus de détail.

# Systemes bouclés

OBJECTIF – Illustrer expérimentalement la richesse de comportements des systèmes bouclés.

## Bibliographie

- [1] P. Brenders, G. Buffard, L. Douchet, M. Sauzeix, and Tisserant S. *Électronique PSI*. Les nouveaux précis Bréal, 2005.
- [2] R. Duffait. *Expériences d'électronique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 2010.
- [3] M. Krob. *Électronique expérimentale*. Ellipses, 2002.
- [4] F. Manneville and J. Esquieu. *Systemes bouclés linéaires, de communication et de filtrage*. Dunod, 1996.

## Introduction

- Définition d'un système bouclé.
- Oscillateurs pseudo-sinusoïdaux et à relaxation. Rétroaction.

## 1 Oscillateur quasi-sinusoïdal : oscillateur de Wien

### 1.1 Étude en boucle ouverte

- Constitution du circuit et équation. Caractéristiques expérimentales. Diagramme de Bode en gain et en phase.

MANIPULATIONS : Câbler le montage en boucle ouverte de [3] (attention aux masses). Pour identifier la pulsation de résonance, on utilise la méthode de Lissajous : mettre en XY l'entrée et la sortie et rechercher le moment où le diagramme se rapproche le plus d'une droite en faisant varier la fréquence.

Pour obtenir le diagramme de Bode, on peut utiliser la méthode de la réponse indicielle (réponse à un créneau très basse fréquence) et acquérir le signal en déclenchement sur LatisPro avec une fréquence d'échantillonnage suffisante et un temps d'acquisition assez long. Il est également possible d'utiliser la wobulation du GBF, mais le diagramme de Bode est très bruité à hautes fréquences.

### 1.2 Étude en boucle fermée

- Résistance critique et condition de Barkhausen. Fréquence. Distorsion.
- Naissance des oscillations et portrait de phase.

MANIPULATIONS : On repère la résistance de démarrage des oscillations. À une résistance voisine et plus élevée, on mesure et on interprète la fréquence et l'amplitude des oscillations. Tracer également leur spectre. Distorsion à l'augmentation de la résistance.

Pour visualiser le démarrage des oscillations, enlever une petite résistance en parallèle de la boîte à décade et déclencher (mode Normal et Single).

## 2 Oscillateur à relaxation

### 2.1 Multivibrateur stable

- Constitution et fonctionnement. Principe. Vase de Tantale.

## 2.2 Application à la conception d'un OCT

- Rajout d'un multiplieur. Droite  $f = f(V)$ .

MANIPULATIONS : Câbler le montage de d'OCT du Duffait (paragraphe oscillateur). Tester l'OCT avec une tension continue. Mesurer la fréquence en fonction de la tension. Montrer la modulation en fréquence.

## 3 Boucle à verrouillage de phase

### 3.1 Étude de la PLL

- Étude de la PLL avec un sinus. Plage d'accrochage et de verrouillage. Explications.

MANIPULATIONS : Connecter un premier GBF à l'entrée OCT d'un second. Observer la modulation en fréquence si la sortie du premier est sinusoïdale. L'excursion  $\Delta f$  en fréquence autour de  $f_{\text{sinus}}$  est proportionnelle à la tension en entrée, elle est égale à l'affichage si la tension d'entrée est entre +5V et -5V (10V pic-à-pic). Mesurer les caractéristique de l'OCT des Agilent.

Câbler le montage de PLL du Duffait. En entrée, mettre un sinus à fréquence voisine du GBF fonctionnant en OCT. Repérer les plages d'accrochage, de verrouillage (hystérésis).

### 3.2 Application à la démodulation FM

- Application à la démodulation FM. Deux signaux différents (Do et La) à démoduler.

MANIPULATIONS : Pour démoduler en fréquence, choisir une excursion en fréquence assez petite (sinon apparaissent des distorsions) et choisir une fréquence de porteuse pour rester dans la phase de verrouillage de la PLL. On peut sommer deux signaux (par exemple un Do et un La, ou un sinus et un triangle) modulés et les démoduler séparément en changeant la fréquence du signal d'entrée de la PLL.

## 4 Oscillateurs à portes logiques

- Système bouclé à deux portes stable : case mémoire.
- Système bouclé à trois portes instable : temps de commutation.

MANIPULATIONS : Alimenter les portes logiques avec une alimentation continue de 5V.

Boucler deux portes NAND. En un point du circuit, imposer la masse et le débrancher le fil ensuite. Le système conserve la mémoire de la tension.

Boucler un nombre impair de portes NAND et observer sur l'oscilloscope l'instabilité du système. Mesurer la période du signal en fonction du nombre de portes logiques et tracer cette période en fonction du nombre de portes logiques. On attend  $T = 6n\tau$ , où  $\tau$  est le temps de commutation des portes logiques.

## Conclusion

- Résumé précis de manipulations.
- Richesse des systèmes bouclés. Asservissement (manipulation rapide).

# Instabilités et phénomènes non-linéaires

OBJECTIF – Comprendre sur des exemples de phénomènes non-linéaires des caractéristiques et des méthodes d'étude des phénomènes non-linéaires.

## Bibliographie

- [1] R. Duffait. étude expérimentale des oscillateurs mécaniques. *BUP*, 867, 2004.
- [2] M. Krob. *Électronique expérimentale*. Ellipses, 2002.
- [3] S. H. Strogatz. *Nonlinear dynamics and chaos*. Westview Press, 1994.
- [4] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

## Introduction

- Linéarité : approximation souvent commode, mais pas toujours valide.
- Absence de solutions analytiques.

## 1 Du linéaire au non-linéaire : l'exemple du pendule pesant

### 1.1 Dispositif expérimental et capteur

- Étalonnage du capteur d'angle entre  $-\pi$  et  $\pi$ , après réglage du zéro. Vérifier la linéarité.

MANIPULATIONS : Brancher le pendule sur son boîtier, observer rapidement le signal à l'oscilloscope, vérifier que celui-ci est sinusoïdal. Si celui-ci est composé de créneaux brutaux, c'est que la masse est du mauvais côté. Régler le gain pour avoir la tension maximale dans la zone d'étude (environ 10 V pour  $\theta = \pi$ ). Régler le zéro sur l'oscilloscope en mode Roll. Étalonner le pendule : noter pour chaque angle (de  $10^\circ$  en  $10^\circ$ ) la tension : on obtient un étalonnage assez précis malgré la grande incertitude sur  $\theta$ .

### 1.2 Période des oscillations et perte d'isochronisme

- Calcul de la période pour différents angles de départ inférieurs à  $\pi/2$ . Formule de Borda.

MANIPULATIONS : Mesurer la période des oscillations pour différentes angles initiaux (à vitesse nulle). Mesurer précisément la masse (avec la vis) et la longueur au centre (pied à coulisse et datasheet). Vérifier la formule de Borda.

### 1.3 Portrait de phase

- Mettre sur le même graphique plusieurs portraits de phase (Outil Nouvelle Fenêtre sur LatisPro).
- Déformation des ellipses.

MANIPULATIONS : Enregistrer le signal de  $\theta$  sur LatisPro sur deux ou trois périodes. Pour différentes amplitudes, tracer le portrait de phase  $\dot{\theta} = f(\theta)$  après avoir numériquement calculé la vitesse angulaire. Superposer ces différents diagrammes en utilisant la fonction "Nouvelle fenêtre" sur LatisPro.

Calculer également la transformée de Fourier et constater l'enrichissement spectral.

## 2 Oscillateur de Van der Pol

### 2.1 Étude de l'oscillateur non-linéaire

- Tracé de la caractéristique de l'élément non-linéaire. Montrer en XY sur l'oscilloscope. Modélisation.

**MANIPULATIONS :** La tension continue délivrée dans l'élément non-linéaire ne doit pas être trop importante (max. 1V). Mettre en entrée une tension de quelques volts, et visualiser sur l'oscilloscope la caractéristique. Ne pas atteindre des fréquences trop élevée (max. 1kHz).

Acquérir l'entrée et la sortie sur LatisPro, fitter la courbe  $s = f(e)$  par un fit cubique et obtenir les valeurs correspondantes. Montrer sur l'oscilloscope la TF du signal et mettre en évidence deux pics à  $f$  et  $3f$ .

### 2.2 Oscillation quasi-sinusoïdal

- Terme non-linéaire faible.
- Bifurcation et démarrage des oscillations. Amplitude : période et temps de démarrage des oscillations. Bifurcation de Hopf supercritique.

**MANIPULATIONS :** Réaliser le montage de l'oscillateur de Van der Pol. Acquérir sur l'oscilloscope les tensions  $u$  et  $s$ . Mettre en évidence la condition de démarrage des oscillations, visualiser ce démarrage à l'oscilloscope en mode XY. Mesurer la fréquence et l'amplitude à l'oscilloscope. Mettre en évidence la bifurcation.

### 2.3 Oscillations de relaxation

- Enrichissement du spectre quand on augmente  $R_{NL}$ . Période des oscillations de relaxation.
- Discuter le rapport aux non-linéarités. Cycle en mode XY.

## 3 Forçage et oscillations double-puits

### 3.1 Portrait de phase

- Oscillations autour des deux points puis convergence en un.
- Analogie mécanique : reprendre le dispositif du pendule avec un fort aimant : portrait de phase.

**MANIPULATIONS :** En gardant le même élément non-linéaire, réaliser le montage de l'oscillateur double puit. Étudier cette oscillateur avec un créneau TBF, puis avec une excitation sinusoïdale.

### 3.2 Forçage et transition vers le chaos

- Définition du chaos.
- Forçage et attracteur étrange.

## Conclusion

- Résumé précis des manipulations et des idées fortes.
- Ouverture sur l'expérience de la balle de ping-pong : deux bifurcations.

# Ondes, propagation et conditions aux limites

OBJECTIF – Montrer la généralité du phénomène ondulatoire et étudier les notions d'impédance et de condition aux limites.

## Bibliographie

- [1] D. Aubert and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 3 : Électronique*. Pierron, 1992.
- [2] C. Garing. *Ondes électromagnétiques dans le vide et dans les milieux conducteurs*. Ellipses, 1998.
- [3] L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 1 : Mécanique*. Pierron, 1992.
- [4] R. Taillet, L. Villain, and P. Fevre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

## Introduction

- Équation de d'Alembert. Expérience de propagation puis de réflexion sur la corde d'escalade.

## 1 Importance des conditions aux limites

- Corde de Melde. Fréquence de résonance en fonction du nombre de nœuds. Célérité.

MANIPULATIONS : Relier le GBF en entrée INPUT de l'amplificateur de courant et connecter la sortie avec le câble spécial au vibreur. Pour mettre en route l'ampli, mettre un petit gain et appuyer sur RESET.

Fixer une extrémité de la corde au vibreur et l'autre extrémité à une masse, assez élevée pour lester significativement, pas trop pour avoir des oscillations visibles (typiquement 200 g). Régler le niveau de la corde.

Alimenter l'ampli avec un signal de basse fréquence (d'amplitude  $\approx 3V$ ), et augmenter progressivement la fréquence. Observer l'établissement de modes propres et relever les fréquences correspondantes.

Peser précisément la corde, mesurer précisément sa longueur et peser la masse.

## 2 Propagation libre

- Présentation des différents éléments du banc hyperfréquence.
- Interféromètre de Fabry-Pérot avec ondes centimétriques et moteur.
- Calcul de la célérité de la lumière dans le vide.

MANIPULATIONS : Monter le banc hyperfréquence (alimentation diode Gunn, vernier de lecture de la fréquence, atténuateur, onde-mètre). Alimenter la diode avec le boîtier Oritel.

On choisit l'onde en entrée sur le vernier 1, on a une abaque de correspondance entre fréquence et position du vernier. Avec le second vernier (antenne), on lit la fréquence en observant une chute assez brutale de l'amplitude.

Pour mesurer la longueur d'onde, on déplace le banc mobile sur son axe et on observe en mode Roll l'amplitude de la tension. Il faut mettre l'antenne le plus haut possible (de manière à détecter quand même quelque chose, mais sans perturber l'onde).

On place en sortie du banc hyperfréquence un pavillon et on place le détecteur. On place une lame de verre verticale fixe, et une seconde reliée à un moteur. On met en route le moteur et on fait une acquisition de une minute aux bornes du détecteur. On en déduit la longueur d'onde et ainsi la célérité de la lumière.

### 3 Propagation guidée

#### 3.1 Banc hyperfréquence

- En plaçant l'antenne au seuil de détection, en mode Roll, on visualise maxima et minima. Relation de dispersion.

#### 3.2 Câble coaxial

- Déformation d'un pulse : marque de la dispersion. Conséquences.

MANIPULATIONS : À basse fréquence, il est difficile de séparer les deux Burst, on commence l'étude par un sinus en entrée, on mesure la tension à l'autre extrémité avec adaptation d'impédance.

À haute fréquence, des réflexions viennent perturber la mesure malgré l'adaptation d'impédance. Faire la mesure avec un Burst. Seul problème : on est assez limité en fréquence et l'atténuation est encore assez faible.

### 4 Impédance caractéristique et réflexion

- Adaptation d'impédance avec diapason.

#### 4.1 Câble coaxial : mesure directe

- Mesure avec un potentiomètre en sortie, et un burst. Comparaison avec une mesure à l'ohmmètre.

MANIPULATIONS : Avec le GBF, générer un Burst à haute fréquence (autour du MHz) et l'envoyer sur le câble coaxial avec une impédance infinie (ou presque) au bout. Observer à l'oscilloscope le retour d'une onde. Calculer le retard.

Avec le même Burst, placer un potentiomètre de  $100 \Omega$ . Essayer d'atténuer le plus possible le signal réfléchi. Mesurer la résistance correspondante : c'est l'impédance caractéristique du câble.

#### 4.2 Banc hyperfréquence, mesure via le rapport d'ondes stationnaire

- Mesure du rapport d'onde stationnaire avec l'antenne pour différentes ouvertures : abrupte, pavillon, fermée.

MANIPULATIONS : On constate qualitativement que le détecteur reçoit plus d'énergie avec le pavillon que sans, et qu'il n'en reçoit pas avec la plaque.

On accède à une valeur quantitative avec le rapport d'onde stationnaire, en mesurant le rapport entre l'intensité maximale et l'intensité minimale au multimètre.

#### 4.3 Diagramme de rayonnement

- À réaliser avec un fil et un rapporteur. Directivité de l'onde pour le pavillon et l'ouverture abrupte. Intérêt du pavillon.

MANIPULATIONS : On compare la directivité de l'onde pour deux ouvertures différentes : ouverture abrupte et pavillon. Les amplitudes sont normalisées, on repère l'angle en attachant à une ficelle le détecteur, permettant de faire tourner à une distance fixe le récepteur de l'émetteur.

### Conclusion

- Importance des conditions aux limites, de l'impédance.
- Ouverture sur la fibre optique avec tube de guidage.

# Acoustique

OBJECTIF – Illustrer l'aspect ondulatoire des ondes acoustiques, et la dépendance au milieu de propagation.

## Bibliographie

- [1] R. Duffait. *Expériences de physique au CAPES de sciences physiques*. Bréal, 2011.
- [2] L. Landau and E. Lifschitz. *Physique théorique tome 7 : Élasticité*. Éditions de Moscou, 1967.
- [3] L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 1 : Mécanique*. Pierron, 1992.
- [4] R. Taillet, L. Villain, and P. Fevre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

## Introduction

- Définition d'une onde acoustique. Besoin d'un milieu matériel.

## 1 Caractère ondulatoire des ondes acoustiques

### 1.1 Vitesse de propagation dans l'air

- Émetteur et récepteur ultrasonore séparés de  $d$ . Faire une droite.
- Valeur de  $c_s$ . Incertitude et comparaison avec la valeur tabulée.

MANIPULATIONS : Alimenter l'émetteur par un GBF produisant un signal sinusoïdal. Aligner sommairement émetteur et récepteur. Chercher la fréquence de l'onde (typiquement 40 kHz) et l'orientation émetteur/récepteur maximisant l'amplitude du signal reçu. Envoyer un Burst. Pour différentes distances, mesurer le temps de vol.

### 1.2 Interférences

- Expérience du trombone de Koenig. Retrouver la célérité du son dans l'air.

MANIPULATIONS : Placer un cornet d'un côté du trombone, y fixer avec du scotch un haut-parleur. Placer le micro au milieu du tube à l'autre extrémité. Régler le GBF à une fréquence entre 1 et 3 kHz, à une tension autour de 2V.

Repérer, en bougeant la coulisse, les minima et maxima d'intensité au niveau du micro, sur l'oscilloscope. Repérer l'écart entre deux minima (plus précis que les maxima). En déduire la longueur d'onde des ondes acoustiques, puis la célérité du son après mesure de la fréquence par un fréquencemètre.

### 1.3 Battements acoustiques

- Intérêt de la caisse de résonance du diapason.
- Transformée de Fourier du diapason initial et de la somme : fréquence du diapason désaccordé.

MANIPULATIONS : On place le micro entre le diapason à 440 Hz et le diapason désaccordé. Plus la masse est haute, plus le décalage en fréquence est faible.

### 1.4 Effet Doppler

- Manipulation de l'hétérodynage. Droite avec plusieurs vitesses de la table tracante.

**MANIPULATIONS :** Placer l'émetteur sur la table traçante et resserrer correctement tout. Mettre l'émetteur parallèle à sa direction de déplacement. Mettre le récepteur bleu en face et au même niveau (récepteur air). Alimenter l'émetteur avec une tension 10 V et chercher la fréquence maximisant la réception. Mettre les tensions d'entrée et de sortie sur un multiplieur et filtrer avec le boîtier filtre de type Butterworth d'ordre 4 (si pas disponible, câbler un filtre actif) : observer le signal résultant sur l'oscilloscope en mode Roll pour différentes vitesse de la table traçante.

## 2 Dépendance de la vitesse du son en fonction de la température

- Expérience du tube de Kundt, à mesurer proprement. Bien discuter les incertitudes et les hypothèses du modèle.

**MANIPULATIONS :** Préférer les thermostats les plus récents (type expérience SF<sub>6</sub>). On peut régler la température de consigne, le débit de la pompe (2 ou 3 typiquement), l'actionnement du réfrigérateur et d'autres paramètres dans le menu. Faire les mesures en augmentant la température, le refroidissement prenant plus de temps. Bien attendre la thermalisation à chaque fois (autour de 10 minutes). Mettre la tige du micro le plus loin pendant le chauffage pour la thermaliser également.

Fixer le GBF à une fréquence voisine de 2 kHz. Chercher alors la fréquence de résonance (mode XY, méthode de Lissajous). La recherche de la résonance permet d'avoir des zéros donc de repérer plus précisément les nœuds.

Repérer le maximum le plus proche du haut-parleur, faire un trait sur la tige au feutre, passer deux ou trois minimas, faire un second trait. Mesurer la longueur. Effacer les traits à l'éthanol, remettre la tige dans le tube. Préférer mesurer la température dans le tube, plutôt que celle affichée par le chauffage.

Répéter tous les 5 à 10 °C. Attention, mettre le micro le plus au milieu du tube.

## 3 Vitesse du son dans le Dural

- Mesurer en préparation la vitesse du son dans l'eau.
- On y ajoute le bloc de Dural. Mesure de la célérité dans le Dural . Module d'Young. Ondes de cisaillement et coefficient de Poisson.

**MANIPULATIONS :** Entre deux transducteurs immergés dans l'eau, on fait se propager un signal ultrasonore. Commencer par relier l'eau à la masse, pour éviter la propagation de signaux électromagnétiques d'un transducteur à l'autre.

Les deux transducteurs sont espacés d'une distance  $d$ , le bloc de Dural étant mis de côté. On mesure le temps de vol des ondes acoustiques en utilisant un Burst de 400 kHz, écartés de 1 ms, pour différentes valeur de  $d$  : on en déduit la vitesse de propagation dans l'eau.

Pour la mesure dans le Dural, on fait la mesure du temps de vol pour un certain  $d$ , on intercale le bloc de Dural, le temps de vol diminue. En déduire la célérité du son dans le dural (mesure de l'épaisseur au pied à coulisse).

## 4 Impédance acoustique

- Expérience avec le diapason (air, eau, table et caisse de résonance) à discuter.
- Expérience avec cloche à vide et sonomètre. Coefficients de réflexion et de transmission en énergie (ordres de grandeur avec la mesure). ODG de l'impédance mécanique du verre.

**MANIPULATIONS :** On montre la possibilité d'adaptation d'impédance en enlevant le diapason de son support, en le posant sur la table, en le mettant dans un bûcher d'eau lui-même sur la caisse de résonance : conclure sur la qualité de l'adaptation d'impédance comparée.

On allume le buzzer et on mesure une première intensité acoustique. On place une plaque de verre, on mesure une seconde : on en déduit l'impédance du verre. Sous cloche, on mesure la décroissance de l'intensité quand on fait le vide : interprétation.

## Conclusion

- Résumé précis de ce qui a été dit.
- Applications médicale : échographie (gel d'échographie pour l'impédance).

# Résonance

OBJECTIF – Illustrer expérimentalement les caractéristiques du phénomène de résonance, en particulier le facteur de qualité et les pulsations propres.

## Bibliographie

- [1] D. Dangoisse, D. Hennequin, and V. Zehnlé. *Les lasers*. Dunod, 2004.
- [2] R. Duffait. étude expérimentale des oscillateurs mécaniques. *BUP*, 867, 2004.
- [3] S. Houard. *Optique*. De Boeck, 2011.
- [4] M. Krob. *Électronique expérimentale*. Ellipses, 2002.
- [5] L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 1 : Mécanique*. Pierron, 1992.
- [6] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

## Introduction

- Concept assez familier, définition de la résonance (transfert maximal de la source au système en fonction de la fréquence).
- Système masse-ressort excité à la main.

## 1 Résonance électrique : le circuit RLC série

- Présentation et description.

### 1.1 Résonance en intensité

- Réponse indicielle aux bornes de la résistance. Diagramme de Bode de gain et de phase. Commentaires. Facteur de qualité pour différentes résistances.

### 1.2 Résonance en tension

- Expression de la tension aux bornes du condensateur. N'existe pas toujours. Résonance en tension en fonction de  $R$ .

## 2 Degrés de liberté et résonance

### 2.1 Oscillateurs mécaniques couplés

- Dispositif à quatre pendules. Fixer le troisième. Analyse des oscillations avec VideoCom et transformée de Fourier. Exciter les fréquences propres avec le moteur.
- Extension à trois et quatre pendules.

MANIPULATIONS : Enlever un des ressorts et l'étalonner avec des masses croissantes.

Monter la caméra VideoCom sur trépied, utiliser préférentiellement la connexion USB (meilleure fréquence d'échantillonnage). Suivre les instructions du manuel pour l'installation. Placer la caméra de façon à détecter les quatres mobiles tout le temps. Pour améliorer la détection, on peut jouer sur le zoom et le diaphragme également.

Avec un système de statif, on immobilise un pendule et on observe les fréquences d'oscillation en faisant la TF à partir d'une excitation quelconque. Exciter les fréquences propres avec le moteur pas à pas (alimenté avec un GBF de commande ( $V_{pp} = 12V$ )).

## 2.2 Corde de Melde

- Présentation du dispositif. Fréquence de résonance en fonction du nombre de nœuds. Infinité de modes.
- Remonter à la vitesse et comparer avec la mesure de  $c$  issu des mesures de  $\mu$  et  $T_0$  directe.

**MANIPULATIONS :** Relier le GBF en entrée INPUT de l'amplificateur de courant et connecter la sortie avec le câble spécial au vibreur. Pour mettre en route l'ampli, mettre un petit gain et appuyer sur RESET.

Fixer une extrémité de la corde au vibreur et l'autre extrémité à une masse, assez élevée pour lester significativement, pas trop pour avoir des oscillations visibles (typiquement 200 g). Régler le niveau de la corde.

Alimenter l'ampli avec un signal de basse fréquence (d'amplitude  $\approx 3V$ ), et augmenter progressivement la fréquence. Observer l'établissement de la résonance et relever les fréquences correspondantes.

Peser précisément la corde, mesurer précisément sa longueur et peser la masse.

## 3 Résonance de forte acuité

### 3.1 Cristal de quartz

- Utilisation du boîtier quartz. Calcul de la fréquence propre et du facteur de qualité.
- Bouclage et fréquence des oscillations.

### 3.2 Cavité laser

- Analyse d'un laser He-Ne avec cavité confocale Melles-Griot. Commenter les différents pics et leur origine.
- Caculer la finesse.
- Analogie avec corde de Melde.

**MANIPULATIONS :** Brancher l'amplificateur Melles-Griot à l'oscilloscope et à la cavité confocale en suivant les schémas de la notice. L'alignement du laser est assez délicat : pour ce faire, régler la cavité confocale de niveau avec un niveau à bulle, et le laser en alignant un écran. Régler ensuite la hauteur du laser avec un bon calibre (gros calibre temporel, GHz) et guetter l'apparition des pics. On peut observer la puissance en activant le mode persistant, le décalage des pics est de moins en moins rapide au fur et à mesure du chauffage. Interpréter le signal obtenu en s'aidant de la notice.

## Conclusion

- Résonance : parfois recherchée, parfois évitée. Fréquence propre, facteur de qualité.
- Principe de l'amortisseur : on évite la résonance.

## Couplage des oscillateurs

OBJECTIF – Comprendre les caractéristiques essentielles des oscillateurs couplés : modes propres, efficacité du couplage.

### Bibliographie

- [1] J. M. Donnini and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 4 : Électricité et applications*. Pierron, 2004.
- [2] R. Duffait. étude expérimentale des oscillateurs mécaniques. *BUP*, 867, 2004.
- [3] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Ondes PC-PSI*. Hachette, 2000.
- [4] J. P. Pérez. *Mécanique, fondements et applications*. Dunod, 2001.

### Introduction

- Propriétés différentes des oscillateurs couplés : échange d'énergie entre les oscillateurs.

## 1 Du pendule libre aux pendules couplés

### 1.1 Étude du pendule libre

- Pendule simple : équilibrage, linéarité du pendule. Faire le zéro.
- Pulsation propre du pendule par transformée de Fourier.

MANIPULATIONS : Vérifier la linéarité et étalonner le capteur d'angle (après avoir alimenté le boîtier de conditionnement) avec un multimètre. Régler les zéros des capteurs sur l'oscilloscope en mode Roll en mettant le gain au maximum. Enlever le couplage (clé à mandrin) et équilibrer les pendules (grossièrement, l'axe n'étant pas centré, on ne peut pas avoir l'équilibre pour tout angle). Ajouter une tige à distance connue et mesurée. Ajouter un poids de chaque côté. Mesurer la fréquence des deux pendules seuls (mesure en mode Roll ou TF après acquisition sur LatisPro).

### 1.2 Constante de couplage

- Réalisation du couplage et blocage d'un des pendules. Mesure de la période et calcul de la constante de couplage.

MANIPULATIONS : Coupler ensuite les deux pendules et maintenir un fixe. Calculer la fréquence d'oscillation du second.

### 1.3 Modes propre et aspect énergétique

- On lance un des pendules et on visualise des battements dont on fait l'acquisition. Deux fréquences : symétrique et antisymétrique.
- Échange d'énergie entre les deux pendules. Conservation de l'énergie des modes. Énergie de couplage. Visualisation expérimentale des deux modes.

MANIPULATIONS : Visualiser ensuite le mode symétrique, le mode antisymétrique et des battements. Faire une longue acquisition de la tension pour avoir quelques dizaines de battements. En déduire les valeurs d'angle, d'énergie potentielle et cinétique (dérivée temporelle numérique), d'énergie mécanique et d'énergie de couplage.

### 1.4 Efficacité du couplage

- Bouger ou enlever une des masses. On n'a pas transfert total d'énergie et battements parfaits.

**MANIPULATIONS :** Constaté l'efficacité du couplage en déplaçant une des masses par rapport à son axe. On n'observe jamais l'annulation de l'amplitude des oscillations.

## 2 Couplage par inductance mutuelle

### 2.1 Accord des oscillateurs

- Mesure des fréquences propres des oscillations et accord des oscillateurs grâce à une capacité variable.

**MANIPULATIONS :** On étudie les deux circuits séparément en éloignant au maximum les bobines de Helmholtz. On ajuste les capacités pour avoir deux fréquences de résonance très proches. On contrôle toujours l'intensité circulant dans le circuit. Pour exciter les deux circuits, on utilise un ampli HSA4011 commandé par un GBF. On utilise des rhéostats de  $3\Omega$  pour ne pas atténuer trop vite les battements.

### 2.2 Couplage inductif

- Mesure du coefficient d'inductance mutuelle.  $M = f(d)$ . Essayer l'évolution en  $1/r^3$ .

**MANIPULATIONS :** On rapproche ensuite les deux bobines et on détermine les fréquences de résonance du circuit. Pour différents  $d$ , on mesure le coefficient d'induction mutuelle entre les deux bobines.

### 2.3 Dépendance des modes propres

- Excitation par un créneau basse-fréquence du premier circuit et battements dans le second. Inductance mutuelle critique. Diagramme de bifurcation.

**MANIPULATIONS :** On peut enfin exciter le circuit avec un self de 44 mH alimenté à la fréquence de résonance. On voit les modes symétriques, antisymétriques et les désaccords de phases entre les tensions aux bornes des rhéostats.

## 3 Couplage de quatre oscillateurs

### 3.1 Oscillations libres

- Observer les oscillations libres avec VideoCom. Obtenir les quatre fréquences propres. Prédominance du mode le plus bas.
- Relation de dispersion pour 2, 3 et 4 oscillateurs.

**MANIPULATIONS :** Enlever un des ressorts et l'étalonner avec des masses croissantes.

Monter la caméra VideoCom sur trépied, utiliser préférentiellement la connexion USB (meilleure fréquence d'échantillonnage). Suivre les instructions du manuel pour l'installation. Placer la caméra de façon à détecter les quatres mobiles tout le temps. Pour améliorer la détection, on peut jouer sur le zoom et le diaphragme également.

Avec un système de statif, on immobilise un pendule et on observe les fréquences d'oscillation en faisant la TF à partir d'une excitation quelconque. En faisant la TF au début et à la fin de l'acquisition, on observe un transfert d'énergie non-linéaire vers les modes à basse fréquence.

### 3.2 Régime forcé

- Observations des quatres fréquences de résonance avec le moteur. Observer si les modes sont symétriques ou antisymétriques.

**MANIPULATIONS :** Avec le moteur pas-à-pas alimenté avec un GBF de commande ( $V_{pp} = 12V$ ) on excite les pendules : on observe successivement chacun des modes dont la fréquence a été mesurée plus haut.

## Conclusion

- Résumé précis des manipulations.
- Ouverture avec chaîne de soliton ou le couplage non-linéaire avec l'accordement des métronomes.

## Régimes transitoires

OBJECTIF – Comprendre comment le régime transitoire permet de connaître des propriétés du système étudié.

### Bibliographie

- [1] D. Calecki, B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, and B. Roulet. *Exercices et problèmes de thermodynamique*. Hermann, 2010.
- [2] J. M. Donnini and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 2 : Thermodynamique et applications*. Pierron, 1997.
- [3] R. Duffait. *Expériences d'électronique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 2010.
- [4] M. Krob. *Électronique expérimentale*. Ellipses, 2002.
- [5] J. Pérez, É. Bellanger, X. Ducros, V. Renvoizé, and P. Roux. *Physique MPSI-PCSI-PTSI*. Cap prépa – Pearson, 2009.

### Introduction

- Définition du régime transitoire. Intervient après perturbation brutale du système : relaxation vers l'équilibre.

## 1 Circuit RLC série

### 1.1 Différents types de régimes transitoires

- Montrer sur le circuit RLC série le régime pseudo-périodique, critique et apériodique. Pseudo-période en fonction de la résistance et résistance critique. Comparaison aux valeurs attendues et incertitudes.

### 1.2 Réponse indicielle

- Difficile de produire un Dirac : on produit un échelon.
- Diagrammes de Bode en gain et en phase : caractéristique complète du SLIT.

## 2 Diffusion du glycérol dans l'eau

- Détail du principe avec déformation de la gaussienne au fur et à mesure sur l'écran.
- Mesure du maximum de la gaussienne. Coefficient de diffusion du glycérol dans l'eau. Incertitudes.

MANIPULATIONS : Constituer une interface eau/glycérol propre est assez délicat : une première technique consiste à mettre de l'eau dans une cuve préalablement nettoyée et ajouter avec une seringue du glycérol au fond dans provoquer de remous. Une seconde consiste à placer le glycérol au fond et à faire ruisseler l'eau sur les bords d'un côté et à faire les mesures de l'autre côté de la cuve, là où l'interface a peu été perturbée. Laisser décanter quelques instants et lancer le chronomètre.

Éclairer par un faisceau oblique (en utilisant une lentille cylindrique) : on repère pour différents instants le minimum de déviation par rapport au rayon non dévié.

## 3 Asservissement en position : contrôle du régime transitoire

### 3.1 Principe

- Contrôle de la position angulaire de la machine à courant continu.

**MANIPULATIONS :** Câbler proprement tous les éléments de l'alimentation du moteur à courant continu. En lieu et place de l'AO n°3, on utilise l'amplificateur de puissance HSA4011. Pour récupérer la position, on alimente en +15V/-15V le potentiomètre et on a accès à la position au milieu (pont diviseur de tension).

Si il y a instabilité, contrôler le signe de l'alimentation du potentiomètre, ou le branchement des potentiomètres et de l'amplificateur inverseur (problème de signe, instabilité des solutions de l'équa-diff).

Contrôler le fonctionnement de l'asservissement en mettant une tension continue. Alimenter en créneau pour la consigne et constater les quelques oscillations avant alignement sur la tension de consigne.

Mesurer la résistance  $R_m$  de l'induit avec un ohmmètre. Utiliser un montage 4-fils si nécessaire. Mesurer l'inductance avec un RLC-mètre réglé à basse fréquence.

### 3.2 Fonction de transfert

- Diagramme de Bode en boucle fermée pour une valeur de  $m$  donnée. Justification de l'ordre 2.

**MANIPULATIONS :** Pour tracer le diagramme de Bode, on étudie le module de la transmittance en fonction de la fréquence de l'excitation sinusoïdale à gain total fixé et en boucle fermée.

### 3.3 Qualité de l'asservissement

- Quantification de la qualité de l'asservissement au vu des propriétés du régime transitoire : dépassement, temps de montée, temps de réponse à 5 %, à relier aux propriétés du circuit.

**MANIPULATIONS :** Importance du gain et compétition entre rapidité et oscillations pour converger sur la valeur de consigne.

En consigne créneau, on mesure sur l'oscilloscope le dépassement maximal au dessus de la consigne, la pseudo-période des oscillations, le temps de montée et le temps de réponse à 5 %.

### 3.4 Correcteur par avance de phase

- On place un condensateur. Dépassement moins fort donc amélioration de l'asservissement par contrôle du régime transitoire.

**MANIPULATIONS :** Rajouter le condensateur à l'amplificateur (attention, erreur dans [3] sur la valeur du condensateur  $C_2$ ).

## Conclusion

- Importance du régime transitoire dans la caractérisation des SLIT.
- Utilisation pour détecteur d'enveloppe par exemple.
- Expérience de l'amortisseur avec système masse/ressort dans un mélange eau/glycérol.

# Phénomènes de transport

OBJECTIF – Illustrer plusieurs phénomènes de transport.

## Bibliographie

- [1] D. Calecki, B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, and B. Roulet. *Exercices et problèmes de thermodynamique*. Hermann, 2010.
- [2] J. M. Donnini and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 2 : Thermodynamique et applications*. Pierron, 1997.
- [3] F. Durand. Etude d'une lampe à incandescence. *BUP*, 827, 2000.
- [4] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.

## Introduction

- Transport : transport d'une quantité physique d'un endroit à un autre.

### 1 Convection

- Manipulation qualitative avec tube et sciure de bois.

### 2 Diffusion du glycérol

- Manipulation avec diffusion du glycérol et nappe laser.

MANIPULATIONS : Constituer une interface eau/glycérol propre est assez délicat : une première technique consiste à mettre de l'eau dans une cuve préalablement nettoyée et ajouter avec une seringue du glycérol au fond dans provoquer de remous. Une seconde consiste à placer le glycérol au fond et à faire ruisseler l'eau sur les bords d'un côté et à faire les mesures de l'autre côté de la cuve, là où l'interface a peu été perturbée. Laisser décanter quelques instants et lancer le chronomètre.

Éclairer par un faisceau oblique (en utilisant une lentille cylindrique) : on repère pour différents instants le minimum de déviation par rapport au rayon non dévié.

### 3 Diffusion thermique

- Manipulation avec effet de peau (excitation sinusoïdale et module Peltier). Déphasage entre les sinusoïdes, épaisseur de peau.
- Diffusivité thermique.

MANIPULATIONS : On alimente les deux ventilateurs avec 12 V en parallèle. On alimente les capteurs avec une tension +15 V. On alimente le module Peltier avec un amplificateur de puissance Kepco piloté par un GBF Agilent : entrée sur Input, sortie entre Common et Output. Contrôler à un Hz que l'on ne débite pas une intensité trop importante. Abaisser la fréquence autour de 4 à 10 mHz (pour avoir un signal sur le dernier capteur, mais pas de réflexion en bout).

Acquérir la température pendant quelques périodes : on obtient une série de sinusoïdes d'amplitudes et de moyennes décroissantes, déphasées les unes par rapport aux autres. Obtenir par un fit sinusoïdal la valeur (relative) du déphasage. Représenter cette valeur en fonction de la position du capteur : on obtient l'épaisseur de peau.

### 4 Diffusion de quantité de mouvement

- Expérience du viscosimètre à bille.

- Vitesse limite de chute pour différents diamètres. Hypothèses à vérifier et conclusion.

**MANIPULATIONS :** Remplir le tube de fluide et le fermer avec un bouchon troué au centre. Laisser le fluide au repos de manière à éliminer les bulles d'air. Graduer le tube.

Mesurer au palmer le diamètre des billes. Mesurer le temps de chute une fois le régime permanent établi (assez bas). Attendre que le fluide revienne au repos avant de renouveler l'expérience avec une bille différente.

## 5 Rayonnement thermique et loi de Stefan

- Expérience de la petite lampe à incandescence.

**MANIPULATIONS :** On utilise une petite lampe car les effets convectifs ne sont plus négligeables dans une grande. Mesurer d'abord la résistance du fil de tungstène à l'ohmmètre. Pour différentes valeurs de tensions délivrées par un module Hameg, mesurer la tension à ses bornes et l'intensité dans le circuit. Interpréter les mesures en s'aidant de [3].

## Conclusion

- Résumé précis des manipulations, généralités sur les phénomènes de transport.
- Effet Seebeck, conductivité électrique.

# Moteurs

OBJECTIF – Montrer le principe et étudier les conversions thermique/mécanique et électromécanique.

## Bibliographie

- [1] P. Brenders, L. Douchet, and M. Sauzeix. *Électrotechnique et conversion de puissance PSI*. Les nouveaux précis Bréal, 2004.
- [2] J. M. Donnini and L. Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome 4 : Électricité et applications*. Pierron, 2004.
- [3] Brébec J. M. et. al. *H-prépa, Électronique II PSI*. Hachette, 1997.
- [4] H. Gié and S. Olivier. *Thermodynamique*. Tec&Doc, 1998.
- [5] R. Taillet, L. Villain, and P. Febvre. *Dictionnaire de physique*. De Boeck, 2013.
- [6] C. H. Vigouroux. Actualisation des connaissances sur les moteurs électriques. *BUP*, 846, 2002.

## Introduction

- Définition d'un moteur. Distinguer trois types de moteurs.
- Deux étudiés ici. Caractéristiques d'un moteur.

## 1 Un moteur thermique : le moteur de Stirling

### 1.1 Principe du moteur de Stirling

- Principe théorique du moteur de Stirling : un modèle expérimental.
- Lancement du moteur de Stirling.

MANIPULATIONS : Environ 10 minutes avant de lancer le moteur, on allume la flamme. On place un béccher de mélange eau/glace sur le radiateur.

Brancher le capteur en +9V continu, et le capteur de volume avec l'alimentation prévue. Observer sur l'oscilloscope les variations de tension quand on fait tourner la roue. Initialiser le capteur (mettre le piston le plus bas possible, et appuyer sur le bouton rouge). Mettre en route le moteur sans revenir en arrière.

### 1.2 Diagramme (P,V)

- Observation et acquisition de la pression et du volume. Tracé du cycle.
- Tracé du cycle sur Regressi et calcul du travail et de la puissance.

MANIPULATIONS : On observe sur l'oscilloscope les variations de pression et de volume. On se place en XY pour observer le cycle. Faire l'acquisition de P et V, obtenir la période du cycle puis, sans oublier de convertir les tensions en unités de pression et de volume, calculer l'aire du cycle (fonction aire de Regressi par exemple). En déduire la puissance du moteur.

### 1.3 Puissance fournie à une charge

- Courroie et génératrice : on fournit de l'énergie à une résistance. Courbe  $P = f(C)$  et  $C = f(\omega)$ .
- Intérêts et inconvénients des moteurs thermiques.

MANIPULATIONS : Relier avec la courroie le moteur de Stirling à la génératrice prévue à cet effet. Connecter une résistance (boîtes à décades) aux bornes de la génératrice. On constate le ralentissement du moteur quand la résistance baisse. Avec un multimètre, relever la tension aux bornes de la résistance et la période du cycle pour différentes valeurs de résistance.

## 2 Moteur électrique

### 2.1 Principe de la conversion électromécanique

- Rails de Laplace : force de Laplace.
- Rendement théorique maximal égal à 1. Types de moteurs.

MANIPULATIONS : Prendre une alimentation peu sensible aux courts-circuits (ou utiliser éventuellement un rhéostat). S'assurer en polissant les rails de Laplace du bon contact (on peut également les humidifier un peu) entre les rails et le barreau. Placer l'aimant en U dans les rails de Laplace. Faire débiter le générateur et augmenter doucement la tension : le barreau avance. Avec un microvoltmètre, il est également possible de montrer la production d'énergie électrique.

### 2.2 Machine à courant continu

- Principe. Équation de fonctionnement.
- Étude électrique :  $U = k\phi\omega + rI$  et  $k\phi = f(U_r)$ .
- Étude mécanique :  $\Gamma = k\phi I - C_r$ . Même coefficient  $k\phi$ .
- Rendement et méthode des pertes séparées.
- Avantages et inconvénients de la MCC. Applications.

MANIPULATIONS : On alimente avec un premier générateur l'inducteur (bobinage du stator) à 110V. Au bornes de l'induit (bobinage du rotor), on alimente avec un second générateur de puissance placé en série avec un rhéostat de démarrage. Ce rhéostat a pour but d'éviter les surintensités au démarrage (ici il est plus pour un aspect pédagogique, mais est souvent utilisé sur les applications de forte puissance). Une fois le moteur lancé, on court-circuite le rhéostat de démarrage.

Sans charge sur la génératrice, on mesure  $U$ ,  $I$  et  $\omega$  : on en déduit le coefficient  $k\phi$  que l'on détermine ensuite pour d'autres valeurs de  $U_e$  : on obtient une droite  $k\phi = f(U_e)$ .

On fait ensuite une étude mécanique en charge. On fixe  $U$  et  $U_e$  aux valeurs nominales et on mesure, pour différentes résistances (rhéostats) aux bornes de la génératrice, le couple et la vitesse angulaire, ainsi que les intensités rotorique  $I$  et statorique  $I_e$ .

On obtient ainsi les deux relations de la MCC, on fait ensuite un bilan énergétique à partir des données acquises.

### 2.3 Machines à courant alternatif

- Moteur synchrone : principe avec trois bobines. Avantages et inconvénients. Applications.
- Moteur asynchrone : principe expérimental avec cage à écureuil. Avantages et inconvénients. Applications industrielles.

MANIPULATIONS : On branche en triangle les trois bobines sur l'onduleur ACVAR5 branché sur le réseau monophasé. Les bobines doivent comporter un grand nombre de spire, et supporter de hauts courants. Mettre des ferromagnétiques feuilletés (bleus) dans les entrefers. Placer une aiguille : elle reste en rotation si on la lance. Remplacer l'aiguille par la cage d'écureuil et rapprocher les ferromagnétiques le plus possible de la cage d'écureuil : elle se met en mouvement à une fréquence inférieure à celle du secteur.

## Conclusion

- Résumé précis des expériences.
- Contraintes pour le choix d'un moteur.
- Ouvrir sur le caractère réversible et le fonctionnement en génératrice.

NOTES : Montage présenté par mon binôme pendant l'année, bien accueilli.