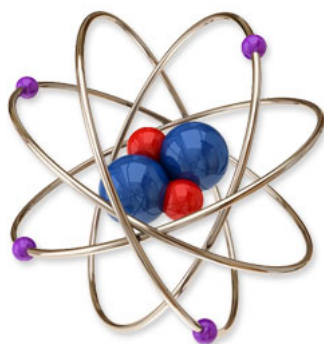


# Agrégation de physique option physique 2013

## Plans des leçons et montages

\*\*\*



\*\*\*

Ecole Normale Supérieure de Lyon  
Promotion 2010

**David CHATEAU**

**11 juillet 2013**

## Table des matières

Préambule . . . . .	33
Leçons de physique . . . . .	38
LP01 - Contact entre deux solides. Frottement de glissement. Applications au glissement et au roulement. . . . .	38
1 - Contact entre deux solides . . . . .	38
1.1 - Modélisation du contact . . . . .	38
1.2 - Liaisons . . . . .	38
1.3 - Lois du frottement . . . . .	38
1.4 - Interprétation microscopique . . . . .	38
1.5 - Aspect énergétique . . . . .	38
2 - Glissement . . . . .	39
2.1 Arc-boutement . . . . .	39
2.2 Hystérésis . . . . .	39
3 - Roulement . . . . .	39
3.1 Condition de roulement sans glissement . . . . .	39
3.2 Effet rétro . . . . .	39

LP02 - Caractère non galiléen du référentiel terrestre. Conséquences. . . . .	40
1 - Référentiels . . . . .	40
1.1 - Héliocentrique (Copernic) . . . . .	40
1.2 - Géocentrique . . . . .	40
1.3 - Terrestre . . . . .	40
1.4 - Approximation galiléenne . . . . .	40
2 - Effets liés à la rotation propre . . . . .	40
2.1 - Ecriture du PFD . . . . .	40
2.2 - Définition du poids . . . . .	40
2.3 - Déviation vers l'Est . . . . .	41
2.4 - Tourbillons fluides . . . . .	41
3 - Effets liés à la translation . . . . .	41
3.1 - Terme de gravitation différentielle . . . . .	41
3.2 - Marées . . . . .	41
LP03 - Mouvement d'un solide autour d'un axe fixe. Équilibrage statique et dynamique. Exemples. . .	42
1 - Mouvement d'un solide autour d'un axe fixe . . . . .	42
1.1 - Présentation du système . . . . .	42
1.2 - Equations du mouvement . . . . .	42
1.3 - Modélisation des efforts de liaisons . . . . .	42
1.4 - Exemple : volant d'inertie, KERS . . . . .	42
2 - Equilibrage statique . . . . .	42
2.1 - But et intérêt . . . . .	42
2.2 - Réalisation . . . . .	43
2.3 - Exemples . . . . .	43
3 - Equilibrage dynamique . . . . .	43
3.1 - Insuffisance de l'équilibrage statique . . . . .	43
3.2 - Réalisation théorique . . . . .	43
3.3 - Réalisation pratique . . . . .	43
3.4 - Exemple roue de voiture . . . . .	43
3.5 - Equilibrage industriel . . . . .	43
LP04 - Approximation gyroscopique. Effets dans les domaines macroscopique et microscopique. . .	44
1 - Mouvement d'une toupie . . . . .	44
1.1 - Angles d'Euler . . . . .	44
1.2 - Symétrie de révolution . . . . .	44
1.3 - Equations d'Euler du mouvement . . . . .	44
1.4 - Approximation gyroscopique . . . . .	44
2 - Gyroscope équilibré . . . . .	44
2.1 - Direction fixe . . . . .	44
2.2 - Couple gyroscopique . . . . .	45
2.3 - Applications . . . . .	45
3 - Gyroscope non équilibré . . . . .	45
3.1 - Mouvement de précession . . . . .	45
3.2 - Effet paradoxal . . . . .	45
3.3 - Précession des équinoxes . . . . .	45
4 - Domaine microscopique . . . . .	45
4.1 - Précession d'un moment magnétique . . . . .	45
4.2 - Application à la RMN . . . . .	45
LP05 - Exemples d'utilisation des lois de conservation en dynamique des systèmes. . . . .	46
1 - Grandes lois de conservation . . . . .	46
1.1 - Conservation de la quantité de mouvement . . . . .	46
1.2 - Conservation du moment cinétique . . . . .	46
1.3 - Conservation de l'énergie . . . . .	46
2 - Problème de Képler . . . . .	47
2.1 - Position du problème . . . . .	47

2.2 - Conservation du moment cinétique . . . . .	47
2.3 - Conservation de l'énergie . . . . .	47
<b>3 - Collisions . . . . .</b>	<b>47</b>
3.1 - Position du problème . . . . .	47
3.2 - Conservations . . . . .	47
3.3 - Hypothèse de la collision élastique . . . . .	47
3.4 - Limites . . . . .	47
3.5 - Refroidissement laser . . . . .	47
<b>LP06 - Principes de la cinématique relativiste. Conséquences. . . . .</b>	<b>48</b>
<b>1 Insuffisance de la théorie classique . . . . .</b>	<b>48</b>
1.1 - Transformation de Galilée . . . . .	48
1.2 - Incompatibilité avec l'électromagnétisme . . . . .	48
1.3 - Expérience de Michelson-Morley (1887) . . . . .	48
<b>2 - Bases de la relativité restreinte . . . . .</b>	<b>48</b>
2.1 - Postulats . . . . .	48
2.2 - Transformation de Lorentz . . . . .	48
2.3 - Composition des vitesses . . . . .	49
2.4 - Expérience de Fizeau (1851) . . . . .	49
<b>3 - Conséquences de la cinématique relativiste . . . . .</b>	<b>49</b>
3.1 - Perte de la simultanéité . . . . .	49
3.2 - Dilatation du temps . . . . .	49
3.3 - Contraction des longueurs . . . . .	49
3.4 - Invariance de l'intervalle . . . . .	49
<b>LP07 - Dynamique relativiste. Exemples. . . . .</b>	<b>50</b>
<b>1 - Principes de la dynamique relativiste . . . . .</b>	<b>50</b>
1.1 - Quadri-vecteur énergie-impulsion . . . . .	50
1.2 - Principe fondamental de la dynamique . . . . .	50
1.3 - Lois de conservation . . . . .	50
<b>2 - Collisions . . . . .</b>	<b>51</b>
2.1 - Collision élastique : effet Compton . . . . .	51
2.2 - Collision inélastique : énergie de seuil d'une création d'une paire électron/positron . . . . .	51
<b>3 - Mouvement des particules chargées . . . . .</b>	<b>51</b>
3.1 - Particule dans un champ électrique . . . . .	51
3.2 - Particule dans un champ magnétique . . . . .	51
3.3 - Application aux accélérateurs . . . . .	51
<b>LP08 - Notion de viscosité d'un fluide. Écoulements visqueux. Nombre de Reynolds. Exemples simples. 52</b>	<b>52</b>
<b>1 - Notion de viscosité . . . . .</b>	<b>52</b>
1.1 - Force de viscosité . . . . .	52
1.2 - Modélisation microscopique . . . . .	52
1.3 Facteurs de dépendance . . . . .	52
<b>2 - Dynamique des écoulements visqueux . . . . .</b>	<b>52</b>
2.1 - Résultante volumique des forces de viscosité . . . . .	52
2.2 - Équation de Navier-Stokes . . . . .	53
2.3 - Nombre de Reynolds . . . . .	53
<b>3 - Exemples d'écoulements visqueux . . . . .</b>	<b>53</b>
3.1 - Ecoulement de Couette plan . . . . .	53
3.2 - Ecoulement de Poiseuille cylindrique . . . . .	53
<b>4 - Couche limite . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>LP09 - Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide ; validité. Relation de Bernoulli ; limites et applica- 54</b>	<b>54</b>
<b>tions. . . . .</b>	<b>54</b>
<b>1 - L'écoulement parfait d'un fluide . . . . .</b>	<b>54</b>
1.1 - L'équation de Navier-Stokes adimensionnée . . . . .	54
1.2 - La différence entre fluide parfait et écoulement parfait . . . . .	54

1.3 - La notion de couche limite . . . . .	54
2 - Les relations de Bernouilli : limites et applications . . . . .	55
2.1 - Le théorème de Bernouilli . . . . .	55
2.2 - Effet Venturi . . . . .	55
2.3 - Considérations d'un autre ordre . . . . .	55
2.4 - Effet Magnus . . . . .	55
<b>LP10 - Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides : applications.</b> . . . . .	<b>56</b>
1 - Statique des interfaces . . . . .	56
1.1 - Approche microscopique de la tension superficielle . . . . .	56
1.2 - Tension superficielle : une énergie superficielle et une force capillaire . . . . .	56
1.3 - Application : loi de Laplace et de Jurin . . . . .	56
2 - Dynamique des interfaces . . . . .	56
2.1 - Approximation de lubrification . . . . .	57
2.2 - Instabilité de Rayleigh-Taylor . . . . .	57
2.3 - Ondes de surface . . . . .	57
3 - Mouillage . . . . .	57
3.1 - Notion de mouillage . . . . .	57
3.2 - Cas des surfaces texturées . . . . .	57
<b>LP11 - Gaz parfait, gaz réels.</b> . . . . .	<b>58</b>
1 - Résultats expérimentaux et modélisation . . . . .	58
1.1 - Comportement macroscopique des gaz . . . . .	58
1.2. Modèle du gaz parfait . . . . .	58
2 - Étude en théorie cinétique . . . . .	58
2.1 - Hypothèses . . . . .	58
2.2 - Loi de distribution des vitesses . . . . .	58
2.3 - Pression cinétique . . . . .	58
2.4 - Température cinétique . . . . .	59
3 - Énergie interne . . . . .	59
3.1 - Gaz parfait monoatomique . . . . .	59
3.2 - Théorème d'équipartition de l'énergie . . . . .	59
3.3 - Gaz parfait polyatomique . . . . .	59
4 - Limites du modèle . . . . .	59
4.1 - Limite en densité . . . . .	59
4.2 - Effets quantiques . . . . .	59
4.3 - Gaz de Van der Waals . . . . .	59
4.4 - Développement du Viriel . . . . .	59
<b>LP12 - Fonctions d'état caractéristiques d'un système à l'équilibre thermodynamique. Identités thermodynamiques. Applications.</b> . . . . .	<b>60</b>
1 - Fonction d'état caractéristique et identité thermodynamique . . . . .	60
1.1 - La première identité thermodynamique . . . . .	60
1.2 - Les fonctions d'état caractéristiques . . . . .	60
2 - Une fonction d'état caractéristique pour chaque jeu de variables . . . . .	60
2.1 - Changer de fonction : transformation de Legendre . . . . .	60
2.2 - Les nouvelles fonctions d'état et les identités thermodynamiques associées . . . . .	60
3 - Relations de Maxwell et applications . . . . .	61
3.1 - Relations de Maxwell . . . . .	61
3.2 - Réponse thermique d'un fil . . . . .	61
3.3 - Désaimantation adiabatique . . . . .	61
<b>LP13 - Évolution et condition d'équilibre d'un système thermodynamique fermé. Potentiels thermodynamiques. Exemples.</b> . . . . .	<b>62</b>
1 - Notion de potentiel thermodynamique . . . . .	62
1.1. - Variable interne et paramètre de contrôle . . . . .	62
1.2 - Cas d'un système isolé . . . . .	62

1.3 - Choix du potentiel . . . . .	62
2 - Système au contact d'un thermostat . . . . .	62
2.1 - Construction du potentiel thermodynamique adéquat . . . . .	62
2.2 - Recherche de l'état d'équilibre . . . . .	63
2.3 - Travail maximum récupérable . . . . .	63
2.4 - Condition de stabilité . . . . .	63
3 - Système au contact d'un thermostat et d'une source de pression . . . . .	63
3.1 - Potentiel thermodynamique adéquat . . . . .	63
3.2 - Application à la loi de Laplace . . . . .	63
3.3 - Application à la métastabilité . . . . .	63
<b>LP14 - Thermodynamique des phénomènes irréversibles. . . . .</b>	<b>64</b>
1 - Causes d'irréversibilité et approche limite de la réversibilité . . . . .	64
1.1 - Thermalisation . . . . .	64
1.2 - La détente de Joule Gay-Lussac . . . . .	64
1.3 - Les autres causes d'irréversibilité . . . . .	64
2 - La diffusion et la création d'entropie . . . . .	64
2.1 - Taux de création d'entropie en diffusion thermique . . . . .	64
2.2 - Généralisation . . . . .	64
2.3 - Postulat d'Onsager . . . . .	65
2.4 - Signes des coefficients cinétiques . . . . .	65
3 - Couplages thermo-électriques . . . . .	65
3.1 - Effet Seebeck ; application aux thermocouples . . . . .	65
3.2 - Effet Peltier . . . . .	65
<b>LP15 - Application des deux premiers principes de la thermodynamique au fonctionnement des machines thermiques. . . . .</b>	<b>66</b>
1 - Machines thermiques, généralités . . . . .	66
1.1 - Définitions . . . . .	66
1.2 - Machines monothermes . . . . .	66
1.3 - Machines dithermes et second principe . . . . .	66
1.4 - Rendement, efficacité, puissance . . . . .	66
1.5 - Cycle de Carnot . . . . .	67
2 - Exemple d'une machine frigorifique . . . . .	67
2.1 - Présentation . . . . .	67
2.2 - Construction du cycle . . . . .	67
2.3 - Bilan énergétique . . . . .	67
2.4 - Autres machines . . . . .	67
<b>LP16 - Étude thermodynamique d'un système constitué par un corps pur sous plusieurs phases. Exemples. . . . .</b>	<b>68</b>
1 - Etude générale d'un corps pur sous deux phases . . . . .	68
1.1 - Choix du potentiel thermodynamique . . . . .	68
1.2 - Condition d'équilibre et d'évolution . . . . .	68
1.3 - Enthalpie de changement d'état . . . . .	68
2 - Diagrammes de phases . . . . .	69
2.1 - Le diagramme (P,T) . . . . .	69
2.2 - Le diagramme (P,V) . . . . .	69
3 - Retard au changement d'état . . . . .	69
3.1 - Description du phénomène . . . . .	69
3.2 - Modèle, interprétations . . . . .	69
<b>LP17 - Notion d'état microscopique. Interprétation statistique de l'entropie. Exemples. . . . .</b>	<b>70</b>
1 - Micro-état, macro-état . . . . .	70
1.1 - Définitions . . . . .	70
1.2 - Premier postulat : équiprobabilité . . . . .	70
1.3 - Second postulat : hypothèse ergodique . . . . .	70

1.4 - Limite thermodynamique . . . . .	70
2 - Définition statistique de l'entropie . . . . .	71
2.1 - Entropie statistique . . . . .	71
2.2 - Détente de Joule . . . . .	71
2.3 - Cas du gaz parfait . . . . .	71
2.4 - Cas du cristal paramagnétique parfait - Système à deux états . . . . .	71
LP18 - Étude statistique d'un système en contact avec un thermostat. Probabilité canonique. Applications. . . . .	72
1 - Ensemble canonique . . . . .	72
1.1 - Présentation . . . . .	72
1.2 - Du microcanonique au canonique . . . . .	72
1.3 - Fonction de partition Z . . . . .	72
1.4 - Energie interne . . . . .	72
1.5 - Energie libre . . . . .	72
1.6 - Système à deux état . . . . .	73
2 - Calcul de la fonction de partition Z et applications . . . . .	73
2.1 - Factorisation de Z . . . . .	73
2.2 - N Oscillateurs harmoniques . . . . .	73
2.3 - Théorème d'équipartition de l'énergie . . . . .	73
3 - Gaz parfait monoatomique . . . . .	73
3.1 - Approximation continue . . . . .	73
3.2 - Longueur d'onde thermique de De Broglie . . . . .	73
3.3 - Propriétés thermodynamiques . . . . .	73
4 - Gaz parfait diatomique . . . . .	73
4.1 - Terme de vibration . . . . .	73
4.2 - Terme de rotation . . . . .	73
LP19 - Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir. Application(s). . . . .	74
1 - Bilans radiatifs . . . . .	74
1.1 - Interaction matière-rayonnement . . . . .	74
1.2 - Equilibre radiatif et thermodynamique . . . . .	74
2 - Rayonnement d'équilibre thermique . . . . .	74
2.1 - Loi de Planck . . . . .	74
2.2 - Loi du déplacement de Wien . . . . .	74
2.3 - Loi de Stefan . . . . .	75
3 - Modèle du corps noir . . . . .	75
3.1 - Définition . . . . .	75
3.2 - Rayonnement du corps noir . . . . .	75
3.3 - Application en métrologie . . . . .	75
3.4 - Effet de serre . . . . .	75
LP20 - Exemple de phénomène de transport. Illustration(s). . . . .	76
1 - Les phénomènes de transport . . . . .	76
1.1 - Différents phénomènes de transport . . . . .	76
1.2 - Equilibre thermodynamique local . . . . .	76
1.3 - Grandeurs conservées . . . . .	76
2 - Diffusion . . . . .	76
2.1 - Loi phénoménologique . . . . .	76
2.2 - Equation de diffusion . . . . .	76
2.3 - Lien avec la marche au hasard . . . . .	77
2.4 - Irréversibilité (retour) . . . . .	77
3 - Applications . . . . .	77
3.1 - Dimensionnement d'un chauffage . . . . .	77
3.2 - Sensation de chaud . . . . .	77
3.3 - Lac gelé . . . . .	77

LP21 - Flux conductifs, convectifs, radiatifs. Exemples de bilan thermique en régime stationnaire. . . . .	78
1 - Diffusion thermique . . . . .	78
1.1 - Loi de Fourier . . . . .	78
1.2 - Equation de la chaleur . . . . .	78
1.3 - Temps caractéristique de diffusion thermique . . . . .	78
1.4 - Dimensionnement d'un chauffage . . . . .	78
2 - Convection . . . . .	78
2.1 - Mise en évidence . . . . .	78
2.2 - Transport conducto-convectif . . . . .	78
3 - Rayonnement thermique . . . . .	79
3.1 - Modèle du corps noir . . . . .	79
3.2 - Les lois du rayonnement thermique . . . . .	79
3.3 - Rayonnement solaire et effet de serre . . . . .	79
LP22 - Conversion de puissance électromécanique. Exemples et applications. . . . .	80
1 - Principe de la conversion de puissance électromécanique . . . . .	80
1.1 - Rails de Laplace en fonctionnement générateur . . . . .	80
1.2 - Réversibilité de la conversion : fonctionnement moteur . . . . .	80
2 - Machine à courant continu . . . . .	80
2.1 - Structure et principe . . . . .	81
2.2 - Equations de fonctionnement . . . . .	81
2.3 - Etude du moteur à excitation indépendante . . . . .	81
3 - Machines à champs tournants . . . . .	81
3.1 - Production d'un champ magnétique tournant . . . . .	81
3.2 - Machine synchrone . . . . .	81
3.3 - Machine asynchrone . . . . .	81
LP23 - Induction électromagnétique. Applications. . . . .	82
1 - Phénomène d'induction . . . . .	82
1.1 - Mise en évidence expérimentale . . . . .	82
1.2 - Cas de Neumann . . . . .	82
1.3 - Cas de Lorentz . . . . .	82
1.4 - Cas général . . . . .	82
2 - Production de courants induits . . . . .	83
2.1 - Le transformateur . . . . .	83
2.2 - Freinage par courants de Foucault . . . . .	83
2.3 - Chauffage par induction . . . . .	83
3 - Conversion électro-mécanique : Haut parleur . . . . .	83
3.1 - Étude expérimentale . . . . .	83
3.2 - Mise en équation . . . . .	83
LP24 - Résonance magnétique. Exemples et applications. . . . .	84
1 - Description théorique . . . . .	84
1.1 - Dipôle magnétique dans un champ B permanent. . . . .	84
1.2 - Loi d'évolution du moment magnétique. . . . .	84
1.3 - Phénomènes de relaxations. . . . .	84
1.4 - Couplage entre dipôles. . . . .	85
2 - Applications . . . . .	85
2.1 - Appareillage. . . . .	85
2.2 - Mesure. . . . .	85
2.3 - Spectroscopie. . . . .	85
2.4 - IRM : Imagerie par Résonance Magnétique. . . . .	85
LP25 - Rétroaction et oscillations. Exemples en physique. . . . .	86
1 - Oscillateurs quasi-sinusoïdaux . . . . .	86
1.1 - Rappels . . . . .	86
1.2 - Oscillateur de Wien . . . . .	86

1.3 - Laser . . . . .	86
1.3 - Boucle à verrouillage de phase . . . . .	87
2 - Oscillations à relaxation . . . . .	87
2.1 - Vase de tentale . . . . .	87
2.2 - Corde de violon . . . . .	87
LP26 - Traitement analogique d'un signal électrique. Étude spectrale. Exemples et applications. . . . .	88
1 - Analyse fréquentielle d'un signal électrique . . . . .	88
1.1 - Signal périodique . . . . .	88
1.2 - Généralisation à un signal quelconque . . . . .	88
2 - Filtrage linéaire . . . . .	88
2.1 - Système linéaire invariant par translation temporelle . . . . .	88
2.2 - Représentation temporelle et spectrale . . . . .	89
2.3 - Diagramme de Bode . . . . .	89
2.4 - Différents types de filtres . . . . .	89
3 - Opération non linéaire . . . . .	89
3.1 - modulation d'amplitude, principe et intérêt . . . . .	89
3.2 - Spectre du signal modulé . . . . .	89
3.3 - Démodulation par détection synchrone . . . . .	89
3.4 - Démodulation par détecteur de crête . . . . .	89
LP27 - Exemples de phénomènes de propagation unidimensionnels. Ondes progressives, ondes stationnaires. Aspects énergétiques. . . . .	90
1 - Différents modèles, une unique équation . . . . .	90
1.1 - Corde de Melde . . . . .	90
1.2 - Câble coaxial . . . . .	90
1.3 - Autres systèmes . . . . .	90
2 - Résolution de l'équation de d'Alembert . . . . .	90
2.1 - Solution générale . . . . .	91
2.2 - Notion d'impédance . . . . .	91
2.3 - Onde progressive périodique harmonique . . . . .	91
2.4 - Ondes stationnaires . . . . .	91
2.5 - Conditions aux limites . . . . .	91
3 - Aspect énergétique . . . . .	91
3.1 - Cas des ondes stationnaires . . . . .	91
3.2 - Vitesse de propagation de l'énergie . . . . .	91
LP28 - Ondes acoustiques dans les fluides. . . . .	92
1 - Modèle et mise en équation . . . . .	92
1.1 - Caractère ondulatoire . . . . .	92
1.2 - Approximation acoustique . . . . .	92
1.3 - Modèle du fluide isentropique . . . . .	92
1.4 - Équation d'onde . . . . .	92
2 - Solutions de l'équation . . . . .	92
2.1 - Solutions particulières : OPPH . . . . .	92
2.2 - Impédance . . . . .	92
2.3 - Ondes stationnaires . . . . .	93
2.4 - Bilan énergétique . . . . .	93
2.5 - Intensité sonore . . . . .	93
3 - Réflexion et transmission à l'interface entre deux milieux . . . . .	93
3.1 - Relations de continuité . . . . .	93
3.2 - Coefficients de réflexion et de transmission . . . . .	93
3.3 - Adaptation d'impédance . . . . .	93
LP29 - Propagation dans un milieu dispersif : vitesse de phase, vitesse de groupe. Paquets d'ondes planes et évolution. Exemples. . . . .	94
1 - Chaîne d'oscillateurs couplés . . . . .	94



1.1 - Modélisation . . . . .	94
1.2 - Interprétation . . . . .	94
1.3 - Vitesses . . . . .	94
2 - Paquet d'onde . . . . .	95
2.1 - Réalité du paquet d'onde . . . . .	95
2.2 - Faible dispersion . . . . .	95
2.3 - Forte dispersion . . . . .	95
3 - Ondes EM dans les plasmas . . . . .	95
3.1 - Modélisation . . . . .	95
3.2 - Vitesses . . . . .	95
3.3 - Positionnement GPS . . . . .	95
<b>LP30 - Propagation guidée. Exemples et applications.</b> . . . . .	<b>96</b>
1 - Onde guidée entre deux plaques . . . . .	96
1.1 - Mise en équations . . . . .	96
1.2 - Mode TEM . . . . .	96
1.3 - Mode TE . . . . .	96
1.4 - Onde dans un guide d'onde rectangulaire . . . . .	96
2 - Câble coaxial . . . . .	97
2.1 - Présentation . . . . .	97
2.2 - Propagation . . . . .	97
2.3 - Adaptation d'impédance . . . . .	97
2.4 - Pertes dans un câble . . . . .	97
3 - Fibre optique . . . . .	97
3.1 - Présentation . . . . .	97
3.2 - Fibres optiques à saut d'indice . . . . .	97
3.3 - Fibres optiques à gradient d'indice . . . . .	97
3.4 - Utilisations . . . . .	97
<b>LP31 - Dispersion et absorption d'une onde électromagnétique plane dans un milieu diélectrique.</b>	
<b>Modélisation microscopique.</b> . . . . .	<b>98</b>
1 - Généralités sur les milieux diélectriques . . . . .	98
1.1 - Définitions . . . . .	98
1.2 - Equations de Maxwell dans un diélectrique parfait . . . . .	98
1.3 - Susceptibilité électrique dans le cas d'un DLHI . . . . .	98
2 - Modélisation microscopique . . . . .	98
2.1 - Polarisation électronique, modèle de l'électron élastiquement lié . . . . .	98
2.2 - Polarisation ionique . . . . .	99
2.3 - Polarisation d'orientation . . . . .	99
2.4 - Bilan . . . . .	99
3 - Equation de propagation et relation de dispersion . . . . .	99
3.1 - Relation de dispersion . . . . .	99
3.2 - Indice complexe . . . . .	99
4 - Applications . . . . .	99
4.1 - Dispersion dans un prisme, loi de Cauchy . . . . .	99
4.2 - Four à micro-ondes . . . . .	99
4.3 - Spectroscopie d'absorption infrarouge . . . . .	99
<b>LP32 - Effet de peau. Comportement d'une onde électromagnétique à la surface d'un conducteur.</b> . . . . .	<b>100</b>
1 - Modélisation d'un conducteur . . . . .	100
1.1 - Modèle de Drude . . . . .	100
1.2 - Loi d'Ohm locale en régime sinusoïdal . . . . .	100
1.3 - Puissance transmise au conducteur . . . . .	100
1.4 - Electroneutralité . . . . .	100
2 - Effet de peau . . . . .	100
2.1 - Equation de propagation . . . . .	100
2.2 - Epaisseur de peau . . . . .	101

2.3 - Applications . . . . .	101
2.4 - Cas limite du conducteur parfait . . . . .	101
3 - Réflexion et transmission à la surface d'un conducteur . . . . .	101
3.1 - Coefficients de Fresnel . . . . .	101
3.2 - Comportement à haute fréquence . . . . .	101
3.3 - Ionosphère . . . . .	101
LP33 - Propriétés et applications du rayonnement dipolaire électrique. . . . .	102
1 - Position du problème et approximations . . . . .	102
2 - Champs rayonnés . . . . .	102
2.1 - Calcul des champs . . . . .	102
2.2 - Zone de rayonnement . . . . .	102
2.3 - Structure des champs . . . . .	102
2.4 - Aspects énergétiques . . . . .	102
3 - Diffusion par des dipôles élémentaires . . . . .	103
3.1 - Modélisation . . . . .	103
3.2 - Puissance rayonnée . . . . .	103
3.3 - Polarisation par diffusion . . . . .	103
4 - Rayonnement d'antennes . . . . .	103
4.1 - Champs rayonnés par une antenne de petite taille . . . . .	103
4.2 - Rayonnement à grande distance d'une antenne réelle . . . . .	103
LP34 - Présentation de l'optique géométrique à l'aide du principe de Fermat. Exemples. . . . .	104
1 - Principe de Fermat . . . . .	104
1.1 - Rayon lumineux et chemin optique . . . . .	104
1.2 - Enoncé du principe . . . . .	104
1.3 - Analogie cinématique . . . . .	104
2 - Lois de l'optique géométrique . . . . .	104
2.1 - Principe de retour inverse . . . . .	104
2.2 - Propagation rectiligne dans un milieu homogène . . . . .	104
2.3 - Loi de Malus . . . . .	105
2.4 - Lois de Snell-Descartes . . . . .	105
3 - Applications . . . . .	105
3.1 - Equation des rayons lumineux . . . . .	105
3.2 - Trajectoire de la lumière dans un milieu à gradient d'indice . . . . .	105
3.3 - Mirages . . . . .	105
3.4 - Fibres optiques . . . . .	105
LP35 - Applications des lois de l'optique à l'étude d'un instrument d'optique au choix. . . . .	106
1 - Présentation du dispositif et du cahier des charges . . . . .	106
1.1 - Cahier des charges . . . . .	106
1.2 - Objet et Oeil . . . . .	106
1.3 - Construction de la lunette astronomique . . . . .	106
1.4 - Grossissement . . . . .	106
2 - Collecte de la lumière par le système . . . . .	106
2.1 - Diaphragme d'ouverture . . . . .	106
2.2 - Cercle oculaire . . . . .	106
2.3 - Grossissement équipupillaire . . . . .	106
2.4 - Clarté . . . . .	107
3 - Champ . . . . .	107
3.1 - Diaphragme de champ et vignetage . . . . .	107
3.2 - Champ objet et champ image . . . . .	107
4 - Résolution . . . . .	107
4.1 - Abbérations . . . . .	107
4.2 - Diffraction . . . . .	107
LP36 - Obtention d'interférences à deux ondes en optique. Notion de cohérence. . . . .	108

1 - L'expériences des trous d'Young . . . . .	108
1.1 - L'expérience historique . . . . .	108
1.2 - Interférences à deux ondes, modèle scalaire . . . . .	108
1.3 - Analyse de l'expérience d'Young dans le cadre du modèle scalaire . . . . .	109
2 - Notion de cohérence de la source . . . . .	109
2.1 - Influence de la non-monochromaticité et étude des sources, cohérence temporelle . . . . .	109
2.2 - Influence de la largeur de la source, cohérence spatiale . . . . .	109
LP37 - Interféromètres à division d'amplitude. Applications. . . . .	112
1 - Théorème de localisation . . . . .	112
1.1 - Extension de la source . . . . .	112
1.2 - Condition de non brouillage et localisation . . . . .	112
2 - Interféromètre de Michelson . . . . .	112
2.1 - Principe . . . . .	112
2.2 - lame d'air . . . . .	113
2.3 - Coin d'air . . . . .	113
3 - Interféromètre de Fabry-Pérot . . . . .	113
3.1 - Description . . . . .	113
3.2 - Figure d'interférences . . . . .	113
3.3 - Application au filtre interférentiel . . . . .	113
LP38 - Diffraction de Fraunhofer. Applications. . . . .	114
1 - Diffraction de Fraunhofer . . . . .	114
1.1 - Principe d'Huygens-Fresnel . . . . .	114
1.2 - Approximation de Fraunhofer . . . . .	114
1.3 - Utilité des lentilles minces . . . . .	114
1.4 - Cas d'une fente rectangulaire . . . . .	115
1.5 - Propriétés de la figure de diffraction . . . . .	115
2 - Applications . . . . .	115
2.1 - Résolution . . . . .	115
2.2 - Filtrage . . . . .	115
LP39 - Diffraction par des structures périodiques dans différents domaines de la physique. . . . .	116
1 - Réseau plan en optique . . . . .	116
1.1 - Position du problème . . . . .	116
1.2 - Calcul de l'intensité diffractée . . . . .	116
1.3 - Utilisation d'un réseau en spectrométrie . . . . .	117
2 - Échographie . . . . .	117
2.1 - Principe de l'échographie . . . . .	117
2.2 - Intérêt d'utiliser plusieurs transducteurs . . . . .	117
2.3 - Balayage par déphasage . . . . .	117
3 - Étude de cristaux par diffraction . . . . .	117
3.1 - Position du problème . . . . .	117
3.2 - Position des maximums de diffraction : approche de von Laue . . . . .	117
LP40 - Absorption, émission spontanée ou induite du rayonnement. Caractéristiques et applications. . . . .	118
1 - Interaction matière-rayonnement . . . . .	118
1.1 - Modélisation du milieu matériel . . . . .	118
1.2 - Emission spontanée . . . . .	118
1.3 - Absorption . . . . .	118
1.4 - Emission stimulée ou induite . . . . .	118
1.5 - Relation entre les coefficients d'Einstein . . . . .	118
1.6 - Importance relative des processus . . . . .	118
2 - Application aux lasers . . . . .	119
2.1 - Caractéristiques et principe du laser . . . . .	119
2.2 - Laser à trois niveaux . . . . .	119
2.3 - Rôle de la cavité résonante . . . . .	119

3 - Refroidissement d'atomes par laser . . . . .	119
4 - Fluorescence . . . . .	119
<b>LP41 - Aspects corpusculaires du rayonnement. Notion de photon. . . . .</b>	<b>120</b>
1 - Mise en évidence du caractère corpusculaire du rayonnement . . . . .	120
1.1 - La rayonnement du corps noir . . . . .	120
1.2 - L'effet photoélectrique . . . . .	120
2 - Caractéristiques du photon . . . . .	120
2.1 - Quantité de mouvement . . . . .	120
2.2 - Moment cinétique . . . . .	121
2.3 - Masse du photon . . . . .	121
3 - Expériences . . . . .	121
3.1 - Effet Compton . . . . .	121
3.2 - Refroidissement d'atomes . . . . .	121
3.3 - Expérience de Beth . . . . .	121
<b>LP42 - Aspects ondulatoires de la matière. Notion de fonction d'onde. . . . .</b>	<b>122</b>
1 - Nature ondulatoire de la lumière . . . . .	122
1.1 - Les ondes de De Broglie . . . . .	122
1.2 - L'expérience de Davisson et Germer . . . . .	122
2 - Description quantique de la matière . . . . .	122
2.1 - Fentes d'Young et quantiques . . . . .	122
2.2 - Description probabiliste : notion de fonction d'onde . . . . .	122
3 - Dynamique de la fonction d'onde . . . . .	122
3.1 - Equation de Schrödinger . . . . .	122
3.2 - Paquet d'onde . . . . .	123
3.3 - Inégalités d'Heisenberg . . . . .	123
3.4 - Stabilité de la matière . . . . .	123
<b>LP43 - Exemples de phénomènes quantiques. . . . .</b>	<b>124</b>
1 - Corpuscules de lumières . . . . .	124
1.1 - Principe et mise en évidence . . . . .	124
1.2 - Insuffisance de la théorie classique . . . . .	124
1.3 - L'approche d'Einstein . . . . .	124
2 - Ondes de matière . . . . .	124
2.1 - Position du problème et mise en évidence expérimentale . . . . .	124
2.2 - Mise en défaut de la théorie classique . . . . .	125
2.3 - Approche quantique . . . . .	125
3 - Notion de Spin . . . . .	125
3.1 - Principe de l'expérience de Stern et Gerlack, approche classique . . . . .	125
3.2 - Résultats expérimentaux et interprétation . . . . .	125
3.3 - La mesure en mécanique quantique . . . . .	125
3.4 - Cryptographie et ordinateur quantique . . . . .	125
<b>LP44 - Confinement de l'électron et quantification de l'énergie. Exemples. . . . .</b>	<b>126</b>
1 - Les prémices de la quantification . . . . .	126
1.1 - Niveaux d'énergie en mécanique classique, modèle classique de l'atome . . . . .	126
1.2 - L'atome de Bohr . . . . .	126
2 - Confinement et quantification, lien avec la physique ondulatoire . . . . .	126
2.1 - Particule dans un puits de potentiel carré . . . . .	126
2.2 - Puits de potentiel infini et corde vibrante . . . . .	127
3 - Applications . . . . .	127
3.1 - L'atome d'hydrogène . . . . .	127
3.2 - Les ions colorés . . . . .	127
<b>LP45 - Effet tunnel. Applications. . . . .</b>	<b>128</b>
1 - L'effet tunnel . . . . .	128

1.1 - Barrière de potentiel . . . . .	128
1.2 - Probabilité de transmission . . . . .	128
2 - Microscope à effet tunnel . . . . .	128
3 - Théorie de Gamov de la radioactivité alpha . . . . .	128
3.1 - Hypothèses du modèle . . . . .	128
3.2 - Estimation du temps de vie . . . . .	129
4 - Molécule d'ammoniac . . . . .	129
4.1 - Modélisation de la molécule . . . . .	129
4.2 - Fonctions d'onde . . . . .	129
4.3 - Battements quantiques . . . . .	129
Conclusion . . . . .	129
<b>LP46 - Le noyau : stabilité, énergie. Applications.</b> . . . . .	<b>130</b>
1 - Structure et propriétés du noyau . . . . .	130
1.1 - Le modèle de Rutherford . . . . .	130
1.2 - Structure et constituants du noyau . . . . .	130
1.3 - Nature des interactions . . . . .	130
2 - Energie et stabilité du noyau . . . . .	130
2.1 - Abondance et stabilité relative des noyaux . . . . .	130
2.3 - Le modèle de la goutte liquide . . . . .	131
2.4 - Modèle en couche . . . . .	131
3 - Applications . . . . .	131
3.1 - Datation . . . . .	131
3.2 - Fission et énergie nucléaire . . . . .	131
<b>LP47 - Oscillateurs à deux degrés de liberté en mécanique classique : modes propres. Systèmes à deux niveaux d'énergie en physique quantique. Analogies et différences.</b> . . . . .	<b>132</b>
1 - Exemple classique : Pendules couplés par élasticité . . . . .	132
2 - Exemple quantique : Molécule d'ammoniac . . . . .	132
3 - Analogies et différences . . . . .	133
<b>LP48 - La molécule : stabilité, énergie. Applications.</b> . . . . .	<b>134</b>
1 - De l'atome d'hydrogène à l'ion moléculaire . . . . .	134
1.1 - Formalisme et approximations . . . . .	134
1.2 - Résolution dans le cadre de la méthode LCAO . . . . .	134
1.3 - Etats liants et antiliants, stabilité . . . . .	134
2 - Généralisation . . . . .	134
2.1 - Edifices polyélectroniques, approximation orbitale . . . . .	134
2.2 - Edifices polyatomiques, théorie de Hückel simple . . . . .	135
3 - Applications . . . . .	135
3.1 - Les ions colorés . . . . .	135
3.2 - Spectroscopie d'absorption . . . . .	135
<b>LP49 - Chaîne unidimensionnelle infinie d'oscillateurs harmoniques. Approximation des milieux continus.</b> . . . . .	<b>136</b>
1 - Chaîne unidimensionnelle infinie d'oscillateurs harmoniques . . . . .	136
1.1 - Mise en équation . . . . .	136
1.2 - Résolution . . . . .	136
2 - Approche discrète au solide cristallin . . . . .	137
2.1 - Modélisation du solide cristallin réel . . . . .	137
2.2 - Conséquences énergétiques et thermodynamique . . . . .	137
2.3 - Conséquences thermodynamiques . . . . .	137
3 - Du discret au continu . . . . .	137
3.1 - Démarche et mise en équation . . . . .	137
3.2 - Conséquences mécaniques . . . . .	137
<b>LP50 - Capacités thermiques : description, interprétations microscopiques.</b> . . . . .	<b>138</b>

1 - Première approche : définitions et modèle simplifié . . . . .	138
1.1 - Définitions . . . . .	138
1.2 - Théorème d'équipartition de l'énergie . . . . .	138
1.3 - Modèle simplifié : système à deux niveaux d'énergie . . . . .	138
2 - Capacité thermique des gaz . . . . .	138
2.1 - Gaz parfait monoatomique . . . . .	138
2.2 - Gaz parfait polyatomique . . . . .	138
2.3 - Comparaison avec l'expérience . . . . .	139
3 - Capacité thermique des solides . . . . .	139
3.1 - Constat expérimental de Dulong et Petit (1819) . . . . .	139
3.2 - Le modèle d'Einstein (1907) . . . . .	139
3.3 - Le modèle de Debye (1912) . . . . .	139
LP51 - Paramagnétisme, ferromagnétisme : approximation du champ moyen. . . . .	140
1 - Origine du magnétisme d'un corps . . . . .	140
1.1 - Le moment magnétique atomique . . . . .	140
1.2 - Origine du diamagnétisme . . . . .	140
1.3 - Origine du paramagnétisme . . . . .	140
1.4 - Origine du ferromagnétisme . . . . .	140
2 - Paramagnétisme de Curie . . . . .	141
2.1 - Loi de Curie . . . . .	141
2.2 - Application : refroidissement par désaimantation adiabatique . . . . .	141
3 - Ferromagnétisme . . . . .	141
3.1 - Calcul de l'aimantation spontanée dans l'approximation du champ moyen . . . . .	141
3.2 - Transition ferromagnétique/paramagnétique . . . . .	141
LP52 - Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques. Applications. . . . .	142
1 - Caractérisation du ferromagnétisme . . . . .	142
1.1 - Équations de Maxwell dans un milieu magnétique . . . . .	142
1.2 - Relation constitutive . . . . .	142
1.3 - Réductance magnétique . . . . .	142
2 - Aimantation d'un corps ferromagnétique . . . . .	142
2.1 - Dispositif expérimental . . . . .	142
2.2 - Cycle d'hystérésis . . . . .	142
2.3 - Interprétation microscopique . . . . .	143
2.4 - Étude énergétique . . . . .	143
3 - Applications . . . . .	143
3.1 - Transformateur parfait . . . . .	143
3.2 - Disque dur . . . . .	143
3.3 - Paléomagnétisme . . . . .	143
LP53 - Mécanismes de la conduction électrique. Loi d'Ohm. Effet Hall. Applications. . . . .	144
1 - Modèle de Drude de la conduction dans les métaux . . . . .	144
1.1 - Hypothèses . . . . .	144
1.2 - Calcul de la conductivité . . . . .	144
1.3 - Loi d'Ohm locale et intégrale . . . . .	144
2 - Effet Hall . . . . .	145
2.1 - Dispositif . . . . .	145
2.2 - Tension de Hall . . . . .	145
3 - Prise en compte d'effets quantiques . . . . .	145
3.1 - Limites du modèle de Drude . . . . .	145
3.2 - Bandes d'énergie dans les solides . . . . .	145
3.3 - Supraconductivité . . . . .	145
LP54 - Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique. . . . .	146
1 - Résonance à 1 degré de liberté : Circuit RLC série, Electronique . . . . .	146
1.1 - Mise en équations, impédance . . . . .	146

1.2 - Réponse en courant . . . . .	146
1.3 Aspect énergétique . . . . .	147
2 - Résonance à 2 degrés de liberté : Pendules couplés, Mécanique . . . . .	147
2.1 Description du système . . . . .	147
2.2 Résonance et modes propres . . . . .	147
2.3 - Généralisation à N oscillateurs . . . . .	147
3 - Cavité resonante : Cavité Fabry-Pérot, Optique . . . . .	147
LP55 - Exemples d'effets de non linéarité sur le comportement d'un oscillateur. . . . .	148
1 - Du linéaire au non-linéaire : Pendule pesant aux grands angles . . . . .	148
1.1 - Perte de l'isochronisme . . . . .	148
1.2 - Un outil d'étude : le portrait de phase . . . . .	148
1.3 - Enrichissement spectral et perte du principe de superposition . . . . .	148
1.4 - Double puits, bifurcation et paramètre de contrôle . . . . .	149
2 - Oscillateur de Van der Pol . . . . .	149
2.1 - Présentation . . . . .	149
2.2 - Instabilité et cycle limite . . . . .	149
2.3 - Déformation des oscillations . . . . .	149
3 - Transition vers le chaos . . . . .	149
3.1 - Expérience . . . . .	149
3.2 - Simulation numérique . . . . .	149
LP56 - Illustration de la notion de symétrie dans différents domaines de la physique. . . . .	150
1 - Symétries d'échelle et analyse dimensionnelle . . . . .	150
1.1 - Notion de dimension . . . . .	150
1.2 - Analyse dimensionnelle . . . . .	150
1.3 - Adimensionnalisation . . . . .	150
2 - Principe de Curie . . . . .	150
2.1 - Enoncé . . . . .	150
2.2 - Simplification des problèmes . . . . .	151
3 - Lois de conservation . . . . .	151
3.1 - Théorème de Noether . . . . .	151
3.2 - Application au problème de Kepler . . . . .	151
3.3 - Interactions et symétries . . . . .	151
4 - Brisure de symétrie . . . . .	151
Leçons de chimie . . . . .	152
LC01 - Solutions électrolytiques ; mise en solution d'espèces ioniques ou moléculaires. (L) . . . . .	152
1 - Mise en solution d'un solide ionique . . . . .	152
1.1 - Le solide ionique cristallin . . . . .	152
1.2 - Mise en solution . . . . .	152
1.3 - Saturation . . . . .	152
2 - Mise en solution d'espèces moléculaires . . . . .	152
2.1 - Mise en solution d'un gaz : exemple de l'ammoniac . . . . .	152
2.2 - Mise en solution d'un liquide : exemple de l'acide sulfurique . . . . .	152
3 - Principe et étapes de la dissolution . . . . .	153
3.1 - L'eau, une molécule polaire . . . . .	153
3.2 - Dissolution d'un solide ionique . . . . .	153
3.3 - Dissolution de composés moléculaires . . . . .	153
3.4 - Effets thermiques . . . . .	153
4 - Concentration d'une solution électrolytique . . . . .	153
4.1 - Concentrations . . . . .	153
4.2 - Conductimétrie . . . . .	153
4.3 - Application à l'eau de chaux . . . . .	153

LC02 - Le squelette carboné des hydrocarbures : relation structure - propriétés (nomenclature exclue). (L) . . . . .	154
1 - Structure microscopique . . . . .	154
1.1 - Représentations . . . . .	154
1.3 - Classification . . . . .	154
2 - Propriétés macroscopiques . . . . .	154
2.1 - Réactivité . . . . .	154
2.2 - Densité, solubilité . . . . .	154
2.3. Température de changement d'état . . . . .	155
2.4 - Production d'énergie par combustion . . . . .	155
2.5 - Chiralité . . . . .	155
3 - Applications industrielles . . . . .	155
3.1 - Carburants . . . . .	155
3.3 - Polymères . . . . .	155
LC03 - Molécules de la santé : acides aminés et peptides. (L) . . . . .	156
1 - Acides aminés . . . . .	156
1.1 - Présentation . . . . .	156
1.2 - Représentation de Fisher et chiralité . . . . .	156
1.3 - Electrophorèse et caractère acido-basique . . . . .	156
2 - Liaison peptidique . . . . .	156
2.1 - Définition . . . . .	156
2.2 - Polypeptides, groupe amide . . . . .	156
3 - Protéines . . . . .	157
3.1 - Définition . . . . .	157
3.2 - Structure . . . . .	157
3.4 - Synthèse . . . . .	157
LC04 - Principes et applications de la spectrophotométrie. (L) . . . . .	158
1 - Principe de la spectrophotométrie . . . . .	158
1.1 - Couleur d'une solution . . . . .	158
1.2 - Le spectrophotomètre . . . . .	158
1.3 - Absorbance . . . . .	158
1.4 - Loi de Beer-Lambert . . . . .	158
2 - Utilisations de la spectrophotométrie . . . . .	159
2.1 - Dosage par étalonnage . . . . .	159
2.2 - Mesure du pKa d'un indicateur coloré . . . . .	159
2.3 - Suivi cinétique . . . . .	159
LC05 - Équilibre chimique en solution aqueuse : cas des couples acido-basiques. (L) . . . . .	160
1 - Rappels sur les réactions acido-basiques . . . . .	160
1.1 - Définitions . . . . .	160
1.2 - Le pH et sa mesure . . . . .	160
2 - Notions d'équilibre chimique . . . . .	160
2.1 - Constatations expérimentales . . . . .	160
2.2 - Modélisation microscopique de l'équilibre chimique . . . . .	160
2.3 - Constante d'équilibre . . . . .	160
3 - Réactions acido-basiques . . . . .	161
3.1 - Constante d'acidité . . . . .	161
3.2 - Autoprérolyse de l'eau . . . . .	161
3.3 - Détermination expérimentale de la force d'un acide . . . . .	161
3.4 - Diagramme de prédominance . . . . .	161
3.5 - Sécurité . . . . .	161
LC06 - Indicateurs colorés acido-basiques : étude, choix pour un dosage acide-base. (L) . . . . .	162
1 - Notion d'indicateur coloré . . . . .	162
1.1 - Définition . . . . .	162



1.2 - Exemple : le BBT . . . . .	162
2 - Mesure du pKa d'un indicateur . . . . .	162
2.1 - Zone de virage . . . . .	162
2.2 - Étude du bleu de bromophénol . . . . .	162
3 - Suivi colorimétrique d'un titrage acido-basique . . . . .	163
3.1 - Rôle de l'indicateur . . . . .	163
3.2 - Choix de l'indicateur . . . . .	163
3.3 - Incertitudes . . . . .	163
<b>LC07 - Cinétique de réaction (catalyse exclue). (L) . . . . .</b>	<b>164</b>
1 - Réactions lentes et rapides . . . . .	164
1.1 - Réaction rapide . . . . .	164
1.2 - Réaction lente . . . . .	164
2 - Facteurs cinétiques . . . . .	164
2.1 - Concentration des réactifs . . . . .	164
2.2 - Température . . . . .	164
3 - Suivi temporel d'une réaction . . . . .	165
3.1 - Méthode chimique . . . . .	165
3.2 - Méthodes physiques . . . . .	165
3.3 - Vitesses et temps de réactions . . . . .	165
3 - Etude microscopique des facteurs cinétiques . . . . .	165
3.1 - Modèle : chocs moléculaires . . . . .	165
3.2 - Influence des différents facteurs . . . . .	165
<b>LC08 - Catalyse et catalyseurs ; applications. (L) . . . . .</b>	<b>166</b>
1 - Le phénomène de catalyse . . . . .	166
1.1 - Mise en évidence et définition . . . . .	166
1.2 - Mode d'action d'un catalyseur . . . . .	166
1.3 - Rôle purement cinétique de la catalyse . . . . .	167
1.4 - Spécificité et sélectivité de la catalyse . . . . .	167
2 - La catalyse homogène . . . . .	167
2.1 - Définition . . . . .	167
2.2 - Influence de la concentration de catalyseur . . . . .	167
2.3 - Applications . . . . .	167
3 - La catalyse hétérogène . . . . .	167
3.1 - Définition . . . . .	167
3.2 - Influence de la surface . . . . .	167
3.3 - Applications . . . . .	167
4 - La catalyse enzymatique . . . . .	168
4.1 - Mise en évidence, définition . . . . .	168
4.2 - Propriétés des catalyseurs enzymatiques . . . . .	168
4.3 - Applications . . . . .	168
<b>LC09 - Estérification et hydrolyse des esters. (L) . . . . .</b>	<b>170</b>
1 - Présentation des esters . . . . .	170
1.1 - Groupe fonctionnel et nomenclature . . . . .	170
1.2 - Caractérisation par spectroscopie . . . . .	170
1.3 - Propriétés des esters . . . . .	170
2 - Equilibre estérification/hydrolyse de l'ester . . . . .	170
2.1 - Estérification : synthèse de l'éthanoate d'éthyle . . . . .	170
2.2 - Hydrolyse de l'éthanoate d'éthyle . . . . .	171
2.3 - Bilan et mécanisme réactionnel . . . . .	171
3 - Optimisation de la réaction . . . . .	171
3.1 - Augmentation de la vitesse de réaction . . . . .	171
3.2 - Choix des réactifs . . . . .	171
3.3 - Déplacement de l'équilibre . . . . .	171

LC10 - Saponification des esters ; applications. (L) . . . . .	172
1 - Saponification des esters . . . . .	172
1.1 - Bilan de réaction . . . . .	172
1.2 - Etude expérimentale : saponification du benzoate d'éthyle . . . . .	172
1.3 - Conclusion expérimentale et comparaison à l'hydrolyse acide . . . . .	172
2 - Application à la saponification des savons : les corps gras . . . . .	172
2.1 - Fabrication des savons . . . . .	172
2.2 - Lien entre structure et propriétés d'un savon . . . . .	172
2.3 - Au delà du savon, le glycérol . . . . .	173
3 - Dosage du principe actif contenu dans l'aspirine . . . . .	173
3.1 - Principe du dosage . . . . .	173
3.2 - Réalisation expérimentale et exploitation . . . . .	173
LC11 - Synthèse et dosage d'un composé d'usage pharmaceutique. (L) . . . . .	174
1 - Historique, Mode d'action, Formulation . . . . .	174
2 - Hémisynthèse . . . . .	174
2.1 - Réaction de synthèse . . . . .	174
2.2 - Purification . . . . .	174
2.3 - Caractérisation du produit . . . . .	175
3 - Dosage . . . . .	175
LC12 - Piles : mise en jeu de transformations chimiques spontanées. (L) . . . . .	176
1 - Construction d'une pile électrochimique . . . . .	176
1.1 - Transfert direct d'électrons . . . . .	176
1.2 - Transfert indirect d'électrons : la pile . . . . .	176
1.3 - Etude expérimentale . . . . .	176
1.5 - Schéma conventionnel . . . . .	176
2 - Pile en fonctionnement . . . . .	177
2.1 - Caractéristique . . . . .	177
2.2 - Énergie stockée et durée de vie . . . . .	177
3 - Piles usuelles . . . . .	177
3.1 - Pile saline . . . . .	177
3.2 - Pile alcaline . . . . .	177
3.3 - Pile bouton . . . . .	177
3.4 - Pile au lithium . . . . .	177
3.5 - Pile à combustible . . . . .	177
LC13 - Électrolyses et accumulateurs : mise en jeu de transformations chimiques forcées. (L) . . . . .	178
1 - Electrolyse : Présentation et définition . . . . .	178
1.1 - Expériences . . . . .	178
1.2 - Interprétations . . . . .	178
Bilan : Généralisation . . . . .	178
2 - Aspects quantitatifs . . . . .	178
2.1 - Electrolyse de l'eau . . . . .	178
2.2 - Bilan électrochimique . . . . .	179
2.3 - Aspects énergétiques . . . . .	179
3 - Applications . . . . .	179
3.1 - Accumulateurs . . . . .	179
3.2 - Réductions de cations métalliques . . . . .	179
3.3 - Production de produits chimiques . . . . .	179
LC14 - Étude qualitative et quantitative des espèces acido-basiques dans les liquides alimentaires et dans les liquides ménagers. (L) . . . . .	180
1 - Liquides alimentaires . . . . .	180
1.1 - Indicateurs colorés . . . . .	180
1.2 - Vinaigre . . . . .	180
1.3 - Badoit, Soda . . . . .	180

2 - Liquides ménagers . . . . .	181
2.1 - Détartrant (Harpic 100 pourcents) . . . . .	181
2.2 - Destop . . . . .	181
LC15 - Contrôle de qualité des produits de la vie courante. (L) . . . . .	182
1 - Notion de contrôle qualité . . . . .	182
1.1 - La raison du contrôle . . . . .	182
1.2 - Les méthodes de contrôle . . . . .	182
2 - Limite des nitrates dans l'eau . . . . .	182
3 - Acide phosphorique du coca-cola . . . . .	182
4 - Ions chlore dans le sérum physiologique . . . . .	183
5 - Principe actif d'un cachet d'aspirine . . . . .	183
LC16 - Colorants et pigments : extraction, synthèse, identifications. (L) . . . . .	184
L'origine de la couleur . . . . .	184
1.1 - Couleur et absorption . . . . .	184
1.2 - Les molécules à l'origine de la couleur . . . . .	184
1.3 - Colorants et pigments . . . . .	184
2 - Étude de substances colorées . . . . .	184
2.1 - Colorants dans le sirop de menthe . . . . .	184
2.2 - Extraction et identification des colorants dans le jus de tomate . . . . .	185
3 - Utilisation des molécules colorées . . . . .	185
3.1 - Synthèse d'une teinture pour textiles . . . . .	185
3.2 - Synthèse d'un indicateur coloré . . . . .	185
LC17 - Arômes et conservateurs : extraction, synthèse, dosage. (L) . . . . .	186
1 - Conservateurs . . . . .	186
1.1 - Présentation . . . . .	186
1.2 - Synthèse de l'acide benzoïque . . . . .	186
1.3 - Dosage de l'acide ascorbique . . . . .	186
2 - Arômes . . . . .	187
2.1 - présentation . . . . .	187
2.2 - Extraction du limonène . . . . .	187
2.3 - Synthèse de l'ester de poire . . . . .	187
LC18 - Dosages directs et indirects. (L) . . . . .	188
1 - Différents types de Dosage . . . . .	188
2 - Titrage direct par IC : acidité d'un vinaigre . . . . .	188
3 - Titrage direct par conductimétrie : Soude dans le Destop . . . . .	188
4 - Titrage direct par précipitation et IC : sérum physiologique (Mohr) . . . . .	189
5 - Titrage indirect par production : Eau de Javel par iodométrie . . . . .	189
6 - Titrage indirect par différence : Principe actif d'un cachet d'aspirine par pH-métrie après hydrolyse . . . . .	189
LC19 - Étude expérimentale du caractère évolutif des propriétés physico-chimiques dans la classification périodique. (CP) . . . . .	190
1 - La classification périodique moderne . . . . .	190
1.1 - Règle de construction . . . . .	190
1.2 - Périodicité . . . . .	190
2 - Evolution des propriétés physiques . . . . .	190
2.1 - Etat physique des dihalogènes . . . . .	190
2.2 - Energie de première ionisation et affinité électronique . . . . .	190
2.3 - Electronegativité . . . . .	190
3 - Evolution des propriétés chimiques . . . . .	191
3.1 - Propriétés acido-basiques . . . . .	191
3.2 - Propriétés oxydo-réductrices . . . . .	191
LC20 - Illustrations expérimentales des relations structure - propriétés des molécules. (CP) . . . . .	192

1 - Structure électronique . . . . .	192
1.1 - Modèle de Lewis . . . . .	192
1.2 - Orbitales moléculaires . . . . .	192
2 - Structure géométrique . . . . .	192
2.1 - VSEPR . . . . .	192
2.2 - Enantiométrie . . . . .	193
2.3 - Loi de Biot . . . . .	193
3 - Interactions intra et inter-moléculaires . . . . .	193
3.1 - Liaisons H intramoléculaires . . . . .	193
3.2 - Liaisons H intermoléculaires . . . . .	193
3.4 - Spécifiques . . . . .	193
<b>LC21 - Cristaux ioniques : du modèle à la réalité. (CP) . . . . .</b>	<b>194</b>
1 - Le solide ionique . . . . .	194
1.1 - Des ions à l'état solide . . . . .	194
1.2 - La liaison et le cristal ionique . . . . .	194
1.3 - Propriétés des cristaux ioniques . . . . .	194
2 - Différentes structures . . . . .	194
2.1 - Type CsCl (8,8) . . . . .	194
2.2 - Type NaCl (6,6) . . . . .	195
2.3 - Type ZnS (blende) (4,4) . . . . .	195
2.4 - Type CaF <sub>2</sub> (fluorine) (8,4) . . . . .	195
2.5 - Bilan : conditions de cristallisation . . . . .	195
3 - Limites du modèle . . . . .	195
3.1 - Caractère iono-covalent . . . . .	195
3.2 - Présence de défauts . . . . .	195
3.3 - Solubilité comparée . . . . .	195
3.4 - Cas de l'iodure d'argent alpha . . . . .	195
<b>LC22 - Métaux et alliages : structures. (CP) . . . . .</b>	<b>196</b>
1 - Cohésion métallique . . . . .	196
1.1 - Propriétés des métaux . . . . .	196
1.2 - Liaison métallique . . . . .	196
2 - Structure des métaux . . . . .	196
2.1 - Modèle du cristal parfait . . . . .	196
2.2 - Structures compactes . . . . .	196
2.3 - Structures pseudo-compactes . . . . .	196
2.4 - Variétés allotropiques . . . . .	197
3 - Alliages . . . . .	197
3.1 - Intérêt des alliages . . . . .	197
3.2 - Sites interstitiels . . . . .	197
3.3 - Solutions solides d'insertion . . . . .	197
3.4 - Stockage de dihydrogène. . . . .	197
<b>LC23 - Enthalpie de réaction : mesures et applications. (CP) . . . . .</b>	<b>198</b>
1 - Bilan enthalpique . . . . .	198
1.1 - Rappel théoriques . . . . .	198
1.2 - Vase Dewar . . . . .	198
2 - Mesure calorimétrique . . . . .	198
2.1 - Enthalpie de changement d'état . . . . .	198
2.2 - Chaleur de réaction . . . . .	198
3 - Applications . . . . .	199
3.1 - Dosage calorimétrique . . . . .	199
3.2 - Rendement d'une pile . . . . .	199
3.3 - Température de flamme . . . . .	199
3.4 - Biochimie . . . . .	199
3.5 - Photosynthèse . . . . .	199

LC24 - Illustrations expérimentales et applications des réactions de complexation. (CP)	200
1 - Caractérisation des réactions de complexation	200
1.1 - Stoechiométrie d'un complexe - Méthode de Job	200
1.2 - Complexations successives	200
1.3 - Complexations compétitives	200
1.4 - Influence sur d'autres réactions	200
2 - Dosage par complexation : Dureté de l'eau	201
2.1 - Principe	201
2.2 - Dosage des ions magnésium et calcium	201
2.3 - Dosage des ions calcium seuls	201
3 - Applications	201
3.1 - Testeur d'humidité	201
3.2 - Séparation de métaux	201
3.3 - Biologie	201
LC25 - Illustrations expérimentales et applications des réactions de précipitation. (CP)	202
1 - Caractérisation des réactions de précipitation	202
1.1 - Définitions	202
1.2 - Facteurs influençant la solubilité	202
2 - Dosage par précipitation	202
2.1 - Dosage des ions chlorure dans le sérum physiologique (Mohr)	202
2.2 - Dosage sélectif	203
3 - Applications	203
3.1 - Tests caractéristiques d'ions	203
3.2 - Recristallisation	203
3.3 - Chimie dentaire	203
3.4 - Séparation de métaux	203
LC26 - Principe et illustrations des dosages potentiométriques (pH-métrie exclue). (CP)	204
1 - Principe des dosages potentiométriques	204
1.1 - Choix de la réaction de dosage	204
1.2 - Relation de Nernst	204
1.3 - Mesure d'une différence de potentiel	204
2 - Dosage cérimétrique (Fe, Sel de Mohr)	204
2.1 - Principe	204
2.2 - Mesure de la concentration	204
2.3 - Mesure de potentiel standard	204
3 - Dosage argentimétrique (Cl, Sérum physiologique)	205
3.1 - Principe	205
3.2 - Respect de la norme.	205
3.3 - Constantes thermodynamiques	205
LC27 - Cinétique homogène : étude expérimentale. (CP)	206
1 - Suivi cinétique	206
1.1 - Rappels	206
1.2 - Méthodes de suivi	206
2 - Etude expérimentale	206
2.1 - Suivi cinétique	206
2.2 - Détermination d'une loi de vitesse	206
3 - Influence de la température	207
3.1 - Présentation de l'expérience	207
3.2 - Energie d'activation	207
4 - Catalyse	207
LC28 - Mécanismes réactionnels en cinétique homogène : illustrations. (CP)	208
1 - Acte élémentaire	208
1.1 - Définition	208

1.2 - Théorie des collisions . . . . .	208
1.3 - Un mot sur la théorie du complexe activé . . . . .	208
2 - Modélisation d'un mécanisme réactionnel . . . . .	208
2.1 - Problématique . . . . .	208
2.2 - Proposition d'un mécanisme . . . . .	208
2.3 - Vérification expérimentale . . . . .	209
3 - Différents types de mécanismes réactionnels . . . . .	209
3.1 - Mécanisme par stade . . . . .	209
3.2 - Mécanisme en chaîne . . . . .	209
3.3 - Action d'un catalyseur . . . . .	209
LC29 - Illustrations expérimentales et applications des lois de déplacement des équilibres. (CP) . . .	210
1 - Influence des paramètres extérieurs . . . . .	210
1.1 - Influence de la température . . . . .	210
1.2 - Application à la recristallisation . . . . .	210
1.3 - Influence de la pression . . . . .	210
1.4 - Application à l'évaporateur rotatif . . . . .	211
2 - Influence de la composition du système . . . . .	211
2.1 - Ajout d'un constituant . . . . .	211
2.2 - Application à l'estérification . . . . .	211
2.3 - Équilibres compétitifs . . . . .	211
2.4 - Application à la séparation de métaux . . . . .	211
LC30 - Mélanges binaires : équilibres liquide-vapeur ; applications (liquides non miscibles exclus). (CP)	212
1 - Diagrammes binaires : Construction et lecture . . . . .	212
1.1 - Analyse thermique et construction des diagrammes . . . . .	212
1.2 - Interprétation avec la variance . . . . .	212
1.3 - Quantité de matière dans chaque phase . . . . .	212
1.4 - Composition dans chaque phase . . . . .	212
1.5 - Modélisation de la solution idéale . . . . .	212
2 - Ecart à l'idéalité . . . . .	213
2.1 - Ecart faibles . . . . .	213
2.2 - Azéotropie . . . . .	213
3 - Applications . . . . .	213
3.1 - Distillation . . . . .	213
3.2 - Distillation fractionnée . . . . .	213
3.3 - Application aux pétroles . . . . .	213
LC31 - Lecture et illustration des diagrammes d'Ellingham ; application à la pyroméallurgie. (CP) . .	214
1 - Droite d'Ellingham d'un couple métal/oxyde . . . . .	214
1.1 - Rappel : Approximation d'Ellingham . . . . .	214
1.2 - Propriétés des diagrammes . . . . .	214
2 - Lecture des diagrammes d'Ellingham . . . . .	214
2.1 - Métal et oxyde à l'état condensé . . . . .	214
2.2 - Métal ou oxyde à l'état gazeux . . . . .	214
2.3 - Stabilité d'un métal à l'air . . . . .	214
3 - Pyroméallurgie . . . . .	214
3.1 - Principe et intérêt . . . . .	214
3.2 - Choix du réducteur . . . . .	215
3.3 - Pyroméallurgie du zinc . . . . .	215
LC32 - Hydroméallurgie. (CP) . . . . .	216
1 - Du minerai à la solution aqueuse . . . . .	216
1.1 - En amont de l'hydroméallurgie : flottation et grillage . . . . .	216
1.2 - Mise en solution : lixiviation . . . . .	216
2 - Purification . . . . .	216
2.1 - Par précipitation d'hydroxydes . . . . .	216

2.2 - Cémentation . . . . .	216
3 - Réduction par électrolyse . . . . .	217
3.1 - Choix des électrodes . . . . .	217
3.2 - Réalisation . . . . .	217
3.3 - Rendement . . . . .	217
4 - Hydrométallurgie secondaire . . . . .	217
<b>LC33 - Applications des diagrammes potentiel-pH (construction exclue). (CP) . . . . .</b>	<b>218</b>
1 - Lecture du diagramme (rappels) . . . . .	218
1.1 - Exemple du diagramme E-pH du cuivre . . . . .	218
1.2 - Illustration expérimentale sur le cuivre . . . . .	218
1.3 - Cas de l'eau de Javel . . . . .	218
2 - Prévission de réactions : superposition de deux diagrammes . . . . .	218
2.1 - Corrosion uniforme . . . . .	218
2.2 - Pile Daniell . . . . .	218
3 - Utilisation pour le dosage ou la récupération d'espèces . . . . .	219
3.1 - Dioxygène dans l'eau . . . . .	219
3.2 - Dosage de l'eau de Javel . . . . .	219
3.3 - Hydrométallurgie du Zinc . . . . .	219
<b>LC34 - Applications des courbes intensité-potentiel. (CP) . . . . .</b>	<b>220</b>
1 - Réaction spontanée de corrosion d'un métal et blocage cinétique . . . . .	220
1.1 - Prévisions thermodynamiques . . . . .	220
1.2 - Interprétation avec les courbes intensité-potentiel . . . . .	220
2 - Électrolyse de l'eau . . . . .	220
2.1 - Prévisions thermodynamiques . . . . .	220
2.2 - Tracé des courbes intensité-potentiel . . . . .	221
2.3 - Interprétation des courbes intensité-potentiel . . . . .	221
3 - Accumulateur au plomb . . . . .	221
3.1 - Présentation . . . . .	221
3.2 - Charge et décharge . . . . .	221
<b>LC35 - Corrosion humide et protection des métaux contre la corrosion. (CP) . . . . .</b>	<b>223</b>
1 - La corrosion humide . . . . .	223
1.1 - Définitions . . . . .	223
1.2 - Les différents facteurs de corrosion humide . . . . .	223
1.3 - Deux types de corrosion . . . . .	223
2 - Corrosion uniforme et méthodes de protection . . . . .	223
2.1 - Thermodynamique de la corrosion . . . . .	223
2.2 - Exemple de passivation . . . . .	223
2.3 - Protection anodique et cathodique . . . . .	224
2.4 - Cinétique de la corrosion et principe de l'anode sacrificielle . . . . .	224
3 - Corrosion différentielle et revêtements de protection . . . . .	224
3.1 - Corrosion à cause d'inhomogénéités . . . . .	224
3.2 - Principe des revêtements de protection . . . . .	224
<b>LC36 - Exemples de mécanismes en chimie organique : additions électrophiles sur la double liaison carbonecarbone. (CP) . . . . .</b>	<b>225</b>
1 - La double liaison C=C . . . . .	225
1.1 - Description . . . . .	225
1.2 - Réactivité . . . . .	225
1.3 - Stabilité . . . . .	225
2 - Hydrohalogénéation . . . . .	225
2.1 - Réaction . . . . .	225
2.2 - Mécanisme . . . . .	225
2.3 - Régiosélectivité . . . . .	225
3 - Hydratation . . . . .	226

4 - Dihalogénéation . . . . .	226
4.1 - Réaction . . . . .	226
4.2 - Stéréospécificité . . . . .	226
4.3 - Mécanisme . . . . .	226
5 - Addition électrophile radicalaire . . . . .	226
<b>LC37 - Conformations et configurations ; illustrations expérimentales. (CP) . . . . .</b>	<b>227</b>
<b>1 - Conformations . . . . .</b>	<b>227</b>
1.1 - Définition . . . . .	227
1.2 - Cas simple . . . . .	227
1.3 - Cas d'une molécule substituée . . . . .	227
<b>2 - Notion de configuration d'un centre stéréogène . . . . .</b>	<b>228</b>
2.1 - Rappel des règles CIP . . . . .	228
2.2 - Descripteurs stéréochimiques . . . . .	228
<b>3 - Stéréoisomérisation de configuration . . . . .</b>	<b>228</b>
3.1 - Énantiomérisation et diastéréoisomérisation . . . . .	228
3.2 - Propriétés d'un couple de diastéréoisomères . . . . .	228
3.3 - Propriétés d'un couple d'énantiomères . . . . .	228
3.4 - La chiralité, ou comment distinguer deux énantiomères . . . . .	228
3.5 - Dédoublage de racémique . . . . .	228
<b>LC38 - Macromolécules. (CP) . . . . .</b>	<b>229</b>
<b>1 - Définitions et description . . . . .</b>	<b>229</b>
1.1 - Macromolécules et polymères . . . . .	229
1.2 - Description statistique . . . . .	229
1.3 - Différents types de polymères . . . . .	229
<b>2 - Obtention de matériaux polymères . . . . .</b>	<b>229</b>
2.1 Synthèse d'un polymère : polycondensation du nylon . . . . .	229
2.2 - Différents types de réactions de polymérisation . . . . .	229
2.3 - Cinétique . . . . .	230
<b>3 - Propriétés physiques des matériaux polymères . . . . .</b>	<b>230</b>
3.1 - Etat caoutchoutique . . . . .	230
3.2 - Cristallinité . . . . .	230
3.3 - Semi-cristallin . . . . .	230
3.4 - Différents types de plastiques . . . . .	230
3.5 - Influence de la réticulation . . . . .	230
<b>Montages de physique . . . . .</b>	<b>231</b>
<b>MP01 -Quantité de mouvement, moment cinétique et énergie en mécanique classique. . . . .</b>	<b>231</b>
<b>1 - Chute libre, mouvement accéléré . . . . .</b>	<b>231</b>
1.1 - Mesure de la pesanteur, chute d'une règle . . . . .	231
1.2 - Etude énergétique . . . . .	231
<b>2 - Conservation de la quantité de mouvement, mobiles auto-porteurs . . . . .</b>	<b>231</b>
2.1 - Mobiles autoporteurs . . . . .	231
2.2 - Analyse des résultats (p,E) . . . . .	232
<b>3 - Mouvement à force centrale . . . . .</b>	<b>232</b>
3.1 - Mobiles autoporteurs et ressort, présentation . . . . .	232
3.2 - Analyse des résultats (L) . . . . .	232
<b>3 - Moment d'inertie . . . . .</b>	<b>232</b>
3.1 - Pendule grand angle, présentation . . . . .	232
3.2 - Analyse des résultats (J,E) . . . . .	232
<b>MP02 - Phénomènes de surface. . . . .</b>	<b>233</b>
<b>1 - Frottements solides . . . . .</b>	<b>233</b>
1.1 - Mise en évidence . . . . .	233



1.2 - Stick-slip . . . . .	233
2 - Tension de surface . . . . .	233
2.1 - Mise en évidence . . . . .	233
2.2 - Balance d'arrachement . . . . .	234
2.3 - Montée capillaire . . . . .	234
2.4 - Ondes gravito-capillaires . . . . .	234
2.5 - Mouillage d'une surface solide . . . . .	234
<b>MP03 - Dynamique des fluides.</b> . . . . .	<b>235</b>
1 - Viscosimètre à bille . . . . .	235
2 - Ecoulement de Poiseuille . . . . .	235
3 - Soufflerie . . . . .	236
3.1 - Tube de Pitot . . . . .	236
3.2 - Force de traînée . . . . .	236
<b>MP04 - Échelle et mesures de température.</b> . . . . .	<b>237</b>
1 - Echelle thermométrique absolue de température . . . . .	237
1.1 - Gaz parfait, étalon primaire . . . . .	237
1.2 - Détermination de la température d'ébullition de l'eau . . . . .	237
2 - Echelle internationale pratique de température (EIPT) . . . . .	237
2.1 - La Pt100, un étalon secondaire . . . . .	237
2.2 - Comparaison de différents thermomètres . . . . .	238
3 - Extension de l'EIPT aux hautes températures . . . . .	238
3.1 - Principe du pyromètre . . . . .	238
3.2 - Loi de Stefan . . . . .	238
<b>MP05 - Transitions de phase.</b> . . . . .	<b>239</b>
1 - Transitions du premier ordre . . . . .	239
1.1 - Solide-solide . . . . .	239
1.2 - Liquide-vapeur . . . . .	239
1.3 - Diagramme de Clapeyron . . . . .	239
2 - Transitions du second ordre . . . . .	240
2.1 - Opalescence critique . . . . .	240
2.2 - Supraconductivité . . . . .	240
2.3 - Ferromagnétique/Paramagnétique . . . . .	240
3 - Retard à la transition . . . . .	240
3.1 - Surfusion de l'eau. Tube à essai dans de la glace. On atteint -5°C puis on perturbe et on observe la solidification immédiate. . . . .	240
3.2 - Surfusion de l'étain . . . . .	240
<b>MP06 - Instrument(s) d'optique.</b> . . . . .	<b>241</b>
1 - Présentation du montage . . . . .	241
2 - Mesure du grossissement . . . . .	241
3 - Diaphragmes d'ouverture et de champ . . . . .	241
4 - Pouvoir de résolution . . . . .	242
5 - Clarté . . . . .	242
<b>MP07 - Interférences lumineuses ; conditions d'obtention.</b> . . . . .	<b>243</b>
1 - Interféromètre à division du front d'onde : fentes d'Young . . . . .	243
1.1 - Cohérence temporelle . . . . .	243
1.2 - Cohérence spatiale . . . . .	243
2 - Interféromètre à division d'amplitude : le Michelson . . . . .	244
2.1 - Cohérence spatiale et localisation . . . . .	244
2.2 - Mesure de la largeur spectrale d'une raie . . . . .	244
3 - Interférences en lumière polarisée . . . . .	244
<b>MP08 - Diffraction des ondes lumineuses.</b> . . . . .	<b>245</b>

1 - De Fresnel à Fraunhoffer . . . . .	245
1.1 - Nombre de Fresnel . . . . .	245
1.2 - Ouverture circulaire . . . . .	245
2 - Diffraction de Fraunhoffer . . . . .	245
2.1 - Propriétés . . . . .	245
2.2 - Mesure du diamètre d'un fil . . . . .	246
3 - Filtrage . . . . .	246
3.1 - Strioscopie . . . . .	246
3.2 - Expérience d'Abbe . . . . .	246
4 - Application : Réseau et spectroscopie . . . . .	246
5 - Limite de résolution . . . . .	246
MP09 - Spectrométrie optique. . . . .	247
1 - Spectrométrie dispersive : Le réseau . . . . .	247
1.1 - Résolution, étalonnage et mesure . . . . .	247
1.2 - Constante de Rydberg . . . . .	248
2 - Spectrométrie interférentielle : Michelson et TF . . . . .	248
2.1 - Résolution du doublet du sodium . . . . .	248
2.2 - Transformée de Fourier . . . . .	248
3 - Cavité confocale Fabry-Pérot . . . . .	248
MP10 - Milieux optiquement actifs : biréfringence et pouvoir rotatoire. . . . .	249
1 - Biréfringence . . . . .	249
1.1 - Mise en évidence avec un rhomboèdre de spath . . . . .	249
1.2 - Mesure de la biréfringence d'une lame épaisse de quartz . . . . .	249
1.3 - Mesure de l'épaisseur d'une lame mince de quartz . . . . .	250
2 - Polarisation rotatoire . . . . .	250
2.1 - Polarisation rotatoire et chiralité . . . . .	250
2.2 - Polarisation rotatoire par effet Faraday . . . . .	250
MP11 - Production et analyse d'une lumière polarisée. . . . .	251
1 - Polarisation rectiligne . . . . .	251
1.1 - Production et analyse par dichroïsme . . . . .	251
1.2 - Polarisation par réflexion vitreuse . . . . .	251
1.3 - Polarisation par diffusion . . . . .	252
1.4 - Polarisation par biréfringence . . . . .	252
2 - Polarisation elliptique . . . . .	252
2.1 - Production et analyse par une lame quart d'onde . . . . .	252
2.2 - Polarisation par réflexion métallique . . . . .	252
MP12 - Émission et absorption dans le domaine optique. . . . .	253
1 - Absorption . . . . .	253
1.1 - Loi de Beer-Lambert . . . . .	253
1.2 - Fluorescence . . . . .	253
2 - Emission spontanée . . . . .	253
2.1 - Constante de Rydberg . . . . .	253
2.2 - Largeur de raie . . . . .	254
3 - Emission stimulée . . . . .	254
4 - Rayonnement du corps noir . . . . .	254
MP13 - Lasers. . . . .	255
1 - Principe de fonctionnement d'un laser . . . . .	255
2 - Propriétés géométriques du faisceau laser . . . . .	255
2.1 - Caractère gaussien . . . . .	255
2.2 - Divergence du faisceau . . . . .	255
2.3 - Cas de la diode laser . . . . .	256
3 - Cohérence temporelle et modes du laser . . . . .	256

4 - Cohérence spatiale et speckle . . . . .	256
<b>MP14 - Photorécepteurs. . . . .</b>	<b>257</b>
1 - Caractéristiques . . . . .	257
1.1 - Photodiode . . . . .	257
1.2 - Photorésistance . . . . .	257
2 - Linéarité, Sensibilité . . . . .	257
3 - Réponse spectrale . . . . .	258
4 - Temps de réponse . . . . .	258
5 - Résolution . . . . .	258
6 - Applications . . . . .	258
<b>MP15 - Production et mesure de champs magnétiques. . . . .</b>	<b>259</b>
1 - Production de champs magnétiques . . . . .	259
1.1 - Aimant permanent . . . . .	259
1.2 - Bobine . . . . .	259
1.3 - Champ tournant . . . . .	259
1.4 - Electroaimant . . . . .	260
2 - Mesure de champs magnétiques . . . . .	260
2.1 - Teslamètre (sonde effet Hall Ge), Fluxmètre . . . . .	260
2.2 - Champ magnétique terrestre horizontal . . . . .	260
2.3 - Dans la matière . . . . .	260
<b>MP16 - Milieux magnétiques. . . . .</b>	<b>261</b>
1 - Diamagnétisme, paramagnétisme . . . . .	261
1.1 - Mise en évidence . . . . .	261
1.2 - Azote et dioxygène . . . . .	261
1.3 - Susceptibilité de $FeCl_3$ . . . . .	261
2 - Ferromagnétisme . . . . .	262
2.1 - Mise en évidence . . . . .	262
2.2 - Transition ferro-para . . . . .	262
2.3 - Hystérésis magnétique . . . . .	262
3 - Domaines de Weiss . . . . .	262
<b>MP17 - Métaux. . . . .</b>	<b>263</b>
1 - Variétés allotropiques . . . . .	263
2 - Conductivité électrique . . . . .	263
2.1 - Cuivre par mesure 4 fils et effet Hall . . . . .	263
2.2 - Aluminium par courants de Foucault . . . . .	263
2.3 - Dépendance en température . . . . .	264
3 - Conductivité thermique . . . . .	264
3.1 - Cuivre en régime permanent . . . . .	264
3.2 - Autres métaux au conductiscope . . . . .	264
4 - Module d'Young . . . . .	264
<b>MP18 - Matériaux semi-conducteurs. . . . .</b>	<b>265</b>
1 - Influence de la température dans un semi-conducteur intrinsèque . . . . .	265
2 - Mesure de la densité de porteurs de charge dans un semi-conducteur extrinsèque . . . . .	265
2.1 - Mesure de la conductivité . . . . .	265
2.2 - Mesure de la densité de porteurs de charges . . . . .	265
2.3 - Détermination de la mobilité des porteurs de charges . . . . .	266
3 - Application : la cellule photovoltaïque . . . . .	266
3.1 - Mode de fonctionnement . . . . .	266
3.2 - Caractéristiques . . . . .	266
3.3 - Rendement maximum . . . . .	266
<b>MP19 - Effets capacitifs. Applications. . . . .</b>	<b>267</b>

1 - Caractéristique d'un condensateur : Capacité C	267
1.1 - Dépendance avec la distance inter-armatures.	267
1.2 - Rôle du diélectrique	267
2 - Mesure de capacités, multivibrateur astable (principe du capacimètre)	267
3 - Effet capacitif dans un câble coaxial	267
3.1 - Impédance caractéristique et vitesse de propagation	268
3.2 - Capacité linéique au capacimètre	268
4 - Application : filtrage	268
4.1 - Filtre passe-bas	268
4.2 - Détecteur d'enveloppe	268
<b>MP20 - Induction, auto-induction.</b>	<b>269</b>
1 - Lois de l'induction	269
1.1 - Loi de Lenz	269
1.2 - Loi de Faraday	269
2 - Mesures d'inductances	269
2.1 - Inductance propre	269
2.2 - Inductance mutuelle	270
3 - Applications	270
3.1 - Transformateur et cuisine	270
3.2 - Mesure de rapports de conductances	270
3.3 - Rails de Laplace	270
<b>MP21 - Conversion de puissance électrique-électrique.</b>	<b>271</b>
1 - Transformateur	271
1.1 - Présentation	271
1.2 - Rendement en charge	271
1.3 - Pertes fer	271
1.4 - Pertes cuivre	272
1.5 - Pertes séparées	272
2 - Redresseur double alternance	272
3 - Hacheur dévolteur	272
<b>MP22 - Exemples de conversion électrique-mécanique.</b>	<b>273</b>
1 - Conversion mécanique -> électrique : exemple de la génératrice (MCC)	273
1.1 - Présentation	273
1.2 - Force électromotrice	273
1.3 - Caractéristique en charge et résistance de l'induit	273
1.4 - Couple des forces de Laplace	273
1.5 - Rendement	274
2 - Conversion électrique -> mécanique : le moteur asynchrone	274
2.1 - Présentation	274
2.1 - Couple des forces de Laplace	274
2.2 - Rendement	274
<b>MP23 - Capteurs et transducteurs.</b>	<b>275</b>
1 - Transducteurs électro-mécanique	275
1.1 - Haut-parleur	275
1.2 - Machine à courant continu	275
2 - Capteurs de température	275
2.1 - Experience	275
2.2 - Discussion	275
3 - Photorécepteurs	275
3.1 - Linéarité, sensibilité	276
3.2 - Réponse spectrale	276
3.3 - Temps de réponse	276
3.4 - Résolution d'un capteur	276

MP24 - Mesures électriques (mesure des fréquences exclue).	277
1 - Tension	277
1.1 - Tension continue, principe du voltmètre, CAN	277
1.2 - Tension variable et valeur efficace, multiplicateur	277
2 - Courants	277
2.1 - Courants faibles	277
2.2 - Courants forts	277
3 - Puissance	278
4 - Limitations	278
5 - Composants électroniques	278
5.1 - Résistance	278
5.2 - Capacité	278
5.3 - Inductance	278
MP25 - Amplification de signaux.	279
MP26 - Mise en forme, transport et détection de l'information.	281
1 - Principe général	281
2 - Transmission AM	281
2.1 - Modulation d'amplitude : multiplicateur	281
2.2 - Démodulation d'amplitude : détection synchrone	281
3 - Transmission FM	281
3.1 - Modulation de fréquence : OCT	281
3.2 - Démodulation de fréquence : PLL	281
4 - Etude du bloc "Transport"	281
4.1 - Encombrement spectral de la source	282
4.2 - Trois supports principaux	282
4.3 - Propagation dans un câble coaxial	282
5 - Linéarité et réponse fréquentielle de la chaîne	282
5.1 - Diagramme de Bode, Influence de la porteuse	282
5.2 - Réponse expérimentale - Multiplexage	282
MP27 - Acquisition, analyse et traitement des signaux.	283
1 - Acquisition : de l'analogique au numérique	283
1.1 - Échantillonneur-bloqueur	283
1.2 - CAN simple rampe	283
1.3 - Numérisation	283
2 - Analyse de Fourier d'un signal échantillonné	284
2.1 - Critère de Shannon : importance de la fréquence d'échantillonnage	284
2.2 - Résolution spectrale : importance de la durée d'acquisition	284
3 - Extraction d'un signal d'un environnement bruité	284
MP28 - Mesure des fréquences temporelles (domaine de l'optique exclu).	285
1 - Mesure par comptage	285
1.1 - Pendule simple, chronomètre	285
1.2 - Diapason, fréquencemètre	285
2 - Mesure par comparaison	285
2.1 - Battements acoustiques	285
2.2 - Champs tournant, stroboscope	285
2.3 - Détection synchrone	286
3 - Mesure par transformée de Fourier	286
3.1 - Pendules couplés	286
3.2 - Diapasons multiples	286
MP29 - Mesure de longueurs.	287
1 - Distances usuelles	287
1.1 - Instruments usuels	287

1.2 - Télémètre acoustique . . . . .	287
2 - Grandes distances . . . . .	287
2.1 - Télémétrie laser . . . . .	287
2.2 - Parallaxe . . . . .	287
3 - Petites distances . . . . .	288
3.1 - Interférométrie, lame de verre . . . . .	288
3.2 - Diffraction, cheveu . . . . .	288
3.3 - Diffraction, paramètre de maille . . . . .	288
<b>MP30 - Systèmes bouclés (oscillateurs exclus).</b> . . . . .	<b>289</b>
1 - Amplificateur opérationnel . . . . .	289
1.1 - Etude en boucle ouverte . . . . .	289
1.2 - Etude en boucle fermée . . . . .	289
2 - Asservissement en position d'un moteur . . . . .	289
2.1 - Principe . . . . .	289
2.2 - Fonction de transfert . . . . .	289
2.3 - Qualité de la réponse . . . . .	290
2.4 - Amélioration par correction . . . . .	290
3 - Boucle à verrouillage de phase . . . . .	290
3.1 - Etude du VCO . . . . .	290
3.2 - Plage d'accrochage . . . . .	290
<b>MP31 - Instabilités et phénomènes non-linéaires.</b> . . . . .	<b>291</b>
1 - Du linéaire au non-linéaire : le pendule pesant aux grands angles. . . . .	291
2 - Un oscillateur fonctionnant sur les instabilités : le Van der Pol . . . . .	291
3 - Transition vers le chaos et universalité . . . . .	292
3.1 - Dynamique des populations . . . . .	292
3.2 - Bille et vibreur . . . . .	292
<b>MP32 - Ondes : propagation et conditions aux limites.</b> . . . . .	<b>293</b>
1 - Propagation libre . . . . .	293
1.1 - Mise en évidence . . . . .	293
1.2 - Mesure de la vitesse . . . . .	293
2 - Effet des conditions aux limites . . . . .	293
2.1 - Réflexion et transmission aux interfaces . . . . .	293
2.2 - Ondes stationnaires . . . . .	293
3 - Propagation guidée, conditions aux limites transverses . . . . .	294
<b>MP33 - Ondes acoustiques.</b> . . . . .	<b>295</b>
1 - Vitesse de propagation . . . . .	295
1.1 - Dans l'air . . . . .	295
1.2 - Dans un solide . . . . .	295
1.3 - Influence de la température . . . . .	295
2 - Caractère ondulatoire du son . . . . .	296
2.1 - Interférences . . . . .	296
2.2 - Effet Doppler . . . . .	296
2.3 - Timbre . . . . .	296
3 - Impédance acoustique . . . . .	296
<b>MP34 - Résonance.</b> . . . . .	<b>297</b>
1 - Résonance électrique . . . . .	297
1.1 - Circuit RLC . . . . .	297
1.2 - Oscillateur à quartz . . . . .	297
2 - Résonance mécanique . . . . .	298
2.1 - Corde de Melde . . . . .	298
2.2 - Diapason . . . . .	298
2.3 - Modes résonants . . . . .	298

3 - Résonance optique . . . . .	298
<b>MP35 - Oscillateurs auto-entretenus.</b> . . . . .	<b>299</b>
1 - Oscillateur de Wien . . . . .	299
1.1 - Etude de la fonction de transfert en boucle ouverte . . . . .	299
1.2 - Démarrage des oscillations . . . . .	299
1.3 - Qualité du signal obtenu . . . . .	299
2 - Oscillateurs à relaxation . . . . .	299
2.1 - Vase de Tantale . . . . .	299
2.2 - Multivibrateur astable . . . . .	300
3 - Oscillateurs particuliers . . . . .	300
3.1 - Oscillateur numérique . . . . .	300
3.2 - Oscillateur de Van der Pol . . . . .	300
3.3 - Oscillateur à Quartz . . . . .	300
<b>MP36 - Couplage des oscillateurs.</b> . . . . .	<b>301</b>
1 - Pendules couplés . . . . .	302
1.1 - Pendule libre . . . . .	302
1.2 - Pendules couplés . . . . .	302
1.3 - Efficacité du couplage . . . . .	302
1.4 - Modes . . . . .	302
1.5 - Etude énergétique . . . . .	302
2 - Couplage par mutuelle induction . . . . .	303
2.1 - Etalonnage M(d) . . . . .	303
2.2 - Accord des oscillateurs . . . . .	303
2.3 - Dépendance des modes . . . . .	303
3 - Couplage de 4 oscillateurs . . . . .	303
3.1 - Mesure des fréquences propres . . . . .	303
3.2 - Relation de dispersion . . . . .	303
3.3 - Observation des modes . . . . .	303
4 - Milieu à constante réparties, soliton . . . . .	304
<b>MP37 - Filtrage des signaux.</b> . . . . .	<b>305</b>
1 - Electricité . . . . .	305
1.1 - Filtre RC passif . . . . .	305
1.2 - Filtre actif . . . . .	305
2 - Optique . . . . .	305
2.1 - Filtrage spatial : Strioscopie . . . . .	305
2.2 - Filtrage spatial : Abbe . . . . .	306
2.3 - Interférométrie . . . . .	306
3 - Mécanique . . . . .	306
3.1 - Quartz . . . . .	306
3.2 - Pendules couplés . . . . .	306
<b>MP38 - Régimes transitoires.</b> . . . . .	<b>307</b>
1 - Différents types de transitoires . . . . .	307
1.1 - RLC, régime pseudo-périodique . . . . .	307
1.2 - Régimes critique et apériodique . . . . .	307
2 - Un outil d'investigation . . . . .	307
2.1 - Réponse indicelle . . . . .	307
2.2 - Diffusion du glycérol . . . . .	308
3 - Applications . . . . .	308
3.1 - Détecteur de crête . . . . .	308
3.2 - Temps de réponse . . . . .	308
3.3 - Asservissement en position . . . . .	308
<b>MP39 - Phénomènes de transport.</b> . . . . .	<b>309</b>

1 - Convection . . . . .	309
2 - Diffusion . . . . .	309
2.1 - Glycérol dans l'eau . . . . .	309
2.2 - Diffusion thermique du cuivre . . . . .	309
2.3 - Conduction électrique du cuivre . . . . .	310
3 - Transport par rayonnement . . . . .	310
4 - Viscosité . . . . .	310
MP40 - Phénomènes dissipatifs. . . . .	311
1 - Viscosité . . . . .	311
1.1 - Mise en évidence . . . . .	311
1.2 - Chute d'une bille . . . . .	311
2 - Frottements solides . . . . .	311
3 - Transformateur . . . . .	311
3.1 - Rendement en charge . . . . .	311
3.2 - Pertes fer . . . . .	312
3.3 - Pertes cuivre . . . . .	312
3.4 - Pertes séparées . . . . .	312
3.5 - Hystérésis . . . . .	312
4 - Freinage magnétique . . . . .	312

---



Ce document contient les plans de leçons et montages que j'ai élaboré pour le concours avec l'aide précieuse de Serguei avec qui j'ai eu le plaisir de travailler en binôme tout au long de l'année, ainsi que celle d'Albane. Merci à eux, ainsi qu'à toute la promotion. J'ai été classé 35ème. Malgré tout, ces plans ne sont pas tous bons et sont personnels : ne les utilisez pas d'une mauvaise façon. Il peut rester quelques coquilles tout comme aucun livre n'est exempt d'erreurs. De plus, j'utilise très souvent certains livres dont voici la liste. Ils ne sont donc pas indiqués de façon systématique.

En physique :

"Dictionnaire de physique" de R. Taillet (Dunod),  
La collection "Fondements et Applications" de J.P. Pérez (Dunod),  
"Toute la physique de Sup" et "Toute la physique de Spé" de O. Fiat (Belin).  
"Physique PCSI" et "Physique PC/PC\*" de V.Renvoizé (Cap prépa).  
"Physique PCSI" et "Physique PC/PC\*" de M.Sanz (Dunod).  
"Physique PCSI" et "Physique PC/PC\*" de S.Olivier (Tec et Doc).

En chimie :

"La Chimie de A à Z" de A. Hunt (Dunod),  
"Chimie Physique" et "Chimie Organique" de P. Arnaud (Dunod),  
"Chimie PCSI" et "Chimie PC-PC\*" de O. Duruphty (H-prépa).  
"Des expériences de la famille Acide-base" de Danielle Cachau-Herreillat.  
"Des expériences de la famille Réd-Ox" de Danielle Cachau-Herreillat.

Pour les expériences :

"Expériences d'optique", "Expériences d'électronique", "Expériences de physique au CAPES" de R. Duffait,  
"Optique expérimentale" de Sextant,  
La collection "Dictionnaire de physique expérimentale" de Quaranta,  
Les deux livres d'expériences de chimie de J. Mesplèdes (100 manipulations...),  
Les deux livres d'expériences de chimie J.F. Le Maréchal (La chimie expérimentale...).  
Et toujours un bon gros Handbook, avec les notices des instruments !!

Il y a aussi la collection des "Cours de physique" de R. Feynman et celle intitulée "Les mille et une questions de la physique/chimie en prépas" de C.Garing/S.Rédoglia, ainsi que "750 questions d'oral" de E. Verrier.

Note sur les incertitudes et les erreurs de mesure (rapport de l'inspecteur général, Duffait CAPES, BUP 995) :

- Notion d'erreur aléatoire (fidélité) et d'erreur systématique (justesse).
- Propagation erreurs indépendantes : Racine de la somme des carrés.
- Incertitudes de type A (statistique) et de type B (lecture, autre), toujours associé à un niveau de confiance.

- Pour le type A :

$$\text{moyenne} = m = \frac{1}{n} \sum m_i \quad \sigma_{exp} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (m_k - m)^2} \quad \sigma_{type} = \sqrt{\frac{1}{n}} \sigma_{exp}$$

- Pour le type B :

- On regarde la notice, les spécifications, et on trouve l'incertitude type.
- On regarde la notice, les spécifications, et on trouve l'incertitude expérimentale. On divise alors cette incertitude par racine de 3 (explication à partir de distribution rectangulaire).
- On divise une graduation par racine de 12.
- Somme ou différence : on ajoute les incertitudes absolues.
- Produit ou division : on ajoute les incertitudes relatives.
- Régression linéaire : c'est une méthode des moindres carrés.
- Erreurs : à 1, 3 ou 5 sigmas avec 63, 95 ou 99 % de confiance.
- On présente le résultat avec un nombre de chiffres significatifs cohérent.
- Dans le cas d'un logarithme, il y a autant de chiffres significatifs pour la valeur que de chiffres significatifs après la virgule dans son logarithme.

Plus la méthode du Chi2 à savoir en gros.

Ci-après les différents éléments que vous rencontrerez dans ce document. De plus, la table des matières est cliquable, utilisez-la !

Boîte pour programme à taper, logiciel à utiliser..

### Ce que dit le jury...

*Faire une leçon parfaite.*

*Le jury a toujours raison !*

### Bibliographie

1. *Mon premier abécédaire.*
2. *La transformée de Fourier pour les nuls.*
3. *Les trucs utiles.*

*En cas de trou de mémoire...*

### Attention

*Ne pas faire cette faute. Ne pas oublier les gants. Ne pas faire exploser la salle.*

*Ce serait trop bête...*

### Calcul

*Par exemple Ehrenfest en RMN, ou encore  $1+2=4-1$ .*

*A faire en direct et rapidement...*

### Remarques

*Fourier était normalien.*

*En bonus...*

### Expérience

*Faire tomber une pomme.*

*La physique est une science expérimentale. La chimie est expérimentale...*

### Illustration

*Schéma au tableau à faire en pointillés rapides bien sûr.  
Transparent, image, vidéo, animation...*

*A savoir reproduire, à montrer...*

### Avis

*Super leçon, donnez moi un 20 !!*

*Ce qu'on en pense...*

Merci à Serguei TCHOUMAKOV, mon binôme pour cette année riche en physique. Ces plans sont largement inspirés de nos échanges qui m'ont beaucoup apporté.

Merci également à Albane LAMBERT qui a souvent travaillé avec nous.

Merci aussi à Emmanuel GUILLAUD, Sandrine GUERRAZ, Yoram VADEE LE BRUN, Julien OLLITRAULT et Helmy CHEKIR, camarades de promotions et amis.

Enfin, merci à Etienne THIEBERGE, Antoine BERUT et Adrien LICARI pour avoir mis à disposition leurs plans, dont je me suis très largement inspiré.

Enfin, merci à tout ceux qui m'ont encouragé : mes proches, mes amis, et en particulier merci à Lou avec qui je partage une vie heureuse et sans qui rien ne serait possible.

## Quelques infos pour l'épreuve Agir...

### 10 compétences de l'enseignant de collège et de lycée

Compétence	Titre
1	Agir en fonctionnaire de l'État et de façon éthique et responsable
2	Maîtriser la langue française pour enseigner et communiquer
3	Maîtriser les disciplines et avoir une bonne culture générale
4	Concevoir et mettre en uvre son enseignement
5	Organiser le travail de la classe
6	Prendre en compte la diversité des élèves
7	Évaluer les élèves
8	Maîtriser les technologies de l'information et de la communication
9	Travailler en équipe et coopérer avec les parents et les partenaires de l'école
10	Se former et innover

En ce qui concerne la première compétence, on a :

Connaissances	Détails
1	Textes fondateurs des valeurs de la République et de l'école : droits de l'homme, constitution, laïcité.
2	Etat et collectivités : programme scolaire, formation, budget.
3	Politique éducative : socle commun européen, égalité, valeurs, lutte contre l'échec, accueil individualisé pour les handicapés, développement durable.
4	Textes juridiques : responsabilité de l'enseignant, obligation de surveillance et de signalement.
5	Mission publique nécessite une éthique
6	Administration d'un établissement : différents conseils (administration, classe, pédagogique, CHS, disciplinaire...), règlement intérieur.
7	Projet d'établissement.

Capacités	Détails
8	Connaître les différents acteurs dans un établissement et à qui s'adresser (COP, infirmière, CPE, proviseur...).
9	Coopérer avec les partenaires : informer les parents, les partenaires...
10	Se faire respecter tout en installer un climat favorable à l'apprentissage, vie de classe. Discernement et équité dans les sanctions.
11	Rôle de surveillance

Attitudes	Détails
12	Dimension civique car transversale : obligation de réserve mais devoir d'informer. Neutralité et laïcité. S'applique aux intervenants extérieurs aussi.
13	Secret professionnel, vigilance à l'oral et à l'écrit.

Expressions clés : Séquence de cours, faire classe, projet pédagogique, éthique, responsable.

Remarques : Lycée = région , Collège = département, École = ville, Techniciens = Recherche.

A bien faire passer : mise en oeuvre de notre éthique et responsabilité, développement de valeurs citoyennes chez l'élève, la démarche scientifique peut accompagner toute une vie, l'attitude d'analyse sur une base de critères objectifs est applicable en toute situation.

Idées pour Agir.

Thème	LC	Compétence/Capacité/Aptitude
Pollution / Dvlp durable		
Recyclage		
Gaspillage		
Santé		
Controle qualité / Normes / Lois		
Vie à la maison		
Sécurité		
Biologie / Médecine		
Histoire		
Sociologie		
Visite / Sortie scolaire		
Conférences / Interventions		
Exposés en groupe / Fête de la science		
Club le samedi		
Recherche documentaire		

Socle commun (collège) :

- La maîtrise de la langue française (lire, écrire).
- La pratique d'une langue vivante étrangère (comprendre et parler).
- Les principaux éléments de mathématiques et la culture scientifique et technologique.
  - > géométrie et calcul.
  - > structure et fonctionnement de la Terre et de l'Univers.
  - > matière et propriétés physico-chimiques, énergie.
  - > caractéristiques du vivant (cellule, biodiversité, évolution des espèces).
  - > conception, réalisation et fonctionnement des objets techniques.
  - > démarche d'investigation, agir dans une perspective de développement durable.
- La maîtrise des techniques usuelles de l'information et de la communication (TIC,B2I).
- La culture humaniste (histoire, géographie, littérature, arts, repères, valeurs).
- Les compétences sociales et civiques (règles de la société, droits, liberté, devoirs, état, Europe).
- L'autonomie et l'initiative (engagement, projection, orientation, choix).

Et c'est parti !

### Ce que dit le jury...

*Parler de l'aspect énergétique et de l'aspect microscopique. Traiter glissement et roulement. Mettre en évidence la distinction de cas entre glissement et non glissement.*

### Bibliographie

*Pérez, Mécanique : Pour la modélisation, les liaisons, les lois, la dissipation. Exemple de la vis, du bitume.*

*Fiat, Toute la physique de SUP : Pour l'aspect micro, le marcheur, l'effet rétro, le cylindre. 2 chapitres.*

*Feynman, Mécanique 1 : Pour introduction et aspect microscopique.*

*Taillet, Dictionnaire de physique : Pour la modélisation (schéma) et les lois (avec ODG).*

*BFR, Mécanique 2 : Pour le stick-slip.*

*Portelli, La physique par la pratique : Pour préciser les contributions.*

## Introduction

Jusqu'ici, hypothèse de l'absence de frottements en mécanique. Ici ils sont au coeur de la leçon. On va voir qu'ils présentent un intérêt. Utilisation des lois de Newton => nécessité de modéliser les actions de contact. On se limite aux solides indéformables.

## 1 - Contact entre deux solides

### 1.1 - Modélisation du contact

Différents types de contacts (ponctuel/ligne/plan). Définir la vitesse de glissement, avec le point I de contact. Définir les vecteurs rotations de roulement et de pivotement. Définir les réactions et les moments normaux et tangentiels.

#### Illustration

*Schéma contact plan-sphère sur transparent. Mettre vecteurs et les 3 modes de déplacement relatif.*

#### Illustration

*Importance au quotidien. Schéma d'un marcheur avec les forces. Astuce du tapis-brosse.*

### 1.2 - Liaisons

Contact peut former liaisons. Diminue nombre de degré de libertés. Exemple liaison pivot.

#### Illustration

*Montrer schéma liaison pivot.*

### 1.3 - Lois du frottement

Nécessité de lois supplémentaires, phénoménologiques. Donner les lois de Coulomb et d'Amontons (distinguer les contributions). Dire qu'on peut faire l'analogie pour les moments. ODG coefficients de frottement. Souvent indépendant de la vitesse. Importance du choix des matériaux par exemple pour l'adhérence (exemple bitume).

#### Expérience

*Faire glisser des objets sur un plan incliné quand on en parle (mesure du statique et du dynamique par montée puis descente) : 1) Comparer matériaux. 2) Comparer aires. 3) Comparer état de surface.*

### 1.4 - Interprétation microscopique

Non interpénétration car répulsion électrostatique. Frottement probablement dû aux forces de Van der Waals, mais ne dissipe pas... En fait irrégularités des surfaces au niveau atomique (sinon soudure à froid). Plus la surface est sale, mieux ça glisse. On suppose que les atomes s'accrochent et se décrochent en vibrant et en déformant la surface, d'où la dissipation d'énergie.

### 1.5 - Aspect énergétique

Montrer effectivement que la puissance globale des forces de frottement est négative.

## 2 - Glissement

### 2.1 Arc-boutement

#### Calcul

*Exemple de la vis. ODG bois/métal. Comparer les filetages. Notion de cône de frottement.*

#### Illustration

*Schéma cône de frottement.*

On peut toucher un mot sur les liaisons parfaites (ne dissipent pas).

### 2.2 Hystérésis

Disjonction de cas : on ne rajoute pas la même équation selon que la vitesse de glissement est nulle ou pas.

On peut observer un mouvement de stick-slip (hystérésis).

#### Expérience

*Stick-slip, dispositif ENS.*

#### Illustration

*Décrire le mouvement.*

#### Calcul

*Poser les équations et résoudre au tableau. Se placer dans le référentiel du bloc. Première phase somme des forces nulles. Deuxième phase OH jusqu'à ce que la vitesse de glissement s'annule.*

#### Illustration

*Tracer position et vitesse en fonction du temps.*

## 3 - Roulement

### 3.1 Condition de roulement sans glissement

Expliciter la condition de roulement sans glissement. Dire qu'alors on a une bonne adhérence.

#### Calcul

*Exo cylindre qui roule.*

### 3.2 Effet rétro

#### Calcul

*Exercice effet rétro. Ajouter calcul dissipation énergie à la main. Phase de glissement puis phase de roulement sans glissement à vitesse constante.*

## Conclusion

Frottements dissipent, diminuent rendement mais sont bien utiles pour marcher et gagner au billard. Modélisation macroscopique faite. Ouverture sur la tribologie, étude microscopique domaine de recherche actuel.

#### Avis

*Leçon qui me plairait. Longue. Transitions pas évidentes.*

#### Remarques

*Vérifier les hypothèses à la fin des calculs. Il existe le "modèle de Tabor" en tribologie. La force de frottement ne s'oppose pas toujours au mouvement. Dissipation car on fait vibrer les atomes du réseau (phonons). Faire monter puis descendre le plan incliné pour avoir les coefficients statique puis dynamique. Effet ventouse de la pellicule d'eau sous le ski. Le Gecko a plein de petit poils au bout des pattes, ainsi les forces de VdW lui assurent une force adhésivité contre tout support. Filetage vis à bois plus incliné que filetage vis à métal car la vis frotte moins contre du métal. Exemple des mains qui chauffent possible. La puissance totale des actions de contact est négative, pour un sous-système on ne peut par contre rien dire. Lubrifier consiste à intercaler un liquide ou rendre la surface sale. Dans le cas du collage, le coefficient de frottement n'est plus défini. Couple moteur trop faible : on ne bouge pas. Couple moteur trop fort : on patine. On préfère les liaisons pivot à glissière.*

**Ce que dit le jury...**

*Illustrations possibles en mécanique des fluides. Bien définir la verticale.  
Donner des ordres de grandeurs, préciser les conditions pour négliger ces effets.  
Soigner les référentiels. Distinguer jour sidéral et jour solaire.*

**Bibliographie**

*Brasselet, Mécanique 1ère année : Très complet. Pour l'intro, la présentation des référentiels, les ordres de grandeurs, les PFD. A lire à l'envers. Phrases en italiques bien. Limite de Roche en extra.  
BFR, Mécanique 2 : Appendice très complet. Pour les degrés d'approximations.  
Fiat, Toute la physique de sup : Pour l'exo sur la chute vers l'est, les cyclones.  
Fiat, Toute la physique de spé : Pour l'exo sur l'ODG de la vitesse des vents d'un cyclone.  
Pérez, Mécanique : Pour la discussion du lavabo (chap 30, méca flu).  
Taillet, Dictionnaire de physique : Pour la date du pendule de Foucault.*

**Introduction**

La Terre n'a aucune raison d'être un référentiel privilégié. Historiquement montré par le pendule de Foucault en 1851, même si on en a des signes depuis les égyptiens (précession des équinoxes). Expliquer très brièvement.

**1 - Référentiels****1.1 - Héliocentrique (Copernic)**

Souvent considéré comme galiléen. Mais en fait non. Le PFD est alors "normal". Galiléen si on reste dans le système solaire (galaxie négligée).

**1.2 - Géocentrique**

Evoquer les saisons. Notions d'année tropique et sidérale.

**1.3 - Terrestre**

Notion de jour solaire et sidéral.

**Illustration**

*Présenter les référentiels : héliocentrique (Copernic), géocentrique et terrestre.  
Attention aux angles de l'axe de rotation de la terre et du plan orbital de la lune.  
Donner les temps caractéristiques de rotation.*

**1.4 - Approximation galiléenne**

Expliquer les différents degrés d'approximation qu'on va exposer, et les forces à rajouter. ODG poids constant et Coriolis négligeable => Galiléen si proche de la surface sur une durée négligeable devant la journée.

**Expérience**

*Illustrer limite non galiléenne sur eau en rotation.*

**2 - Effets liés à la rotation propre**

On étudie le référentiel terrestre considéré comme non galiléen par rapport au référentiel géocentrique considéré comme galiléen.

**2.1 - Ecriture du PFD****Calcul**

*Ecrire le PFD dans le référentiel terrestre. ODG hypothèse galiléenne.*

**2.2 - Définition du poids**

Expliciter la dépendance du poids avec la latitude. Définir la verticale. Préciser les contributions à la pesanteur.

**Illustration**

*Poids = Gravité + Inertie*



## 2.3 - Déviation vers l'Est

### Calcul

*Exercice du puit de 300m.*

## 2.4 - Tourbillons fluides

### Calcul

*Ordre de grandeur. Montrer que cela concerne les cyclones mais pas le lavabo.*

### Calcul

*Exercice cyclone.*

### Illustration

*Schéma cyclone (= dépression).*

Evoquer la météo avec les anticyclones (donc dans l'autre sens) et les dépressions.

### Calcul

*Exercice anticyclone, dépression en méca flu. ODG vitesse des vents au bord.*

*Attention ce calcul sort du niveau de la leçon, préciser qu'on donne aux élèves l'équation d'Euler et de la statique des fluides.*

## 3 - Effets liés à la translation

Ici le référentiel géocentrique n'est pas galiléen, donc le référentiel terrestre non plus.

### 3.1 - Terme de gravitation différentielle

#### Calcul

*Ecrire le PFD dans le référentiel terrestre. ODG terme de marée pour Lune et Soleil. ODG hypothèse galiléenne.*

### 3.2 - Marées

Faible mais effets. Bourrelets océaniques. Justifier deux marées par jour.

Marées de mortes eaux et de vives eaux. Développer si plus de temps.

#### Illustration

*Schéma bourrelet.*

## Conclusion

Galiléen ou pas est relatif à ce qu'on étudie. Sur Terre, le caractère non galiléen explique beaucoup d'effets. Touche à beaucoup de domaines, du LHC à la météo. La physique est donc chaque soir à la télévision.

Mais aussi dans les anneaux de Saturne qui nous émerveillent tous avec la limite de Roche.

#### Avis

*Leçon pas évidente mais réalisable. Etre très précis. Mémoriser le plan et les références avec précision.*

#### Remarques

*Identité entre masse grave et masse inerte. L'axe de rotation de la Terre précesse en 26000 ans à cause du couple des forces de marées de la Lune et du Soleil sur le bourrelet équatorial de la Terre, d'où la précession des équinoxes. La vitesse de rotation de la Terre diminue à cause des marées. L'orbite de la Lune fait un angle de quelques degrés avec le plan de l'écliptique. La résultante des forces est au centre seulement si la distribution de masse est sphérique. Pour d'autres astres, les marées peuvent casser des satellites trop proches, c'est la limite de Roche. La verticale est donnée par le fil à plomb et ne passe pas par le centre de la terre à priori. Le jour sidéral est la période de rotation de la terre sur elle-même. Pesanteur = gravité + inertie + déformation de la terre.*

### Ce que dit le jury...

*Penser à tous les effets indésirables d'un mauvais équilibrage. Les notions d'axes principaux d'inertie et de matrice d'inertie sont centraux. Dégager la physique dans le référentiel en rotation. Illustrer par une expérience. Ne pas faire que des calculs. Dégager les points communs et les différences entre les effets des déséquilibres statique et dynamique. Evoquer les méthodes pratiques. Ne pas oublier les conséquences des équilibrages : la réaction des paliers. Modéliser les liaisons.*

### Bibliographie

*Pérez, Mécanique : Pour la première partie, et des rappels sur la matrice d'inertie et les torseurs.*

*Chèze, Mécanique 2ème année : Pour le schéma et l'équilibrage, l'expérience, le balourd et les normes.*

*Donne aussi les équations du mouvement.*

*Agati, Mécanique du solide : Pour la différence entre statique et dynamique. Donne aussi les équations du mouvement. Exemple de la voiture.*

## Introduction

Importance technologique avec les machines tournantes.

### Expérience

*Faire tourner le dispositif sans masse, parler de symétrie de révolution. + schéma*

## 1 - Mouvement d'un solide autour d'un axe fixe

### 1.1 - Présentation du système

Schéma des notations : axes, angle, repères liés au solide et au bâti, position du centre d'inertie.

### Illustration

*Schéma du système*

### 1.2 - Equations du mouvement

Rappel sur la matrice d'inertie. T.R.C., T.M.C., bilan des inconnues et des équations. Il manque une équation.

Ecrire position, vitesse et accélération d'un point M.

### Calcul

*Ecrire les deux grands théorèmes au tableau.*

### 1.3 - Modélisation des efforts de liaisons

Dénier la liaison pivot parfaite (→ bon nombre d'équations).

Réalisation technologique (glissant, roulement, coussin d'air..).

### Illustration

*Schéma des liaisons*

### 1.4 - Exemple : volant d'inertie, KERS

Stabilité machine et stockage d'énergie. Exemple d'une formule 1 (liaison par lévitation magnétique).

### Calcul

*Volant d'inertie F1.  $M=650\text{kg}$ ,  $v_1=300\text{km/h}$ ,  $v_2=100\text{km/h}$ , acier  $\rho = 8000\text{kg/m}^3$ . On trouve  $R=10\text{cm}$ . Cela permet en sortie de virage de gagner 10% de la puissance de la voiture qui est de 800 chevaux pendant 10 secondes.* *pas de référence*

## 2 - Equilibrage statique

### 2.1 - But et intérêt

Diminuer les efforts dus aux forces sur les axes.

### Expérience

*Montrer système déséquilibré avec une masse, vibrations. + schéma*

## 2.2 - Réalisation

Exprimer la réaction sur l'axe. Interpréter comme des forces d'inertie dans le référentiel du rotor. Ramener le centre d'inertie sur l'axe. Ajouter ou enlever une ou plusieurs masses au bon endroit, en terme de distance à l'axe.

### Expérience

*Montrer en déplaçant les masses sur le dispositif. + schéma*

## 2.3 - Exemples

### Calcul

*Reprendre exemple du volant d'inertie avec 1 micromètre d'écart : exprimer la force à vitesse angulaire constante, près de 900N soit 4 fois le poids du volant d'inertie → dans boîtier résistant car danger.*

*Donner exemple d'une machine à laver à 1200tr/min qui brasse le linge avant de l'essorer, d'où durée aléatoire du programme. Si accumulée d'un côté à 15cm, 240 fois le poids du linge. D'où durée aléatoire des programmes. Montée sur amortisseur et plaque de béton pour éviter bruit et vibrations.*

## 3 - Equilibrage dynamique

### 3.1 - Insuffisance de l'équilibrage statique

R est indépendant du mouvement mais pas M. Eviter les vibrations.

### Expérience

*Montrer les vibrations. + schéma*

### 3.2 - Réalisation théorique

Faire de l'axe de rotation un axe principal d'inertie, c'est à dire annuler les produits d'inertie contenant z, et se débarrasser du moment tournant.

### 3.3 - Réalisation pratique

Ajouter au moins 2 masses ou en enlever dans des plans différents, en terme de symétrie de révolution.

### Expérience

*Montrer en déplaçant les masses sur le dispositif que ça ne vibre plus. + schéma*

### 3.4 - Exemple roue de voiture

### Calcul

*Exemple donné dans le Agati. Statique puis dynamique.*

### 3.5 - Equilibrage industriel

Donner définition du balourd, réalisation industrielle, et normes avec ODG.

## Conclusion

Importance de la symétrie de révolution. Possibilité de stockage d'énergie. Importance technologique. Exemple vibreur téléphone portable. Ouverture vers le changement de direction de rotation et l'effet gyroscopique où l'on ressent une force quand on change la direction de rotation.

### Avis

*Leçon de mécanique où la logique de progression et les notations sont à soigner.*

### Remarques

*Si un mouvement de pivotement/roulement est possible autour d'un axe, le moment de pivotement/roulement est nul, si on néglige les frottements de pivotement/roulement. Equilibrage statique = centre de gravité sur l'axe. Equilibrage dynamique = Axe de rotation devient axe propre d'inertie, produits d'inertie nuls, et du coup on annule la dépendance en  $\theta$  de  $\vec{M}$  ce qui permet de le maîtriser. Dynamique => Statique. Vibreur téléphone portable = exemple de déséquilibre. Parler des symétries. On ne connaît pas la matrice d'inertie a priori. Préciser les moments cinétiques par rapport à quel point et dans quel référentiel. On ne peut pas toujours tout illustrer sur l'expérience selon le système à disposition.*

### Ce que dit le jury...

Les candidats ignorent trop souvent les principes de fonctionnement et les performances des gyroscopes modernes. Les hypothèses de l'approximation sont très rarement énoncées clairement et encore plus rarement vérifiées dans le traitement des applications. L'équation de précession est un concept utile. Une illustration expérimentale aide à faire passer le message de cette leçon. Il faut prévoir assez de temps pour traiter le domaine microscopique. Le moment cinétique et le vecteur rotation ne sont a priori pas colinéaires. L'aspect paradoxal peut être évoqué. Pour la résonance magnétique nucléaire, il faut décrire soigneusement le dispositif, dégager l'origine physique du mot résonance et préciser la nature du signal détecté. Le magnétisme atomique ne peut pas être limité au magnétisme orbital. Il est important de souligner à la fois le caractère constant du module du moment cinétique et celui de sa projection sur la direction d'action de la force appliquée. Montrer l'unité de la leçon. Les gyroscopes employés pour l'illustration expérimentale du sujet sont souvent sous-utilisés et ne sont pas lancés suffisamment fort pour qu'effectivement l'approximation gyroscopique soit valable.

### Bibliographie

*Pérez, Mécanique* : Pour les angles d'Euler, les équations d'Euler, le gyroscope équilibré, stabilité trajectoire, rotation de la Terre, précession, équinoxes, pour le modèle de Bohr.

*BFR, Mécanique 2* : Pour des compléments.

*Radix, Aspects modernes des gyroscopes - BUP 587* : Pour les aspects modernes.

*Boutigny, Mécanique* : Pour les angles d'Euler, la symétrie de révolution.

*Taillet, Dictionnaire de physique* : Pour la précession des équinoxes.

*Cohen-Tannoudji, Mécanique quantique (tome 1)* : Pour la RMN.

## Introduction

Six degré de liberté en général. Ici gyroscope (peu de frottement, symétrie de révolution, axe privilégié).

## 1 - Mouvement d'une toupie

### 1.1 - Angles d'Euler

#### Illustration

Présentation des référentiels et des notations (précession, nutation, rotation propre). Expliquer les noms des angles.  $R_0$  (labo),  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  (solide). Expression du vecteur rotation.

### 1.2 - Symétrie de révolution

Exprimer le vecteur rotation et la matrice d'inertie dans  $R_2$  (=Repère de Résal).

### 1.3 - Equations d'Euler du mouvement

#### Calcul

Ecrire les équations d'Euler dans  $R_2$ .

référence partielle

### 1.4 - Approximation gyroscopique

Enoncer avec le moment cinétique, en déduire la condition sur les vitesses de rotation en supposant que les trois composantes de la matrice d'inertie ont le même ODG (forme trapue).

#### Calcul

Approximer le vecteur rotation et le vecteur moment cinétique qui dans ce cadre sont colinéaires. Simplifier l'équation vectorielle du mouvement, car le terme de dérivation par rapport au repère du solide devient nul.

référence partielle

## 2 - Gyroscope équilibré

### 2.1 - Direction fixe

Soumis au poids, et centre de masse coïncide avec point de contact. Liaisons parfaites. Moment nul.

## Calcul

*On montre que la direction de  $L$  est constante.*

## Expérience

*On illustre ça en baladant le gyroscope (sans masse et non fixé).*

## 2.2 - Couple gyroscopique

C'est le moment que le gyroscope exerce sur son support lorsqu'il change de direction.

## Expérience

*Illustrer avec tabouret d'inertie et roue de vélo.*

## 2.3 - Applications

Stabilisation de trajectoire, mise en évidence de la rotation de la Terre, anti-roulis. ODG. Aspects modernes.

# 3 - Gyroscope non équilibré

## 3.1 - Mouvement de précession

## Expérience

*On fabrique une toupie en ajoutant une masse sur la gyroscope. Il précesse. Montrer la nutation au passage.*

## Calcul

*Le couple du poids n'est plus nul. Equation de précession. ODG et vérification de la vitesse de précession.*

## 3.2 - Effet paradoxal

## Expérience

*Enlever la masse et expliquer la précession comme effet paradoxal dû à la pesanteur.*

Application aux hélicoptères : on incline les pales sur le côté pour aller vers l'avant (ou l'arrière).

## 3.3 - Précession des équinoxes

Dire ce qu'est qu'une équinoxe et faire l'application numérique.

# 4 - Domaine microscopique

## 4.1 - Précession d'un moment magnétique

## Calcul

*On a une analogie formelle avec un spin et un champ  $B$ . On vérifie pour un électron que ça marche. Ne pas confondre spin noyau et spin orbital électronique.*

## 4.2 - Application à la RMN

## Expérience

*Illustration qualitative en tournant le tabouret d'inertie en mode toupie pour expliquer l'effet des champ statique (pesanteur) et tournant (qu'on applique nous même). Observer résonance et relaxation. Donner des ODG.*

# Conclusion

Il y a des limites à cette analogie qui est surtout formelle, états quantiques étant une superposition linéaire d'états propres.

## Avis

*Penser à mettre des ODG. Leçon pas simple, éviter les calculs.*

## Remarques

*Hélicoptères et effet paradoxal. Montrer la précession et la nutation. La direction constante n'est pas un effet gyroscopique, en revanche sa stabilité oui. Le canon à fusil rayé stabilise la trajectoire de la balle (comme passe au rugby). Si on applique un couple à faible vitesse on sort de l'approximation. Gyroscope + masse = toupie. Eviter la précession des équinoxes, trop dur.*

**Ce que dit le jury...**

Le titre est général. Les *lois de conservation* sont à illustrer absolument et la physique est généreuse en exemples variés. Les exemples les plus pertinents sont ceux où les deux corps sont de masses comparables. Il est très maladroit d'insister sur des illustrations où il n'y a pas de *conservation simple*. Il existe d'autres exemples que les interactions newtoniennes. La distinction entre le mouvement d'ensemble et le mouvement barycentrique est fondamentale. L'introduction de la *particule fictive* ne se fait pas au hasard, il faut montrer l'équivalence du problème réel avec ce modèle, et cela constitue le point clé de la leçon. La confrontation du modèle aux résultats expérimentaux est nécessaire (en astronomie ou en spectroscopie de l'atome d'hydrogène par exemple). Les trajectoires fermées ne sont pas possibles pour tout type de potentiel central. On ne doit pas se complaire dans les calculs en fournissant un catalogue de vecteurs constants. Ne pas utiliser les formules de Binet. Les applications peuvent ne pas être restreintes au potentiel en  $1/r$ . Bien mettre en évidence la notion d'*intégrale première du mouvement*. Il convient de préciser correctement les *hypothèses* faites : il n'existe pas que des forces centrales dans la nature, la loi de l'action et de la réaction ne s'applique pas automatiquement. Il est erroné d'affirmer que toutes les trajectoires résultant de l'interaction entre deux corps sont des courbes fermées, et encore plus que ce sont des coniques. Justifier les hypothèses de la réduction au cas de deux corps ponctuels et des forces centrales. Pour déduire de la conservation du moment cinétique le caractère plan des trajectoires, l'argument  $r$  perpendiculaire à  $L$  suffit. Insister sur les lois de Kepler plutôt que sur les formules de Binet. Montrer que l'expression des lois de la mécanique dans le référentiel barycentrique fait apparaître la masse réduite, et conduit à une équation différentielle pour le vecteur position relative  $r$ . Il faut montrer comment interviennent les lois de conservation, au moins pour la *quantité de mouvement*, le *moment cinétique* et l'*énergie mécanique*.

**Bibliographie**

*Pérez, Mécanique* : Pour la fusée, l'introduction, le problème de Kepler, le choc.  
*Feynmann, Mécanique 1* : Pour la roue de vélo.  
*Garing, Les 1001 questions de la physique en classe prépa PCSI* : Pour le saut à la perche.  
*Fiat, Toute la physique de SUP* : Pour la fusée aussi.  
*BFR, Mécanique 1* : Pour les collisions.  
*Brasselet, Mécanique 1ère année* : Pour les collisions aussi.  
*Dangoisse, Les lasers* : Pour le refroidissement des atomes.

**Introduction**

Aspect historique de recherche de grandeurs qui se conservent.

**1 - Grandes lois de conservation****1.1 - Conservation de la quantité de mouvement****Calcul**

Faire l'exercice de la fusée en mode rapide.

**1.2 - Conservation du moment cinétique****Expérience**

Expérience du tabouret et de la roue de vélo et explication.

**1.3 - Conservation de l'énergie**

Ici énergie mécanique d'un système isolé.

**Calcul**

Exercice du saut à la perche puis discussion possibilité record du monde.



## 2 - Problème de Képler

### 2.1 - Position du problème

#### Illustration

*Poser des notations.*

Donner des exemples de forces centrales conservatives (ressort, gravité, électrostatique).

### 2.2 - Conservation du moment cinétique

#### Calcul

*Démontrer la conservation. Dédurre trajectoire plane et loi des aires.*

### 2.3 - Conservation de l'énergie

#### Calcul

*Énergie potentielle effective.*

#### Illustration

*Allure de la trajectoire : état de diffusion, état lié, trajectoire circulaire.*

## 3 - Collisions

### 3.1 - Position du problème

Définition d'un choc.

#### Illustration

*Schéma de la collision envisagée.*

### 3.2 - Conservations

#### Calcul

*Lister le nombre d'inconnues et d'équations.*

Définir choc élastique et inélastique.

### 3.3 - Hypothèse de la collision élastique

Parce qu'il manque des équations, on fait une hypothèse qui revient à une conservation de l'énergie.

#### Calcul

*Application au pendule de Newton (astuce calcul : identité remarquable).*

*pas de référence*

### 3.4 - Limites

On voit qu'en fait ça s'arrête.

On a donc pas tenu compte de tous les effets dans notre modèle : bruit, vibrations, dissipation, perte d'énergie.

### 3.5 - Refroidissement laser

#### Calcul

*Bilan et discussion.*

## Conclusion

Ces lois ont par exemple prévu l'existence de nouvelles particules (neutrino).

Limite relativiste de la loi de conservation, il faut redéfinir énergie et impulsion.

Théorème de Noether et autre formalisme.

#### Avis

*Bien mettre en avant l'intérêt des méthodes par conservation par rapport à une résolution analytique.*

#### Remarques

*Compter inconnues, équations, contraintes.*

*Noether pour le lien entre invariances et grandeurs conservées. Utilité des intégrales premières.*

*Translation et rotation. Mettre en parallèle avec le PDF*

**Ce que dit le jury...**

*Cette leçon exige une grande rigueur dans l'exposé tant sur les notions fondamentales de relativité restreinte que sur les référentiels en jeu. Elle invite les étudiants à faire ressortir les limites de l'approche classique. Un exposé clair de la notion de composition des vitesses et de ses propriétés est incontournable dans cette leçon. Les notions de dilatation du temps et contraction des longueurs doivent être discutées. Cette leçon exige une grande rigueur et pédagogie. Ne pas démontrer la transformation de Lorentz-Poincaré. La notion d'événement est un outil central. Les principes de la relativité restreinte doivent être énoncés de manière complète et précise. Les notions de durée ou de longueur propres ne prennent tout leur sens qu'en envisageant les phénomènes de contraction et dilatation. La description d'expériences ou d'applications mettant en jeu ces notions permet de rendre le contenu de cette leçon plus concret. Applications réalistes à rechercher. Cette leçon est en général trop formelle. Ordres de grandeur bienvenus.*

**Bibliographie**

*Pérez, Relativité et invariance : Pour toute la leçon.*

*BFR, Mécanique 1 : Pour toute la leçon aussi.*

*Taillet, Dictionnaire de physique : Pour des infos en plus, historiques et pratiques.*

*Gaidot, Cinématique relativiste; une approche physique - BUP 945 : Pour une autre vision et quelques commentaires.*

**Introduction**

Problème de compatibilité entre mécanique classique et électromagnétisme. Théorie où les définitions sont profondément liées à la mesure.

**1 Insuffisance de la théorie classique****1.1 - Transformation de Galilée**

Hypothèse d'espace homogène et isotrope, de temps uniforme et absolu, postulats de la relativité galiléenne.

Relativité restreinte car référentiels galiléens.

Énoncer du principe de relativité de Galilée.

**Illustration**

*Notion de référentiel et d'événement. Exemple transformée de Galilée.*

Ainsi les accélérations sont égales et le principe d'inertie est vérifié. Pas de référentiel privilégié, d'où le terme de relativité.

**1.2 - Incompatibilité avec l'électromagnétisme**

La vitesse de la lumière est indépendante du référentiel, d'après les équations de Maxwell. Deux possibilités :

- Il existe un référentiel "ester" privilégié.

- La transformation de Galilée est fautive.

**1.3 - Expérience de Michelson-Morley (1887)**

Expérience pour mesurer la vitesse de la Terre par rapport à l'éther.

**Calcul**

*Calcul type interféromètre.*

Résultat toujours négatif, et toujours de mieux en mieux vérifié. On abandonne la relativité galiléenne.

**2 - Bases de la relativité restreinte****2.1 - Postulats**

Énoncer les trois postulats (Lois physiques, vitesse de la lumière, limite classique) de la relativité restreinte.

**2.2 - Transformation de Lorentz**

Donner la transformation de Lorentz en discutant les quantités gamma et béta. Inverser les relations revient à inverser le signe de la vitesse. Écriture matricielle homogène possible.



## 2.3 - Composition des vitesses

### Calcul

*Démontrer la composition des vitesses selon les axes parallèles et perpendiculaires.*

## 2.4 - Expérience de Fizeau (1851)

### Illustration

*Ceci permet d'expliquer l'expérience historique de Fizeau.*

### Calcul

*Faire le calcul de la composition des vitesses et voir que le dernier terme est négligeable, et qu'on retrouve le résultat de Fizeau. référence partielle*

## 3 - Conséquences de la cinématique relativiste

### 3.1 - Perte de la simultanéité

Par linéarité de la transformation de Lorentz, on peut l'écrire pour des intervalles. Ainsi on remarque la non-simultanéité des événements.

### 3.2 - Dilatation du temps

#### Calcul

*Démontrer la formule. Notion de durée propre. Illustrer sur l'exercice classique des muons dans l'atmosphère. Expliquer pourquoi on les détecte au sol. On peut le rendre plus pédagogique en faisant le calcul avec la désintégration dans le mauvais puis le bon référentiel, en trouvant trop peu puis le bon nombre de muons détectés.*

### 3.3 - Contraction des longueurs

#### Calcul

*Démonstration et notion de longueur propre. Un train qui va très vite peut-être contenu dans le tunnel.*

### 3.4 - Invariance de l'intervalle

Dire qu'en fait rien n'est relatif mais que le pseudo-produit scalaire de quadrivecteurs est conservé. Dire un mot sur la métrique plane utilisée ici. Il y a donc bien plus d'invariance que de relativité.

#### Illustration

*Diagramme passé/futur ; ici/ailleurs. Notion de causalité. Cône de lumière et espace-temps.*

## Conclusion

Vers la dynamique relativiste, redéfinition de l'impulsion et quadrivecteurs dans l'espace-temps. Ici relativité restreinte, il existe relativité générale. Phénomènes nouveaux et avec déjà de nombreuses applications.

### Avis

*Reprise d'une leçon présentée par Jules et jugée de bonne qualité. Pédagogie indispensable.*

### Remarques

*GPS : Si on ignore RR/RG, alors erreur de 1,5/1m.*

*RG = influence du potentiel gravitationnel.*

*Dans les postulats, on renonce au temps absolu.*

*On peut montrer qu'on retrouve la transformation de Galilée dans les faibles vitesses.*

*Transparents : changement de référentiel, michelson-morley, fizeau, simultanéité, muons, contraction des longueurs, dilatation des durées, conservation de l'intervalle.*

**Ce que dit le jury...**

*La forme plus complexe des lois de la dynamique peuvent rendre les exemples choisis très techniques. Il convient de choisir des illustrations simples où les effets relativistes apparaissent rapidement. L'étude des collisions peut bien évidemment entrer dans le cadre de cette leçon. Ne pas oublier que les lois de conservation sont également un outil de découverte de particules nouvelles, indétectables directement (neutrino). Analyser en profondeur. Diversifier les exemples traités. L'intérêt du référentiel barycentrique dans l'évaluation du seuil de réaction (collision inélastique) n'apparaît pas toujours clairement. Des exemples contemporains sont appréciés. Il faut savoir faire la différence entre invariance et conservation. Exemples empruntés à la physique des particules. La diffusion de Rutherford ne constitue pas une bonne illustration de cette leçon par exemple. Notion de quadrivecteur. Il est souvent inutile de projeter la relation de conservation de la quantité de mouvement (par exemple pour étudier l'effet Compton). L'énergie de seuil est une notion importante qu'il est nécessaire de présenter. L'effet Compton ne constitue pas une application à l'étude des noyaux ou des particules élémentaires. L'exposé ne doit pas se limiter aux calculs mais doit comporter des exemples variés. La chambre à fils mérite d'être citée. La définition générale de la section efficace doit être connue des candidats. L'utilisation des lois de conservation ne suffit pas forcément à déterminer tous les paramètres d'une collision. On peut évoquer l'intérêt de la physique des particules.*

**Bibliographie**

*Pérez, Relativité et invariance : Pour toute la leçon.  
BFR, Mécanique 1 : Pour toute la leçon aussi.  
Cagnac, Physique atomique : Pour les accélérateurs, l'effet Compton aussi.  
Gié, Mécanique 1 : Pour les particules accélérées et les accélérateurs.  
Hladik, Introduction à la relativité restreinte : Pour des compléments.  
Taillet, Dictionnaire de physique : Pour les accélérateurs.*

**Introduction**

On a vu la cinématique descriptive, maintenant dynamique prédictive.

**1 - Principes de la dynamique relativiste****1.1 - Quadrivecteur énergie-impulsion****Calcul**

*Construction du quadri-vecteur vitesse, du quadri-vecteur énergie-impulsion, sans préciser vraiment la nature de la composante temporelle.*

Interpréter la composante temporelle comme l'énergie. Etablir la relation d'Einstein.

**1.2 - Principe fondamental de la dynamique****Calcul**

*Par analogie, construire le nouveau PFD en posant ou démontrant la quadri-force à partir de la quadri-accélération.*

**1.3 - Lois de conservation**

Discuter énergie de masse avec ODG.

Discuter énergie cinétique et vitesse limite.

On ajoute donc un nouveau terme dans la loi de conservation de l'énergie.

Rappeler ce qu'est le référentiel du centre de masse.

Donner des ODG.

Dire que maintenant ce sont les quadrivecteurs qui sont conservés.

## 2 - Collisions

### 2.1 - Collision élastique : effet Compton

#### Calcul

*Faire la démonstration et commenter.*

### 2.2 - Collision inélastique : énergie de seuil d'une création d'une paire électron/positron

#### Calcul

*Faire la démonstration et discuter. Le réservoir d'énergie cinétique est l'énergie de masse. Bien discuter le passage au centre de masse : l'énergie seuil est bien minimale dans le référentiel du centre de masse, c'est donc là qu'il faut la calculer. Bien dégager l'intérêt du référentiel barycentrique.*

## 3 - Mouvement des particules chargées

### 3.1 - Particule dans un champ électrique

#### Calcul

*Résoudre l'équation du mouvement. ODG.*

#### Illustration

*Application à l'expérience de Bertozzi. Montrer courbe classique, relativiste et expérimentale. Notion de vitesse asymptotique retrouvée.*

### 3.2 - Particule dans un champ magnétique

#### Calcul

*Résoudre l'équation du mouvement. S'arrêter à l'équation de précession, et dire que c'est exactement comme en classique avec  $m$  remplacé par  $\gamma m$ .*

### 3.3 - Application aux accélérateurs

#### Illustration

*Montrer les images du CERN du CD et discuter les découvertes récentes (Higgs, modèle standard), l'utilité de la recherche.*

## Conclusion

Ouvrir sur la recherche de l'infiniment petit.

#### Avis

*Leçon longue.*

#### Remarques

*Charpak et chambre à fils.*

*Pourquoi veut-on absolument garder la conservation de l'énergie et de l'impulsion pour un système isolé : la réponse attendue étant que les symétries de translation/renversement dans le temps et espace existent encore en relativité.*

*Équivalence masse-énergie, on peut récupérer l'énergie de masse sous une autre forme.*

*Intérêt de la notion de quadrivecteur.*

*Généralisation des résultats de mécanique classique.*

**Ce que dit le jury...**

*Écoulement de Poiseuille cylindrique pas le plus riche. Mécanismes de dissipation dans un fluide. Notion de viscosité. Les conditions aux limites imposées à un fluide s'écoulant autour d'un obstacle solide doivent être justifiées. L'interprétation énergétique de la relation de Bernoulli est très mal connue. Caractère diffusif des forces de viscosité. Pour couette plan, s'assurer que l'on a atteint un régime permanent. La signification physique du nombre de Reynolds est centrale. Les conditions d'applications de l'équation de Navier-Stokes sont ignorées. Relation entre la valeur du nombre de Reynolds et la nature de l'écoulement. Confusion entre tourbillon et turbulence. Présenter un modèle microscopique simple de la viscosité. Le nombre de Reynolds s'interprète comme le rapport de deux temps caractéristiques de transport par diffusion et convection. La notion de couche limite peut être évoquée. L'illustration expérimentale ne saurait se limiter à regarder tomber une bille dans un tube rempli de glycérine. Concept de libre parcours moyen et ordres de grandeur associés. Une étude énergétique serait la bienvenue.*

**Bibliographie**

*Guyon, Hydrodynamique Physique : Pour l'interprétation du nombre de Reynolds, adimensionnement, un peu tout.*

*Renvoizé, Physique PC/PC\* : Pour des compléments, l'écoulement de Couette plan, NS aussi.*

*Fiat, Toute la physique de SPE : Pour les forces de viscosité, Poiseuille, etc.*

*Pérez, Mécanique : Pour les ODG de viscosité.*

*Pérez, Thermodynamique : Pour la démonstration de la viscosité d'un gaz.*

*Taillet, Dictionnaire de physique : Pour un mot sur la couche limite.*

**Introduction**

Le modèle du fluide parfait n'explique pas tout -> viscosité. On se limite aux fluides incompressibles.

**Expérience**

*Deux ampoules à décanter identiques glycérol'eau.*

*pas de référence*

**1 - Notion de viscosité****1.1 - Force de viscosité****Illustration**

*Modélisation de la force de viscosité d'après observations expérimentales.*

Composante tangentielle de la force de contact. ODG pour différents fluides.

**1.2 - Modélisation microscopique****Calcul**

*Retrouver l'expression de la force de viscosité à l'aide d'un modèle simple dans le cas des gaz, pour interpréter microscopiquement comme un phénomène de diffusion de quantité de mouvement.*

**1.3 Facteurs de dépendance****Calcul**

*Déduire que  $\eta \propto \sqrt{T}$  pour un GP. ODG pour l'air.*

Pour les liquides ((chauffer de l'huile) c'est le contraire. Cas des fluides non newtoniens à évoquer.

**2 - Dynamique des écoulements visqueux****2.1 - Résultante volumique des forces de viscosité**

On veut appliquer le PFD sur une particule mésoscopique de fluide.

## Calcul

*Démonstration de la force volumique. PFD sur particule mésoscopique => équation de diffusion.*

Viscosité d'un fluide = phénomène de diffusion de quantité de mouvement. Viscosité cinématique = coefficient de diffusion. La diffusion tend à homogénéiser le champ de vitesse et est un phénomène dissipatif.

## 2.2 - Équation de Navier-Stokes

### Calcul

*Démontrer avec soin. Discuter inconnues, équations. NL => CL.*

## 2.3 - Nombre de Reynolds

### Calcul

*Adimensionner NS => nombre de Reynolds.*

Interprétation : compétition convection/diffusion, rapport de flux et rapport de temps.

Régimes d'écoulement selon Re : notion d'écoulement laminaire et turbulent.

### Expérience

*Expérience eau colorée et ODG (ou banque d'images).*

Intérêt d'un nombre sans dimension (maquette).

## 3 - Exemples d'écoulements visqueux

### 3.1 - Ecoulement de Couette plan

Présentation. Origine de l'écoulement : mouvement de la plaque supérieure.

#### Calcul

*Bilan inconnues/équations. Géométrie de l'écoulement => champ de vitesse tel que termes convectifs nul (mais Re pas forcément faible). Cas du régime permanent, résolution avec les CL : on donne  $v$  et  $P$  (sachant  $\rho$ ). On a entièrement résolu le problème. Tenter un bilan de puissance.*

### 3.2 - Ecoulement de Poiseuille cylindrique

Présentation. Origine de l'écoulement : différence de pression appliquée entre les deux extrémités du tube.

#### Calcul

*Bilan inconnues/équations. NS en cylindrique. Intégration avec les CL => profil de vitesse (la pression est inconnue car imposée). Détermination du débit volumique => loi de Poiseuille. Application au sang.*

## 4 - Couche limite

Illustrer et discuter si temps. Détermination de l'épaisseur de la couche limite : ODG terme de convection = ODG terme diffusion.  $\delta = \frac{L}{\sqrt{Re}}$  où  $\Re = \frac{\rho v L}{\eta}$ .

## Conclusion

Ouvrir sur la notion de couche limite.

### Avis

*Adapté du plan d'Albane.*

### Remarques

*Fluide incompressible => écoulement incompressible. Fluide newtonien = lien contrainte et déformation linéaire. Fluides particuliers sont notamment mises à profit dans l'agroalimentaire, les cosmétiques et les peintures. Dans le cas général (non incompressible), il existe des contraintes normales. La comparaison du nombre Re à une valeur critique sépare fondamentalement les régimes visqueux et inertiel, et non pas laminaire et turbulent. Le modèle microscopique est ok pour les gaz, pour les liquide il existe Eyring. Bilan : NS + div=0 + rho=Cte donne 5 équations, d'où 5 CL. Densité liquide =  $10^{28}$  et densité gaz =  $10^{25}$ . Etre très rigoureux avec toutes les hypothèses/modèles. Autres nombres sans dimension existent (Guyon).*

**Ce que dit le jury...**

La notion de *viscosité* peut être supposée acquise. L'essentiel de l'exposé doit porter sur les *fluides newtoniens*. Il importe de mettre clairement en évidence le caractère *diffusif* des forces de *viscosité*. Dans l'*illustration expérimentale* de l'écoulement de Couette plan, il faut s'interroger si l'on est en régime permanent. Il est difficile de bien dégager la physique du modèle de l'écoulement parfait et de ses limites sans faire appel à la notion de viscosité. Les *conditions aux limites* imposées à un fluide s'écoulant autour d'un obstacle solide doivent être justifiées. L'interprétation énergétique de la relation de *Bernoulli* est très mal connue. Les différences entre *fluidécoulement parfait* et *fluidécoulement incompressible* sont parfois méconnues. L'équation d'Euler ne constitue pas le sujet central de la leçon. Présenter des *illustration concrètes*.

**Bibliographie**

Guyon, *Hydrodynamique physique* : Pour l'adimensionnement de NS, les différents nombres.  
 Renvoizé, *Physique Pc/PC\** : Pour un peu tout, complet sur la mécanique des fluides.  
 Pérez, *Mécanique* : Pour beaucoup de chose aussi.  
 Fiat, *Toute la physique de SPE* : Pour aider.  
 Taillet, *Dictionnaire de physique* : Pour aider.  
 Chassaing, *Mécanique des fluides* : Pour NS adimensionné.

**Introduction**

NS = PFD sur particule de fluide et problème du millénaire. Voir comment on peut faire des simplifications et résoudre certains problèmes. On va simplifier le modèle par des ODG en gardant les termes prépondérants.

**Expérience**

Récipient château d'eau qui se vide, pas besoin de tout connaître pour avoir la vitesse de sortie ? *pas de référence*

**1 - L'écoulement parfait d'un fluide**

**1.1 - L'équation de Navier-Stokes adimensionnée**

**Calcul**

Rappel de NS. On suppose vitesse, temps, et longueur caractéristiques. Cadre où on impose *pas la pression*. *pas de référence*  
 Grandeurs adimensionnées (vitesse, position, temps, [pression]). Faire apparaître nombres de Strouhal (instationnarité/inertiel), de Froude (inertie/gravité) et Reynolds (inertie/viscosité).

Trois nombres identiques => écoulement identique. Ecoulement parfait = non visqueux = grand Reynolds. ODG sortir la tête sur l'autoroute (Re=10<sup>7</sup>) et verser de l'huile pour faire des pâtes (Re=1).

**1.2 - La différence entre fluide parfait et écoulement parfait**

**Illustration**

Fluide parfait = viscosité nulle. Ecoulement parfait = Reynolds tend vers l'infini.

Euler pour les deux mais fluide parfait n'est pas la limite continue du fluide réel. En effet les conditions aux limites (tangentielles) sont différentes, et donc les solutions sont différentes. On néglige donc les transferts thermiques (T=Cte et S=Cte). Dans quelle limite c'est vrai ? Loin c'est parfait, dedans laminaire ou turbulent.

**1.3 - La notion de couche limite**

Le nombre de Reynolds donne une réponse en fournissant un ODG de la couche limite, couche où les effets de viscosité ne sont pas négligeable pour un fluide réel. Construction de l'épaisseur de la couche limite par analyse dimensionnelle. Interprétation de la racine carré comme diffusion de quantité de mouvement. ODG voiture (1mm) et ventilateur (1cm).

**Illustration**

Schéma champ vitesse et voiture, tracer ensuite la courbe en racine de x.



## 2 - Les relations de Bernouilli : limites et applications

### 2.1 - Le théorème de Bernouilli

#### Calcul

*Le modèle est posé. On écrit et simplifie l'équation d'Euler pour un écoulement incompressible, permanent et parfait. On réécrit avec le rotationnel. On intègre le long d'une ligne de courant et on abouti à Bernouilli.*

On vient de trouver une grandeur conservative. On l'interprète en terme énergétiques.

#### Expérience

*Prévoir la vitesse de sortie (2m/s). Vérifier expérimentalement en mesurant le temps de remplissage d'un volume donné (490mL). Discuter l'écart : vitesse de sortie non uniforme, tension superficielle, Reynolds et couche limite. On vérifie : diamètre tube=0,6 mm, longueur tube=4,2 cm avec  $Re=10000$  et  $\delta = 0,14\text{mm}$  => écoulement parfait ok mais vitesse pas homogène sur une section.*

### 2.2 - Effet Venturi

#### Expérience

*Mesure de la dépression créée par un trompe à eau (50mBar).*

#### Illustration

*Illustrer sur un schéma le principe.*

On suppose les hypothèses vérifiées cette fois.

#### Calcul

*Démonstration avec Bernouilli et conservation du débit volumique.*

Analogie avec des personnes qui sortent d'une salle en feu par un couloir étroit. Cavitation.

### 2.3 - Considérations d'un autre ordre

Dates des équations : Bernouilli (1738), Euler (1755), NS (1822). Donc Bernouilli pas déduit des maths.

#### Calcul

*Bilan énergétique mécanique complet sur un tube de courant pour aboutir à Bernouilli qu'on interprète en terme d'enthalpie mécanique. D'ailleurs lien avec la mécanique dans la première expérience.*

### 2.4 - Effet Magnus

#### Illustration

*Vidéo but sur coup franc (chercheur brésiliens l vidéo). Mécanique : trajectoire parabolique. Ici pas le cas, effet Magnus. Explication qualitative avec Bernouilli de pourquoi la rotation entraîne le ballon dans son sens. Après expérience : parfois dangereux : décollage d'une F1 (vidéo).*

#### Expérience

*Application à la soufflerie et à une aile d'avion et/ou d'une feuille.*

## Conclusion

Bernouilli ok si forces de pression et de pesanteur seulement. Couche limite. Analogie mécanique.

#### Avis

*Reprise d'une super leçon d'Helmy, mais à la bilbio pas simple. Calculs à retrouver à droite à gauche.*

#### Remarques

*Bernouilli => approximation pseudo-1D. Normalement la viscosité intervient pour Magnus. Dans la couche limite, pas de variation de pression orthogonale à l'écoulement, donc Pitot marche. Ecoulement parfait = Reynolds grand mais pas trop pour pas de turbulence en volume, juste couche limite. Si turbulent, il existe différentes échelles locales. Dans Poiseuille  $Re=0$ , pas vraiment de sens. Bien de faire ressortir les trois nombres de NS adimensionnés. Bernouilli peut aussi s'appliquer sur une ligne de vorticité. On peut élargir sur les fluides barotropes et les écoulements rrotationnels. Helium 3 superfluide existe.*

**Ce que dit le jury...**

*Le lien avec les potentiels thermodynamiques n'est pas souvent maîtrisé. Il est important de dégager clairement l'origine microscopique du phénomène. La force de tension superficielle est très mal décrite et comprise, elle permet pourtant d'interpréter de nombreux résultats de façon simple et concrète. L'étude énergétique de l'interface doit s'appuyer sur une thermodynamique rigoureuse, où les systèmes et transformations étudiés sont définis avec une grande précision.*

**Bibliographie**

*Gennes, Gouttes, bulles, perles et ondes : Pour l'interprétation microscopique, la vision mécanique, le mouillage, Rayleigh-Taylor aussi.*

*Pérez, Thermodynamique : Pour la loi de Laplace. Guyon, Hydrodynamique physique : Pour la lubrification, les ondes de surface.*

*Fermigier, Hydrodynamique physique : Pour l'instabilité de Rayleigh-Taylor.*

**Introduction**

Importance de la tension de surface : analogie trombone et insecte sur eau. Coule si tensioactifs/polluants.

**1 - Statique des interfaces****1.1 - Approche microscopique de la tension superficielle****Illustration**

*Schéma de l'interaction entre les molécules (avec et sans tensioactifs).*

**Calcul**

*Estimation de l'ordre de grandeur de la tension superficielle. Grand pour eau car interactions de VdW.*

**Expérience**

*Trombone qui flotte puis coule avec du savon*

Explication du pourquoi ça coule (molécules de tensioactifs remplacent molécules d'eau).

**1.2 - Tension superficielle : une énergie superficielle et une force capillaire****Expérience**

*Faire des bulles, c'est rond.*

Le système minimise son énergie. Définition mécanique. Attention pour un fil on a deux interfaces.

**Expérience**

*Energie de surface : Faire un trou dans le cadre avec fil : forme un cercle.*

**Expérience**

*Force par longueur : Cadre tiré par l'interface.*

**1.3 - Application : loi de Laplace et de Jurin**

Conséquence de la tension superficielle : surpression à l'intérieur des bulles.

**Calcul**

*Démonstration de la loi de Laplace et Jurin à partir de l'énergie.*

**Expérience**

*Conclusion : les petites bulles se vident dans les grosses, l'eau monte dans les capillaires. ODG eaulair. Vidéo et illustrations CD possible.*

Généralisation sans démonstration.

**2 - Dynamique des interfaces**



## 2.1 - Approximation de lubrification

En fait, cas d'un écoulement parallèle, ce qu'on approxime dans le cas d'une surface.

### Calcul

*Expliquer la démarche (ou faire sur transparent) et donner simplement le résultat sans oublier la pesanteur. Dire que l'instationnarité sera à voir au cas par cas.*

## 2.2 - Instabilité de Rayleigh-Taylor

### Illustration

*Schéma de la situation.*

### Calcul

*Calcul du cas non déformé et déformé. Différence et déduction de la stabilité. Aboutir à la longueur capillaire. Discuter aussi la taux de croissance (donner la logique de calcul et le résultat car beaucoup trop long) pour justifier la longueur d'onde qui se développe.*

## 2.3 - Ondes de surface

### Calcul

*Faire la démonstration de la relation de dispersion. Discuter les différents type d'ondes et l'effet de déferlement.*

# 3 - Mouillage

## 3.1 - Notion de mouillage

### Expérience

*Montrer divers cas.*

### Illustration

*Schéma loi d'Young.*

Donner la loi d'Young. Discuter matériau hydrophile, hydrophobe et angles d'avancée et de reculée.

## 3.2 - Cas des surfaces texturées

### Illustration

*Modèle de Wenzel.*

### Calcul

*Modèle de Wenzel.*

### Illustration

*Modèle de Cassie-Baxter.*

### Calcul

*Modèle de Cassie-Baxter.*

Discuter les effets de la rugosité et les hypothèses à chaque fois.

# Conclusion

Ouverture sur le rôle de la capillarité à prendre en compte dans toute la micro et la nano-fluidique, qui sont des thèmes de recherche actuels.

### Avis

*Leçon présentée par Sandrine et Emmanuel, jugée excellente pendant l'année.*

### Remarques

*Savoir démo de Laplace. Démontrer Young par approche énergétique. Si  $\Delta\epsilon_V > \Delta\epsilon_S$ , mélange. Sucre dans café, Jurin, 3 interfaces. Réfléchir sur l'énergie libre. Divergence de la vitesse nulle se démontre à partir de conservation de la masse (voir Fiat pour définitions et hypothèses à relire).*

**Ce que dit le jury...**

Les candidats doivent avoir réfléchi à ce qu'est une *collision* à l'échelle microscopique et prendre du recul vis-à-vis du modèle des *sphères dures*. L'introduction de la notion de *pression cinétique* doit être effectuée avec soin. Le *théorème d'équipartition* de l'énergie est un théorème limite dont il faut bien connaître les *conditions de validité*. Le calcul de la pression cinétique nécessite de choisir une distribution des vitesses, qui peut être simple mais qui doit être cohérente. Les notions de *moyennes*, de *valeurs quadratiques moyennes* ainsi que l'exploitation des hypothèses formulées pour l'étude du gaz parfait sur l'évaluation de ces grandeurs sont très souvent mal introduites, voire mal comprises. Les notions de *température cinétique* et de *température thermodynamique* doivent être clairement dégagées. Le candidat doit maîtriser les *ordres de grandeur* des valeurs des grandeurs introduites : densité particulière ; nombre de collisions par unité de temps, de surface ; vitesse quadratique moyenne ; longueur d'onde de de Broglie associée à une entité. La notion de *gaz parfait polyatomique* doit être abordée. Cette leçon nécessite d'avoir bien réfléchi à la logique de la démarche adoptée. La notion de *libre parcours moyen* doit être mieux soulignée. Il faut évidemment distinguer les caractéristiques générales d'un gaz parfait de celles d'un gaz parfait monoatomique. La *loi de distribution des vitesses* de Maxwell doit être citée et commentée. La pression est une grandeur macroscopique nécessitant pour être définie que l'on procède à une moyenne sur un grand nombre de chocs élémentaires. Beaucoup de candidats définissent le gaz parfait comme un modèle où aucune interaction ne s'exerce entre les molécules, alors que le rôle des collisions y est essentiel. L'exposé des limitations se résume trop souvent à l'énoncé de l'équation d'état de *Van der Waals*, alors que les *effets quantiques* ne sont que rarement mentionnés, de même que les rôles respectifs des interactions répulsives et attractives selon la valeur de la température.

**Bibliographie**

*Grécias, Physique PCSI* : Pour les lois historiques, le modèle, les hypothèses, l'aspect énergétique, Van der Waals. (81)  
*Pérez, Thermodynamique* : Pour le modèle, la loi de vitesse, la pression, la température cinétique, effets quantiques, limite en densité, viriel aussi, beaucoup de choses en commun avec le grécias aussi.  
*Diu, Physique statistique* : Pour le viriel.

**Introduction**

On a défini T, P, U de façon macroscopique et là on va essayer d'en donner une interprétation microscopique.

**1 - Résultats expérimentaux et modélisation****1.1 - Comportement macroscopique des gaz**

Lois de Boyle-Mariotte, Joule-Gay Lussac et Avogadro-Ampère. Définition de la température absolue et équation d'état. Lois de Joule. Résultats expérimentaux de capacités calorifiques.

**1.2. Modèle du gaz parfait**

Molécules = particules classiques (par opposition à quantique), de dimension négligeable devant la distance intermolécules, interaction par contact entre molécules et par contact avec les parois assurant la thermalisation. Il est important d'opposer les hypothèses du modèle du GP et celles de la théorie cinétique, qui est l'outil d'étude du modèle.

**2 - Étude en théorie cinétique****2.1 - Hypothèses**

Densité uniforme, distribution stationnaire, homogène, isotrope.

**2.2 - Loi de distribution des vitesses**

Postulée. Définir vitesse moyenne et vitesse quadratique moyenne.

**2.3 - Pression cinétique**

Vitesse quadratique moyenne : définition et intérêt. Lien entre force pressante sur une paroi et pression "macroscopique". Choix d'un modèle élémentaire où toutes les molécules vont à la vitesse quadratique moyenne, équiprobabilité des 6 sens. Choc d'une molécule sur une paroi. Nécessité d'un raisonnement statistique, soit

un raisonnement en moyenne. Définir moyenne temporelle et spatiale, hypothèse ergodique à l'équilibre thermodynamique.

### Calcul

*Choc de l'ensemble des molécules utiles, transfert de quantité de mouvement, calcul de la pression cinétique.*

## 2.4 - Température cinétique

Définir la température cinétique.

### Calcul

*Retrouver l'équation d'état.*

Identifier température cinétique et température absolue.

## 3 - Énergie interne

### 3.1 - Gaz parfait monoatomique

#### Calcul

*Calcul de l'énergie interne et de la capacité calorifique.*

### 3.2 - Théorème d'équipartition de l'énergie

Le faire constater sur le cas du GPM, et généraliser. Attention aux hypothèses.

### 3.3 - Gaz parfait polyatomique

Donner énergie interne et capacité calorifique. Interpréter en terme de degré de liberté. Faire constater les températures caractéristiques et le gel de degrés de liberté en ODG. Tracer la courbe  $C_v=f(T)$ .

## 4 - Limites du modèle

### 4.1 - Limite en densité

#### Illustration

*Courbe donnant l'écart au gaz parfait (loi de Boyle-Mariotte) dans le diagramme d'Amagat.*

### 4.2 - Effets quantiques

Définir la longueur d'onde de de Broglie naturellement, calcul pour un vrai gaz et pour un gaz d'électrons. Le gaz d'électrons reste parfait (sans interactions), il est juste quantique. Limite à faible T.

### 4.3 - Gaz de Van der Waals

Le GP ne subit jamais de transition de phase car pas d'interactions. Nature des forces, équation d'état, interprétation de a et b. On retrouve les isothermes.

### 4.4 - Développement du Viriel

#### Calcul

*Retrouver ces équations d'état par le Viriel développé en puissance de la densité.*

Dire qu'on peut aller plus loin.

## Conclusion

Modèle simple, mais dont la portée est vaste.

### Avis

*Leçon assez classique, donc être précis. Les deux premières références se complètent souvent.*

### Remarques

*ODG et gaz quantiques. Dernier degré de rotation bien plus haut. Comparer taille molécule et distances entre elles. Comparer longueur d'onde de Broglie et distance entre les molécules. Fonction des vitesses (module) dissymétrique. C'est le phénomène d'adsorption-désorption aux parois qui conduit à la thermalisation du système. Un GP ne peut pas présenter de transitions de phases, puisqu'il faut des interactions pour cela. Pression et température thermodynamique définies à partir des potentiels. VdW => potentiel de Lennard-Jones. On peut ajouter atmosphère de la lune et radiomètre de Crook (1001 questions, Garing).*

**Ce que dit le jury...**

*Il est important de montrer que l'on peut remonter aux fonctions thermodynamiques caractéristiques à partir de mesures expérimentales. Cette leçon donne l'occasion de faire le lien entre une approche expérimentale où les coefficients de réponse d'un système physique sont étudiés et le cadre théorique de la thermodynamique qui établit des liens ou des contraintes sur ces diverses quantités. Peu de candidats, malheureusement, abordent la leçon dans cet état d'esprit. Les deux premiers principes de la thermodynamique peuvent être considérés connus. Les notions de fonction caractéristique et de variables naturelles restent très floues et abstraites. Pour fixer les idées, il serait intéressant d'établir ou d'utiliser l'expression analytique explicite d'une fonction caractéristique simple. Les applications doivent être concrètes, et ne pas se limiter aux relations de Clapeyron entre les coefficients thermoélastiques d'un fluide homogène. La confusion est fréquente entre la fonction d'état exprimée en fonction des variables naturelles (objet de la leçon) et le potentiel thermodynamique. Cette leçon est centrée sur l'équilibre thermodynamique, sur la manière d'obtenir toute l'information sur un système parvenu dans cet état et non sur la nature de cette information.*

**Bibliographie**

*Choimet, thermodynamique : Pour les fonctions d'état, la transformation de Legendre, les relations de Maxwell.*

*Pérez, thermodynamique : Pour l'identité thermodynamique, l'étude d'un fil.*

*BFR, Thermodynamique : Pour des compléments utiles.*

*Diu, Thermodynamique : Pour l'interprétation graphique.*

*Portelli, La physique par la pratique : Pour la désaimantation adiabatique.*

**Introduction**

Rappeler ce qu'est la thermodynamique et l'esprit des deux premiers principes.

**1 - Fonction d'état caractéristique et identité thermodynamique****1.1 - La première identité thermodynamique**

Celle de l'énergie.

**Calcul**

*La démontrer à partir des deux premiers principes sur un chemin réversible infinitésimal. En déduire les relations entre dérivées de l'entropie et température et pression.*

**1.2 - Les fonctions d'état caractéristiques****Calcul**

*Partir de l'exemple du gaz parfait et montrer que la relation  $f(U,S,V)$  contient toute l'information et pas  $f(T,S,V)$ .*

D'où la notion de fonction d'état caractéristique et de variables adaptées associées.

**2 - Une fonction d'état caractéristique pour chaque jeu de variables****2.1 - Changer de fonction : transformation de Legendre**

Partir de l'exemple de  $U \rightarrow F$ .

On permute les variables conjuguées selon une transformation de Legendre.

**Illustration**

*On interprète cette dernière graphiquement.*

**2.2 - Les nouvelles fonctions d'état et les identités thermodynamiques associées**

Détailler le cas de  $F$ .

**Calcul**

*Vérifier explicitement que  $F(T,V)$  contient toute l'information).*

Donner les cas  $H$  et  $G$ .

## 3 - Relations de Maxwell et applications

### 3.1 - Relations de Maxwell

Origine mathématique et utilité expérimentale.

### 3.2 - Réponse thermique d'un fil

#### Calcul

*Démonstration et ordre de grandeur.*

#### Expérience

*Chauffer fil de fer et élastique.*

### 3.3 - Désaimantation adiabatique

#### Calcul

*Calcul et discussion pratique.*

## Conclusion

La thermodynamique est phénoménologique.

Il manque encore des modèles microscopiques pour les fonctions caractéristiques, que fournira la physique statistique.

#### Avis

*Une leçon plutôt bien guidée par la bibliographie.*

#### Remarques

*Il faut démontrer l'identité thermodynamique.*

*Le premier principe, avant de dire que l'énergie est conservative, postule l'existence et l'extensivité de l'énergie.*

*La transformée de Legendre se base sur la convexité des fonction, c'est à dire la stabilité du système, et des relations bijectives entre les variables.*

*Formule générale d'une transformation de Legendre :  $f(x)=g(y)-xy$  avec  $x = \partial g / \partial y$  où  $g$  est dérivable et concave.*

*Les équations de Maxwell sont toujours vraies car elles sont liées à  $U(S,V)$  qui contient toute l'info, et ce quel-quesoit le système.*

*Si un modèle ne vérifie pas les équations de Maxwell, c'est que le modèle est faux. Autre façon de voir l'équation d'état d'un GPM : hypersurface dans un espace des phases à 4D.*

*Equation d'état mécanique  $PV=nRT$  et équation d'état thermique :  $U=3nRT/2$ .*

*Le passage d'un description microscopique à une description macroscopique d'un système ne relève pas de la thermodynamique (qui regarde l'équilibre macroscopique), mais de la physique statistique.*

*Les fonctions d'état sont : la pression  $p$ , la température  $T$ , le volume  $V$ , l'énergie interne  $U$ , l'entropie  $S$ , l'enthalpie  $H$ , l'énergie libre  $F$  et l'enthalpie libre  $G$ . Entre ces fonctions et leurs dérivées partielles.*

*On peut établir des dizaines de formules : il existe 28 expressions des fonctions d'état, donc 56 dérivées partielles.*

*En réalité, seules certaines ont un intérêt scientifique et pratique.*

*Pour les coefficients de réponse, on peut en créer autant qu'on veut : les coefficients thermoélastiques ou calorimétriques en sont des exemples, mais ce ne sont pas les seuls. Sur le principe, c'est une grandeur qui renseigne sur la réponse du système sous certaines contraintes.*



**Ce que dit le jury...**

Nous ne saurions que trop insister sur l'importance d'écrire systématiquement les *variables* et *paramètres des fonctions thermodynamiques* introduites au cours de la leçon. Si l'analogie avec la mécanique peut se justifier, nous invitons les candidats à bien identifier le message qu'ils souhaitent transmettre et les limites de l'analogie. Bien que ne faisant pas partie de la leçon, l'*interprétation statistique* des potentiels thermodynamiques à l'aide de la *fonction de partition* doit être connue des candidats. L'illustration ne doit pas se réduire au cas d'un corps pur en contact avec un thermostat. Il faut bien distinguer les *paramètres extérieurs* dont la valeur fixée détermine le potentiel thermodynamique adapté à la recherche de l'équilibre et les *variables internes* dont les variations permettent au système d'atteindre l'équilibre. Les *exemples d'application* sont indispensables. Introduire la notion de *travail récupérable*. Il est nécessaire de présenter un exemple montrant clairement que l'on peut éventuellement récupérer du travail lors d'une transformation si celle-ci est bien conduite. Les fonctions d'état  $F$  et  $G$  ne sont pas simplement des cas particuliers de fonctions  $F^*$  et  $G^*$ ; elles ont un intérêt thermodynamique propre et ne doivent pas être confondues avec les potentiels thermodynamiques. Il est préférable de savoir comment on récupère le travail. Il faut éviter un exposé trop formel, les exemples présentés doivent avoir un réel intérêt physique. Discuter des exemples de *métastabilité*. Situations hors d'équilibre intéressantes en chimie ou en métallurgie : phénomènes de *nucléation*, de *décomposition*. Attention à la présence d'espèces chimiques.

**Bibliographie**

Choimet , *Thermodynamique* : Pour les variables, le système isolé, la stabilité.

Diu, *Thermodynamique* : Pour la loi de Laplace, la nucléation, des compléments.

Pérez, *Thermodynamique* : Pour le système isolé.

Fiat, *Toute la physique de SPE* : Pour le choix du potentiel, le travail récupérable, le diamant, le cristallin.

**Introduction**

On se limite aux systèmes fermés.

**1 - Notion de potentiel thermodynamique****1.1. - Variable interne et paramètre de contrôle****Illustration**

Analogie avec l'énergie potentielle mécanique.

Etre bref, donner un exemple.

**1.2 - Cas d'un système isolé**

Deux sous-systèmes avec échange de chaleur, négentropie.

**Calcul**

On applique le second principe à la détente de Joule.

**1.3 - Choix du potentiel****Illustration**

Diagramme de Born.

**2 - Système au contact d'un thermostat****2.1 - Construction du potentiel thermodynamique adéquat**

Construction de  $F^*$  pour une évolution monotherme.

## 2.2 - Recherche de l'état d'équilibre

### Calcul

*Gaz parfait dans enceinte. Exercice corrigé. Déterminer l'équilibre.*

## 2.3 - Travail maximum récupérable

### Calcul

*Même exercice en créant une machine thermique. Calculer le travail récupérable.*

## 2.4 - Condition de stabilité

### Calcul

*Equilibre stable => compressibilité isotherme positive.*

Mentionner que tout potentiel thermodynamique conduit à des inégalités semblables pour les coefficients calorimétriques.

## 3 - Système au contact d'un thermostat et d'une source de pression

### 3.1 - Potentiel thermodynamique adéquat

Dire que c'est analogue. Donner  $G^*$ .

### 3.2 - Application à la loi de Laplace

#### Calcul

*Etablir la loi de Laplace pour une goutte sphérique.*

Eventuellement généraliser.

### 3.3 - Application à la métastabilité

#### Calcul

*Exemple numérique du diamant. Nécessité de la cinétique pour expliquer la stabilité apparente.*

#### Calcul

*Surfusion de l'eau dans un cristalliseur.*

#### Calcul

*Nucléation. Rayon critique. Compétition volume/surface.*

Etre qualitatif, parce que le calcul est long et requiert pas mal d'hypothèses. Déjà en expliquant bien la physique ça prendra un certain temps.

## Conclusion

Caractère prédictif.

### Avis

*Repris sur Etienne, plan bon.*

### Remarques

*Condition d'évolution sur la différentielle. L'équilibre porte sur la différentielle, pas sur la dérivée. Un potentiel dépend des conditions extérieurs et n'est pas une fonction d'état. Dans un système autogravitant, on a  $C_v > 0$  localement. En thermodynamique, pas d'équilibre instable à cause des fluctuations, et pas d'oscillations car dissipation.*

**Ce que dit le jury...**

La division de la fonction d'état *entropie* en deux termes introduit plus de confusion qu'elle n'apporte en général d'éclaircissement. Quel est en effet le statut mathématique de chacun des deux termes. La notion d'entropie échangée est très mal définie. Les candidats devraient s'interroger sur la *température* à considérer dans l'expression de cette quantité. Les bilans ne doivent pas se limiter aux irréversibilités liées aux diffusions thermique ou de particules. Les *critères d'irréversibilité* doivent être dégagés. Il n'est pas nécessaire de calculer systématiquement l'entropie créée pour déterminer si une transformation est ou n'est pas réversible. Cette leçon ne doit pas se résumer à une suite de calculs de variation d'entropie qui conduisent à la conclusion : l'entropie créée est positive. Bien souvent les situations étudiées sont de toute évidence irréversibles. Il ne faut pas se limiter aux seules détente de gaz parfaits et à la mise en contact d'un corps chaud et d'un corps froid. On attend un *calcul* explicite de production d'entropie dans des *cas réels* et intéressants (diffusion, transport de chaleur). Il serait judicieux de citer un exemple de transformation isentropique bien qu'irréversible : entre autres exemples celui d'une tige en régime stationnaire et soumise à ses extrémités à des températures différentes (système non isolé).

**Bibliographie**

Portelli, *La physique par la pratique* : Pour le frottement.  
 Pérez, *Thermodynamique* : Pour la détente de Joule, le postulat d'Onsager, les effets thermoélectriques..  
 Fiat, *Toute la physique de SUP* : Pour la thermalisation de la pierre.  
 Garing, *Les 1001 questions de la physique en prépa PC/PC\** : Pour le bilan thermodynamique local.  
 Gié, *Thermodynamique* : Pour la thermalisation, la détente de Joule (aussi, non vérifié).

**Introduction**

Rappeler le second principe et son importance comme principe d'évolution. Définition intuitive (film inversé) réversibilité. Définir réversible, quasi-statique, irréversible et isentropique mathématiquement.

**1 - Causes d'irréversibilité et approche limite de la réversibilité****1.1 - Thermalisation****Calcul**

Présenter la thermalisation et la réversibilité limite (découpage infinitésimal). Thermalisation d'une pierre. Réversible à la limite.

**1.2 - La détente de Joule Gay-Lussac****Calcul**

Présenter la thermalisation et la non réversibilité limite.

On intuite donc que les gradients sont les causes de l'irréversibilité.

**1.3 - Les autres causes d'irréversibilité**

Parler qualitativement de frottements et d'hystérésis magnétique.

**2 - La diffusion et la création d'entropie****2.1 - Taux de création d'entropie en diffusion thermique****Calcul**

Conduire le bilan d'entropie local sur un cas simple, unidimensionnel et stationnaire. En déduire que l'entropie créée est de la forme  $j \cdot \text{grad}(1/T)$ .

Celui-ci conduit au taux de création d'entropie volumique. On admet la généralisation à trois dimensions et on introduit les forces thermodynamiques.

**2.2 - Généralisation**

L'expression des forces dépend de l'ensemble des variables considérées pour le transport. On admet qu'on somme les diverses quantités flux\*force.



## 2.3 - Postulat d'Onsager

On ajoute le postulat d'Onsager (ou 4<sup>e</sup> principe de la thermodynamique) : les courants sont des combinaisons linéaires des forces thermodynamiques.

### Illustration

*Exemple des courants thermiques et électriques à justifier. On abouti à un couplage thermique/électrique.*

Les coefficients  $L_i$  sont appelés coefficients cinétiques. Ils sont fortement contraints, comme on va le voir. Dans un cas unidimensionnel, cela se met aisément sous forme matricielle  $2 \times 2$ .

## 2.4 - Signes des coefficients cinétiques

### Calcul

*Si on a uniquement de la diffusion thermique, on montre que  $L_{ii}$  est positif. Idem pour la diffusion électrique.*

On peut relier ces coefficients à la conductivité électrique (loi d'Ohm) ou au coefficient de diffusion thermique (loi de Fourier) et parler des signes des coefficients des lois empiriques.

## 3 - Couplages thermo-électriques

### 3.1 - Effet Seebeck ; application aux thermocouples

On s'intéresse maintenant aux termes non diagonaux de la matrice des coefficients cinétiques. On se place à une dimension.

Si on a une différence de température aux extrémités d'un conducteur en circuit ouvert, c'est l'effet Seebeck. En utilisant des jonctions de plusieurs conducteurs de coefficients différents, on arrive à mesurer des différences de températures (thermocouples).

### 3.2 - Effet Peltier

Ici, on a une jonction entre deux conducteurs à la même température, parcourue par un courant électrique.

## Conclusion

### Avis

*Leçon de haut niveau, c'est un pari. Utiliser des transparents pour aller vite sur certains calculs.*

### Remarques

*Toujours partir du fait que l'entropie créée est positive.*

*Thermostat : réservoir d'énergie à température fixe, et ne pouvant échanger de l'énergie que sous forme de transfert thermique et de façon réversible.*

*Gradients moteurs de l'irréversibilité (pas le changement de l'équation par  $t/-t$ ).*

*Réversibilité implique même chemin.*

*Les lois de type flux/gradient sont empiriques.*

*La détente de Joule Gay-Lussac n'est pas un phénomène de diffusion : les trajectoires des particules y sont ballistiques.*

*Isentropique et réversible ne sont pas synonymes. Réversibilité  $\Rightarrow$  quasi-staticité, mais la réciproque n'est pas vraie : la création d'entropie dans l'étape infinitésimale doit être d'ordre 2.*

*Quasistatique = grandeurs intensives définies au cours de la transformation.*

*Mesure en MQ non-réversible.*

*Newton et Schrödinger réversible.*

## Ce que dit le jury...

Les *applications* ne se limitent pas au moteur de Stirling et doivent rester concrètes. Développer un exemple de machine réelle. Présenter des machines thermiques cycliques où le fluide caloporteur subit des changements d'états est possible. Il faut discuter les causes d'irréversibilité : s'agit-il de frottements mécaniques ou de problèmes de diffusion thermique. Les moteurs réversibles ont forcément un fonctionnement lent : comment peut-on alors récupérer de la puissance avec une telle machine thermique. Le fluide en écoulement n'a pas nécessairement un comportement cyclique. Expliquer la modélisation. Une transformation monotherme ne peut être réversible si le système reçoit de l'énergie d'une source de chaleur alors que sa température n'est pas celle de la source.

## Bibliographie

*Fiat, Toute la physique de SUP : Pour la différence efficacité/rendement sur un exemple, pour le réfrigérateur aussi.*  
*Pérez, Thermodynamique : Pour les définitions, les machines monothermes, le diagramme de Raveau, les différents cycles.*  
*Ray, La physique par les objets du quotidien : Pour la présentation du réfrigérateur.*  
*Garing, Les 1001 questions de la physique en prépa PCSI : Pour la discussion sur la puissance.*  
*Martin, Le réfrigérateur - BUP 832 : Pour le réfrigérateur.*

## Introduction

La thermodynamique a permis la révolution industrielle (XIX<sup>ème</sup> siècle).

### 1 - Machines thermiques, généralités

#### 1.1 - Définitions

Machine thermique. Moteur/Récepteur.

##### Calcul

Diagramme PV et travail. Diagramme TS et chaleur.

#### 1.2 - Machines monothermes

##### Calcul

Montrer l'impossibilité d'un travail moteur.

#### 1.3 - Machines dithermes et second principe

##### Calcul

Inégalité de Clausius.

##### Illustration

Diagramme de Raveau.

#### 1.4 - Rendement, efficacité, puissance

##### Illustration

Schéma général d'une machine ditherme. Discuter les différents éléments et leurs effets.

Donner les définitions et comparer sur l'exemple pompe à chaleur/réfrigérateur.

Expliquer pourquoi l'efficacité peut être supérieure à 1.

Discussion sur le compromis rendement/puissance.

## 1.5 - Cycle de Carnot

### Illustration

*Diagramme PV et TS.*

### Calcul

*Calcul de l'entropie créée et du rendement.*

## 2 - Exemple d'une machine frigorifique

### 2.1 - Présentation

#### Illustration

*Schéma et mini-historique. Dire que ça réchauffe la pièce.*

Dégager l'intérêt du changement d'état avec un ODG. Choix d'un fluide adéquat.

### 2.2 - Construction du cycle

#### Illustration

*Construire le cycle pas à pas.*

### 2.3 - Bilan énergétique

#### Calcul

*Faire le bilan énergétique.*

#### Illustration

*On peut montrer un diagramme  $\text{Log}(P)=f(H)$  utilisé par les professionnels.*

### 2.4 - Autres machines

#### Illustration

*Donner d'autres exemples et ODG pour d'autres type de cycle et de machines.*

## Conclusion

La thermodynamique est partout dans notre quotidien (moteurs, climatiseur...).

Nous même sommes aussi une machine thermique (ouvertes) (travail, transpiration, chauffage...).

#### Avis

*Etre bien pédagogique et pédestre sur le réfrigérateur.*

#### Remarques

*L'échange par chaleur se traduit par une variation de la population des niveaux d'énergie, contrairement à l'échange par travail qui, lui, implique une variation de ces niveaux.*

*Efficacités : rapport des transferts utiles sur les transferts nécessaires, qui sont toujours inférieures à 1 pour les moteurs, mais généralement supérieures à 1 pour les réfrigérateurs et les pompes à chaleur.*

*Rendements  $r$  : rapports des efficacités réelles sur les efficacités réversibles, toujours inférieurs ou égaux à 1.*

*Machine thermique n'implique pas cyclique. Fluides de frigo = fréon, air, liquide, ammoniac...*

*Problème de la puissance.*

*Volume du gaz peut être différent du volume de la chambre à certains instants.*

**Ce que dit le jury...**

Les potentiels thermodynamiques ne servent pas seulement à prédire l'équilibre, mais aussi à prévoir le sens d'évolution d'un système diphasé hors équilibre et à interpréter le diagramme des états. Il s'agit bien d'une étude thermodynamique fondée sur l'utilisation des potentiels thermodynamiques, et non d'une étude descriptive des changements d'état. Il importe de comprendre l'intérêt de l'enthalpie libre pour cette leçon. Les ordres de grandeur usuels, ainsi que des applications à la vie courante, constituent une partie incontournable de cette leçon. Liens avec les interactions et les processus microscopiques : interactions attractives, compétition ordre/désordre. Les observations quotidiennes ne doivent pas être passées sous silence : transpiration, phénomènes météorologiques, ustensiles de cuisson.

**Bibliographie**

Choimet, *Thermodynamique* : Pour le choix du potentiel, la condition d'équilibre et d'évolution, diagramme PT.

Diu, *Thermodynamique* : Pour la condition d'équilibre, l'enthalpie de changement d'état (à la fin), retard au changement d'état, les applications.

BFR, *Thermodynamique* : Pour passage au diagramme PV, le stockage des fluides.

Fiat, *Toute la physique de SPE* : Pour des rappels sur les potentiels, le carbone, Clapeyron.

Fiat, *Toute la physique de SUP* : Pour des rappels sur les changements d'états, stockage.

Pérez, *Thermodynamique* : Pour le calcul de l'état final de l'expérience de surfusion.

**Introduction**

La matière existe sous plusieurs forme, comment les outils théoriques qu'on a vu peuvent nous aider à comprendre ces changements d'état. Cadre = corps purs.

**1 - Etude générale d'un corps pur sous deux phases****1.1 - Choix du potentiel thermodynamique**

Paramètres extérieurs et variables internes. Transition de phase se produit quand une phase devient plus stable (exemple de l'eau, dépendance en T et P. Donner des exemples de potentiels adaptés à différentes expériences.

**1.2 - Condition d'équilibre et d'évolution**

Il faut minimiser G, d'où l'évolution vers l'équilibre.

**Calcul**

Calcul de la condition d'évolution et d'équilibre.

**Illustration**

Diagrammes pour fixer les idées.

**Calcul**

Application au cas du carbone (transition de phase du second ordre) et au cas de la vaporisation de l'eau (transition du premier ordre).

**1.3 - Enthalpie de changement d'état****Calcul**

Comment faire varier les  $x$  à T et P fixés ? En fournissant du transfert thermique, d'où l'enthalpie de changement d'état qu'on démontre à partir de G. ODG pour l'eau et application à la transpiration.

## 2 - Diagrammes de phases

### 2.1 - Le diagramme (P,T)

L'équilibre définit une relation implicite  $P=f(T)$  qu'on vient de montrer. On retrouve donc la pression de vapeur saturante à T.

#### Illustration

*Dessin qualitatif d'un diagramme typique, mentionner l'exception de l'eau. Discuter le signe des pentes.*

Applications au sèche-cheveux et au séchage du linge, et à la lyophilisation (sublimation de l'eau ne détériore pas le produit).

### 2.2 - Le diagramme (P,V)

#### Illustration

*Expliquer qu'on passe de l'un à l'autre grâce à l'équation d'état (ex : VdW). Donner l'allure, les isothermes d'Andrews etc.*

#### Calcul

*Application au stockage des fluides.*

Explication de l'opalescence critique par la divergence de la compressibilité isotherme.

## 3 - Retard au changement d'état

### 3.1 - Description du phénomène

#### Expérience

*Eau et gros sel, tube à essai avec eau et thermomètre dedans, descendre à  $-5^{\circ}\text{C}$  puis transition brutal si choc ou corps étranger.*

### 3.2 - Modèle, interprétations

#### Calcul

*Bilan entropique pour état final d'équilibre. Surfusion : le calcul du potentiel à interpréter comme une compétition avec le terme de tension de surface.*

Applications à la pluie verglaçante, au lac Ladoga, chambres à bulles (hydrogène liquide surchauffé).

## Conclusion

Ouvrir sur les machines thermiques et les transitions du second ordre.

#### Avis

*Leçon reprise en grande partie sur la présentation d'Aurore.*

#### Remarques

*Il existe un point triple pour chaque forme allotropique.  
A gauche de (L+G) l'isotherme monte encore jusqu'à (S+L) qui ont des pentes encore plus raides.  
Pour l'eau, on retrouve la pente normale à haute pression.  
Plutôt dire transition de phase que changement d'état.  
Plutôt partir du diagramme que du potentiel.  
Une ligne triple par variété allotropique.  
Pente normale pour l'eau retrouvée à haute pression.  
Phase (plus général que état) = variables continues.  
Hélium 3 exception  $Ll < 0$ .  
Différentielles si réversible (?).*

**Ce que dit le jury...**

Les exemples ne se limitent pas à l'interprétation statistique de la détente de Joule Gay-Lussac. Il est intéressant de faire le parallèle entre la configuration microscopique la plus probable du système et l'état macroscopique d'équilibre thermodynamique. On peut s'intéresser à la notion de température au cours de cette leçon. Les notions de probabilités et les statistiques mises en oeuvre doivent être introduites de manière précise. Notions de microétats et de macroétats : pour cela, on peut s'appuyer par exemple sur un système physique discret. Introduire la notion de température thermodynamique. Plusieurs difficultés majeures : définir l'état microscopique d'un système en accord avec les lois de la mécanique, dénombrer ces états si les variables mécaniques sont continues (MQ aide), comment le système explore ces états pour atteindre l'état d'équilibre macroscopique, comment peut-on identifier l'état d'équilibre et l'état le plus probable d'un système. Les exemples étudiés ne peuvent se réduire à un nombre petit de particules. Passage du microscopique réversible au macroscopique irréversible, à la limite des grands nombres. Savoir si une molécule est à gauche ou à droite dans un volume donné ne définit pas un microétat. Il est utile de choisir deux exemples, l'un avec des microétats discrets et l'autre avec une distribution continue de microétats. La notion d'ensemble microcanonique est introduite pour rendre compte des propriétés thermodynamiques des systèmes isolés. Cela implique que la notion de température microcanonique soit dégagée clairement avant d'être comparée à la température thermodynamique. L'additivité de l'entropie statistique suppose l'indépendance des systèmes considérés. Etablir un lien avec le troisième principe de la thermodynamique.

**Bibliographie**

Diu, *Physique statistique* : Pour le cristal paramagnétique.  
 BFR, *Thermodynamique* : Pour les grands nombres, les postulats, le gaz parfait.  
 GréCIAS, *Physique PCSI* : Pour le système à deux états, la détente de Joule.  
 Pérez, *Thermodynamique* : Pour micro et macro-état, le gaz parfait aussi, le cristal aussi.  
 Sanz, *Physique PCSI* : Pour la détente de Joule aussi.

**Introduction**

On a pas encore d'interprétation microscopique de l'entropie, contrairement aux autres grandeurs thermodynamiques. On se limite aux systèmes isolés.

**1 - Micro-état, macro-état****1.1 - Définitions**

Définitions du micro-état et du macro-état (défini à partir d'un petit jeu de paramètres qui sont des valeurs moyennes).

**Illustration**

Illustration du fait que plusieurs micro-états peuvent être compatibles avec un macro-état (rajouter exemple du polymère 1D).

Définition de micro-état accessible.

**1.2 - Premier postulat : équiprobabilité**

Le postulat de la mécanique statistique : pour un système isolé, tous les micro-états sont équiprobables.

**1.3 - Second postulat : hypothèse ergodique**

On a en général qu'un seul système et pas une collection statistique de système.

**1.4 - Limite thermodynamique****Calcul**

Une illustration de la loi des grands nombres, justification du traitement en termes de moyenne.



## Calcul

Exemple d'un système constitué de  $N$  systèmes à 2 niveaux, calcul de la probabilité d'un macro-état sachant que tous les micro-états sont équiprobables (plus  $N$  est grand, plus la distribution est piquée autour de la moyenne).

## 2 - Définition statistique de l'entropie

### 2.1 - Entropie statistique

#### Calcul

Définition et démonstration de la formule de Boltzmann dans le cadre microcanonique. Lien avec la thermodynamique car cela consiste à maximiser l'entropie. Montrer que c'est additif.

### 2.2 - Détente de Joule

#### Calcul

On retrouve la variation d'entropie de la thermodynamique en utilisant Stirling.

Définir au passage la température microcanonique.

### 2.3 - Cas du gaz parfait

#### Calcul

Exemple du gaz parfait. paradoxe de Gibbs, nécessité de rajouter l'indiscernabilité des particules pour retrouver  $S$  du gaz parfait.

### 2.4 - Cas du cristal paramagnétique parfait - Système à deux états

#### Calcul

Faire les calculs et interpréter. Tracer  $S(E)$ . Réponse linéaire puis saturation de l'aimantation. Attention à discuter si besoin les températures négatives.

## Conclusion

Ouverture sur l'étude de systèmes non isolés et le formalisme canonique.

#### Avis

Leçon pas simple.

#### Remarques

Un système microcanonique n'admet pas de fluctuations d'énergie. Microcanonique  $\Rightarrow$  équiprobabilité statistique des états de même énergie et la notion d'ergodicité. La présentation de l'entropie statistique doit être assumée comme parachutée (en particulier son additivité). La notion de température n'a rien d'évident dans l'ensemble microcanonique. Il faut dire clairement que si on choisit la température en Kelvin et si on introduit  $k_B$  on a équivalence entre l'entropie statistique et l'entropie thermodynamique à l'équilibre. Il faut alors l'illustrer par exemple sur le GP. Entropie de Boltzmann/Shannon valable en microcanonique à l'équilibre. Cas continu pas indispensable. Force  $\Rightarrow$  pas isolé. Toutes les notions de probabilité sont bien détaillées et bien définies dans un appendice à la fin du Diu. Cristal paramagnétique :  $E$  et  $B$  suffisent à en déduire  $M$  qui n'est pas indépendant.

**Ce que dit le jury...**

Le jury invite les candidats à définir proprement le *cadre statistique* dans lequel ils se placent, et les *variables pertinentes* associées. On peut introduire les *statistiques quantiques* à l'occasion de cette leçon, et s'intéresser à la *limite classique*. Les *conditions d'utilisation* du facteur de Boltzmann doivent être précisées. L'atmosphère en équilibre isotherme n'est qu'un exemple parmi d'autres permettant d'introduire le facteur de Boltzmann. La *valeur numérique* de la constante de Boltzmann n'est pas connue. Manque d'*ordres de grandeur* des énergies mises en jeu. Définir l'espace des phases. Si l'on souhaite traiter le cas des systèmes macroscopiques ce qui permet d'introduire l'énergie libre il est extrêmement important de bien distinguer ce cas de celui des systèmes microscopiques indépendants.

**Bibliographie**

*Diu, Physique statistique* : Pour, la probabilité canonique et la fonction de partition, la capacité calorifique, la factorisation de  $Z$ , l'équipartition, la chaleur spécifique d'un solide, la limite continue, le gaz parfait monoatomique et poly atomique.

*Pérez, Thermodynamique* : Pour la présentation, pour du microcanonique au canonique aussi, l'énergie libre, le système à deux états.

**Introduction**

Nous venons d'étudier la modélisation microcanonique et nous allons tenter au cours de cette leçon de retrouver certaines propriétés thermodynamiques via la modélisation canonique.

**1 - Ensemble canonique****1.1 - Présentation**

Système A en équilibre avec un thermostat R. Le tout est isolé.

**1.2 - Du microcanonique au canonique****Calcul**

Démonstration de la probabilité canonique d'un état du système.

**1.3 - Fonction de partition  $Z$** **Calcul**

Normalisation par la fonction de partition. Calcul général. Définition et interprétation.

Discuter les cas limites de haute et basse température, ODG de  $kT$ .

**1.4 - Energie interne****Calcul**

Démonstration de l'expression de l'énergie interne et de la capacité calorifique en fonction de  $Z$ .

**1.5 - Energie libre**

En thermo on a vu que le potentiel était  $F$ .

**Calcul**

Démontrer que  $F$  est bien minimale à l'équilibre c'est à dire pour  $P=1$  (limite thermodynamique).

**Calcul**

On calcule l'énergie et la capacité calorifique en fonction de  $F$ .

Ainsi on peut déduire toutes les grandeurs intéressantes à partir de  $Z$ .



## 1.6 - Système à deux états

### Calcul

*Exemple simple d'un système à deux états.*

## 2 - Calcul de la fonction de partition $Z$ et applications

### 2.1 - Factorisation de $Z$

#### Calcul

*Somme des énergies  $\Rightarrow$  produit des fonctions de partition. Cas discernable et cas indiscernable.*

### 2.2 - $N$ Oscillateurs harmoniques

#### Calcul

*Chaleur spécifique d'un solide, retrouver la loi de Dulong et Petit.*

### 2.3 - Théorème d'équipartition de l'énergie

Enoncer le théorème et interpréter le résultat précédent.

## 3 - Gaz parfait monoatomique

### 3.1 - Approximation continue

3 degrés de translation. Découpage quantique de l'espace des phases, indiscernabilité. ODG pour justifier.

### 3.2 - Longueur d'onde thermique de De Broglie

On la fait ressortir et on justifie qu'on a pas d'effets quantiques.

### 3.3 - Propriétés thermodynamiques

#### Calcul

*Ecrire  $Z$  et retrouver l'énergie du gaz parfait.*

## 4 - Gaz parfait diatomique

### 4.1 - Terme de vibration

Somme de translation + vibration + rotation. Donner ODG de la température de gel. Donner capacité thermique d'après OH à 1D déjà vu.

### 4.2 - Terme de rotation

Faire de même. Seulement deux degré de plus ici.

#### Illustration

*Tracer la courbe de la capacité thermique en fonction de la température.*

## Conclusion

Résumé des cas exposé et ouverture sur les statistiques quantiques.

#### Avis

*Leçon trop calculatoire et théorique pour que je l'apprécie à priori.*

#### Remarques

*On peut faire le lien entre  $F$  et la formule de Gibbs-Helmholtz.  $N!$  car on néglige Pauli, approximation des grands nombres. Fermion/Boson et antisymétrie/symétrie de la fonction d'onde.  $Z$  représente la contribution du système au nombre de microétats total. Théorème d'équipartition : termes quadratiques du hamiltonien, non couplés ; limite classique = approximation continue = grand nombre de ddl répartis ; spectre continu et non borné sinon  $C_v$  tend vers 0 à haute température. L'énergie interne est une grandeur moyennée. Distributions gaussiennes et largeur en  $1/\sqrt{tN}$ . Création d'entropie microscopique = perte de corrélation. Attention, le  $N!$  est une approximation. Un cas simple de système à deux états est traité dans le pérez.*

**Ce que dit le jury...**

L'intérêt de la notion de *corps noir*, et son lien avec celle de (champ de) *rayonnement d'équilibre* (à distinguer) doivent apparaître clairement. Des *bilans radiatifs* dans des *situations concrètes* permettent alors de mettre en oeuvre cette notion. Les lois de base du rayonnement thermique sont établies en situation d'équilibre. Il convient de s'interroger sur la validité de leur application à des situations hors-équilibre. La leçon doit permettre d'aborder la notion de *transfert thermique radiatif* et d'en présenter des applications. La démonstration de la *loi de Planck* n'est pas le centre de la leçon. L'effet de serre ne constitue pas l'unique application à envisager pour ce sujet, et les valeurs numériques obtenues avec des modèles élémentaires de cet effet doivent être présentées avec beaucoup d'esprit critique. Principe du *pyromètre* à disparition de filament possible. Ne pas ignorer la physique sous-jacente. Il faut maîtriser parfaitement les *unités* des nombreuses *grandeurs énergétiques*. Il s'agit d'*équilibre thermodynamique entre matière et rayonnement* et il est justifié de se poser la question de savoir pourquoi un corps noir n'émet pas un spectre de raies. Le lien entre propriétés d'absorption et d'émission d'un corps est trop souvent ignoré. On peut aussi évoquer l'approche d'Einstein.

**Bibliographie**

*BFR, Thermodynamique* : Pour la loi de Planck aussi, Wien aussi.  
*Gié, Thermodynamique* : Pour la loi de Planck aussi, Wien aussi.  
*Brébec, Thermodynamique 2ème année* : Pour l'effet de serre.  
*More, Physique MP/MP\** : Pour les bilans radiatifs, la loi de Planck, Wien aussi.  
*Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Thermodynamique* : Pour la loi de Stefan, la thermopile.  
*Pérez, Thermodynamique* : Pour les hypothèses de Planck, la loi de Wien, les ordres de grandeur.  
*Taillet, Dictionnaire de physique* : Pour les définitions, l'histoire et les lois.

**Introduction**

On a déjà vu convection et conduction mais ici pas besoin de support matériel.

**1 - Bilans radiatifs****1.1 - Interaction matière-rayonnement**

Onde EM incidente transmise, réfléchi et absorbée. Corps opaques (ici), corps transparents. En pratique, selon longueur d'onde. Justification du rayonnement thermique.

**Illustration**

*Bilan radiatif en terme de flux, et puissance reçue.*

**1.2 - Equilibre radiatif et thermodynamique**

Définir comme  $P=0$ , déduire égalité des flux. Discuter équilibre thermodynamique.

**2 - Rayonnement d'équilibre thermique****2.1 - Loi de Planck**

Parler de la distribution spectrale, puis de la loi de Rayleigh-Jeans avec la catastrophe UV, et enfin donner la loi de Planck avec ses hypothèses.

**Calcul**

*Illustrer en montrant la courbe.*

**2.2 - Loi du déplacement de Wien**

On remarque que le maximum dépend de la température. On donne la loi qu'on peut facilement démontrer. ODG pour différents corps. La couleur renseigne donc sur la température. Application à une flamme à savoir.

## 2.3 - Loi de Stefan

### Calcul

*Faire la démonstration.*

### Expérience

*Vérification expérimentale comme en montage mais plus rapide, pyromètre et ampoule, on retrouve l'exposant 4 en faisant la correction du corps gris.*

Dire un mot sur le fonctionnement du pyromètre.

## 3 - Modèle du corps noir

### 3.1 - Définition

Cas particulier d'un corps opaque idéal.

Définition propre à donner avec historique.

Exemple : serre de verre dans le domaine infrarouge.

### Calcul

*Modèle du four.*

### 3.2 - Rayonnement du corps noir

Montrer qu'il suit la loi de Stefan.

### Calcul

*ODG corps humain et autres.*

### 3.3 - Application en métrologie

#### Illustration

*Thermopile et Pyromètre. En discuter un bien et l'autre plus rapidement.*

### 3.4 - Effet de serre

Modèle sans puits avec atmosphère. Aller assez vite sur le second calcul.

#### Illustration

*Illustration des différents flux.*

## Conclusion

Ouverture sur le réchauffement climatique et les applications en astrophysique : mesure de la température des étoiles et rayonnement de fond cosmologique (à illustrer si possible).

### Avis

*Repris sur Sandrine.*

### Remarques

*L'équilibre du rayonnement nécessite la présence de matière.*

*Densité d'énergie = densité de mode \* énergie d'un mode.*

*Agitation thermique => mouvement électrons => spectre continu.*

**Ce que dit le jury...**

*Le jury a regretté de ne pas avoir vu d'illustration expérimentale, même simple, des transferts thermiques. Les expériences de mise en évidence de la diffusion de particules doivent être réalisées dans des conditions où le phénomène de convection n'est pas dominant. Il s'agit de dégager les caractéristiques fondamentales des phénomènes de transport et de les illustrer dans différents domaines de la physique. L'aspect microscopique doit être abordé. Pour illustrer l'irréversibilité du phénomène, un calcul d'entropie créée peut être effectué dans un cas simple, notamment pour la conduction thermique.*

**Bibliographie**

*Diu, Thermodynamique : Pour l'équilibre thermodynamique local.*  
*Choimet, Thermodynamique : Pour la diffusion, les analogies.*  
*Garing, Les 1001 questions de la physique en classe prépa PC/PC\* : Pour le contact bois/métal, les trois modes, et presque tout en fait.*  
*Pérez, Thermodynamique : Pour les bilan de grandeur, marche au hasard.*  
*Fiat, Toute la physique de SPE : Pour le lac et la maison, solution exponentielle et un peu tout.*  
*Renvoizé, Physique PC/PC\* : Pour la bilan entropique, et plein d'autres choses bien.*

**Introduction**

Si hors équilibre, retour à l'équilibre par phénomène de transport de l'énergie.  
 Ici transport thermique, par diffusion surtout.

**1 - Les phénomènes de transport****1.1 - Différents phénomènes de transport**

Trois modes de transport possibles pour la chaleur.

**Expérience**

*Convection : Tube en U et suie de bois.*  
*Conduction : cuillère dans eau chaude.*  
*Rayonnement : QI et papier noir qui brûle.*

**1.2 - Equilibre thermodynamique local**

Discuter l'ETL à partir de la considérations de deux systèmes, en terme de temps caractéristiques.  
 Séparation des échelles de temps et de longueur.

**1.3 - Grandeurs conservées****Calcul**

*Etablir l'équation de conservation, bilan local.*

**2 - Diffusion****2.1 - Loi phénoménologique****Calcul**

*Loi qui dépend du gradient.*  
*Approximation linéaire, loi de Fourier.*  
*Lien avec le libre parcours moyen par un bilan.*  
*ODG.*

Discussion sur le signe, associé au second principe.

**2.2 - Equation de diffusion****Calcul**

*Etablir l'équation de diffusion. ODG bois/métal. Concept de résistance thermique.*

Commentaire : non-réversibilité, temps caractéristique, croissance en racine de  $t$ .

## 2.3 - Lien avec la marche au hasard

### Illustration

*Solution exponentielle*

### Calcul

*Lien avec la marche au hasard.*

## 2.4 - Irréversibilité (retour)

### Calcul

*Bilan entropique.*

# 3 - Applications

## 3.1- Dimensionnement d'un chauffage

### Calcul

*Exercice tige puis exercice corrigé à faire pour isolation maison*

## 3.2 - Sensation de chaud

### Calcul

*Exercice sur l'effusivité et la température ressentie.*

## 3.3 - Lac gelé

### Calcul

*Exercice classique, épaisseur de la glace.*

# Conclusion

### Illustration

*Tableau avec le transport d'autres quantités.*

Ouvrir sur Onsager.

### Avis

*Tout est dans la biblio, il faut juste bien présenter les choses, ce qui n'est pas si évident.*

*Je ne suis pas satisfait de cette leçon.*

*Piocher dans la biblio selon l'humeur, il n'y a sûrement pas le temps de tout préparer ni de tout exposer.*

### Remarques

*ODG du libre parcours moyen dans un gaz  $0,1\mu\text{m}$  et un liquide  $0,1\text{nm}$ .*

Ce que dit le jury...

*Nouvelle leçon.*

*Le jury a regretté de ne pas avoir vu d'illustration expérimentale, même simple, des transferts thermiques.*

*Les expériences de mise en évidence de la diffusion de particules doivent être réalisées dans des conditions où le phénomène de convection n'est pas dominant.*

*Il s'agit de dégager les caractéristiques fondamentales des phénomènes de transport et de les illustrer dans différents domaines de la physique.*

*L'aspect microscopique doit être abordé.*

*Pour illustrer l'irréversibilité du phénomène, un calcul d'entropie créée peut être effectué dans un cas simple, notamment pour la conduction thermique.*

Bibliographie

*Fiat, Toute la physique de SPE : Pour la conduction, la conducto-convection.*

*Pérez, Thermodynamique : Pour des compléments.*

*Diu, Thermodynamique : Pour des compléments.*

*Brébec, Thermodynamique 2ème année : Pour l'effet de serre.*

*More, Physique MP/MP\* : Pour les bilans radiatifs, la loi de Planck, Wien aussi.*

*Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Thermodynamique : Pour la loi de Stefan.*

## Introduction

Il existe différents mécanisme pour le transfert de chaleur.

## 1 - Diffusion thermique

### 1.1 - Loi de Fourier

Calcul

*Définir le flux et énoncer la loi de Fourier. Donner des ODG du coefficient.*

### 1.2 - Equation de la chaleur

Expérience

*Conductiscope*

Calcul

*Etablir l'équation de la chaleur et introduire le concept de résistance thermique de conduction.*

### 1.3 - Temps caractéristique de diffusion thermique

Donner des ODG du temps associé.

### 1.4 - Dimensionnement d'un chauffage

Expérience

*Exercice résolu à faire.*

## 2 - Convection

### 2.1 - Mise en évidence

Expérience

*Tube en U et sciure de bois.*

### 2.2 - Transport conducto-convectif

Présentation de la loi de Newton par analogie avec la résistance conductive.

## Calcul

*Exercice ailette cylindrique de radiateur.*

# 3 - Rayonnement thermique

## 3.1 - Modèle du corps noir

### Illustration

*Bilan de flux, modèle du corps noir.*

## 3.2 - Les lois du rayonnement thermique

### Calcul

*Parler de la loi de Planck, Wien, etc...*

### Expérience

*Vérification de la loi de Stefan.*

## 3.3 - Rayonnement solaire et effet de serre

### Illustration

*Modèle sans puis avec atmosphère.*

### Calcul

*Aller assez vite sur le second calcul.*

# Conclusion

Selon ce qu'on considère (solide, fluide, haute température), on a pas le même mode de flux majoritaire. Enjeu de l'effet de serre actuel.

### Avis

*Nouvelle leçon pas évidente dans la gestion et le choix de ce qu'on expose.*

### Remarques

*Modèle des sphères dures possible.  
Conducteur électrique = conducteur thermique.  
Coefficient de diffusion en mètre carré par seconde.*



**Ce que dit le jury...**

Dans cette leçon, le plus grand soin dans la définition des orientations et des *conventions* de signe s'impose. Les *applications* doivent occuper une place significative dans la présentation. Ce ne sont pas les machines de technologie complexe qui illustrent le mieux les idées en jeu et les notions de base sur l'induction sont supposées connues. Il ne faut pas confondre *force de Lorentz* sur un porteur de charge et *force de Laplace* sur un conducteur. Toutes les grandeurs introduites doivent être algébriques ou vectorielles, ce qui nécessite de préciser les orientations et les bases de projection. Il ne faut pas limiter les applications au seul haut-parleur. Réserver du temps à l'étude des *moteurs*. Principe des moteurs électriques des différents types (à champ tournant, unipolaires, universels) et des générateurs électriques à courant continu ou alternatif. Il faut être particulièrement attentif aux signes dans cette leçon et ne pas omettre de mentionner des ordres de grandeur. Montrer l'importance des termes de *couplage* entre équation mécanique et équation électrique. Dans le bilan d'énergie global, il faut faire ressortir le rôle du champ magnétique et expliquer l'origine du bilan auxiliaire. Il est bon de se souvenir que l'objectif principal d'un haut-parleur n'est pas de produire de la chaleur et de rappeler au cours de la leçon, l'origine physique de la force de frottement qui apparaît dans l'équation mécanique, et qui est liée au rayonnement d'ondes acoustiques. Dans les *bilans énergétiques*, deux approches sont possibles : raisonner sur le circuit mobile seulement ou sur le système constitué du circuit et des sources de B. Dans le premier cas, un fait important est que le travail des forces de Laplace extérieures subies par le circuit mobile augmenté du travail de la force électromotrice d'induction dans ce circuit et dû à son déplacement seulement, est nul ; cela provient de la nullité du travail des forces de Lorentz au niveau microscopique. Une illustration expérimentale des exemples traités, haut-parleur ou moteur, s'impose.

**Bibliographie**

Vigouroux, *Actualisation des connaissances sur les moteurs électriques - BUP 846* : Pour des ordres de grandeur actuels et les grandes idées.

Fiat, *Toute la physique de SPE* : Pour le cours.

Hprépa, *Electronique II PSI/PSI\** : Pour des compléments si besoin.

Dunod, *Physique tout en un PSI/PSI\** : Pour des compléments si besoin.

Mérat, *Electrotechnique* : Pour des compléments.

**Introduction****1 - Principe de la conversion de puissance électromécanique****1.1 - Rails de Laplace en fonctionnement générateur****Illustration**

Schéma rails de Laplace et notations. Puis schéma de conversion des puissances mécanique => électrique.

**Expérience**

Déplacer la barre et noter le courant, ainsi que la dépendance en sens et vitesse. Vérifier générateur avec signes de U et I.

**Calcul**

Bilan de puissance mécanique-électrique sur la barre.

**1.2 - Réversibilité de la conversion : fonctionnement moteur****Expérience**

Remplacer galvanomètre par générateur de courant. Observer l'effet dans les deux sens.

**Illustration**

Le bilan est le même. Schéma de conversion électrique => mécanique.

**2 - Machine à courant continu**

## 2.1 - Structure et principe

Rotation permet miniaturisation et transport, mouvement continu.

### Illustration

*Présentation de la MCC (rotor, stator, induit, entrefer...). Raisonement qualitatif sur une spire (ligne neutre). Importance du système balais-collecteur.*

## 2.2 - Equations de fonctionnement

### Calcul

*Couple électromécanique et équations de fonctionnement, fem d'induction, fonctionnements moteur et générateur.*

## 2.3 - Etude du moteur à excitation indépendante

### Calcul

*Equation de fonctionnement par la loi des mailles, démarrage, point de fonctionnement du moteur.*

### Illustration

*Rendement par schéma de bilan de puissance. Pertes cuivres et pertes fer. ODG (90%).*

Avantages et inconvénients de la MCC.

## 3 - Machines à champs tournants

### 3.1 - Production d'un champ magnétique tournant

#### Expérience

*Champ triphasé et aiguille qui tourne, retrouver la fréquence du secteur.*

### 3.2 - Machine synchrone

#### Illustration

*Notations et fonctionnement, démarrage.*

Utilisation, avantages et défauts.

### 3.3 - Machine asynchrone

Expliquer la différence avec la machine synchrone.

#### Calcul

*Courant induit dans la bobine, couple électromoteur moyen exercé sur la bobine.*

Avantages et inconvénients.

## Conclusion

Il en existe d'autres (haut parleur...)

#### Illustration

*Tableau comparatif de la banque d'images.*

#### Avis

*Leçon sprint, reprise sur Jules, mais normalement très bonne. Les deux livres en compléments sont ceux utilisés par Jules. La relecture de sa leçon est à faire en complément de cette fiche. Transparents : rails de Laplace fonctionnement générateur et bilan ; rails de Laplace fonctionnement moteur et bilan ; machine à courant continu 1 (construction et lignes neutre  $B=f(\text{angle})$ ) ; machine à courant continue 2 (une spire moteur/frein, global et ligne neutre) ; moteur à excitation indépendante point de fonctionnement et bilan de puissance ; production champ tournant et théorème de Ferraris ; machine synchrone ; moteur asynchrone.*

#### Remarques

*Puissance des forces de Lorentz nulle. Nullité à la ligne neutre => plusieurs spires lisse le courant. TGV : MCC puis asynchrone. Notion de nombre de pôles magnétiques. Préciser rotor/stator. Donner des ODG.*

**Ce que dit le jury...**

Dans cette leçon, le plus grand soin dans la définition des orientations et des conventions de signe s'impose.

Les applications doivent occuper une place significative dans la présentation.

Il n'est pas nécessaire de traiter en détail les deux types d'inductions.

Ce ne sont pas les machines de technologie complexe qui illustrent le mieux les idées en jeu.

Les notions de base sur l'induction sont supposées connues.

Il est impératif de faire le lien entre f.e.m. et courants induits.

Il faut orienter les circuits filiformes et ne pas s'y limiter : les applications mettant en jeu des courants volumiques induits sont particulièrement appréciées.

Les moteurs doivent au moins être mentionnés comme application, ainsi que les transformateurs.

Il ne faut pas confondre force électromotrice et différence de potentiel.

**Bibliographie**

Fiat, Toute la physique de SPE : Pour le cours, le haut parleur.

Garing, Magnétisme : Pour le freinage magnétique.

Garing, Les 1001 questions de la physique en prépa PC/PC\* : Pour le chauffage par induction.

Pérez, Electromagnétisme : Pour des compléments.

Taillet, Dictionnaire de physique : Pour des précisions, toujours utile.

**Introduction**

Cadre de l'ARQS.

**1 - Phénomène d'induction****1.1 - Mise en évidence expérimentale****Expérience**

Faire rentrer un aimant dans une bobine.

Exploiter très soigneusement et jusqu'au bout.

Apparition d'un courant induit dépendant du sens de variation de variation de B.

**1.2 - Cas de Neumann****Illustration**

Définir les notations.

**Calcul**

Champ électromoteur.

Loi de Faraday.

Commenter la loi de Lenz.

**1.3 - Cas de Lorentz****Calcul**

Changement de référentiel pour les champs.

Champ électromoteur.

Loi de Faraday, qu'on admettra sans démonstration.

**1.4 - Cas général**

Somme d'un terme de Neumann et d'un terme de Lorentz si indéformable.

Insister sur le fait que les différents cas représentent le même phénomène d'induction.

## 2 - Production de courants induits

### 2.1 - Le transformateur

Définir rapidement inductance propre et mutuelle.

#### Illustration

*Poser les équations.  
Détailer les hypothèses du modèle du transformateur parfait.*

#### Calcul

*Rapport de transformation pour les courants et les tensions.*

On peut amplifier un courant ou une tension, mais pas les deux à la fois.

Intérêt pour EDF.

#### Expérience

*Vérification rapide du rapport sur un transformateur pédagogique.*

### 2.2 - Freinage par courants de Foucault

#### Expérience

*Chute d'un aimant dans un tube conducteur.*

Parler des camions.

### 2.3 - Chauffage par induction

Explication qualitative.

## 3 - Conversion électro-mécanique : Haut parleur

### 3.1 - Étude expérimentale

#### Expérience

*Faire constater les deux cas : mise en mouvement lorsqu'on fait passer un courant, apparition d'un courant lorsqu'on force un mouvement.*

### 3.2 - Mise en équation

#### Calcul

*Se focaliser sur un des deux cas.  
Bien expliciter la force de Laplace.  
Bien insister sur les endroits où les phénomènes d'induction apparaissent.*

## Conclusion

Ouverture vers les moteurs, la MCC en particulier.

#### Avis

*Leçon classique normalement, être rigoureux. Insister sur les applications.*

#### Remarques

*Couplage parfait différent de modèle du transformateur parfait.  
Lenz ok si référentiel Galiléen.*

**Ce que dit le jury...**

*Justifier la résonance. Parler du facteur de qualité. Exposer les aspects pratiques.*

**Bibliographie**

*Atkins, Chimie Physique : Chapitre complet sur le sujet. Relaxation tableau.*

*Cohen-Tannoudji, Mécanique quantique 1 : Calcul semi-classique et calcul quantique bonus.*

*Garing, Milieux magnétiques : Relaxation calcul.*

*Basdevant, Mécanique quantique : Pour l'introduction.*

*Barthes, RMN macroscopique - BUP 947 : Expérience de RMN macroscopique.*

**Introduction**

On a vu en MQ le spin qui est un moment cinétique.

Preuve expérimentale par Stern & Gerlack en 1933 par mesure du moment magnétique du proton à 10% près.

Rabi en 1939 : facteur 1000 gagné sur la mesure de  $\vec{\mu}_p$  par rapport à S&G, grâce à la RMN.

Rabi Nobel 1944 : contact radio avec la matière.

**1 - Description théorique****1.1 - Dipôle magnétique dans un champ B permanent.**

Hamiltonien, rapport gyromagnétique, base  $|I^2, I_z\rangle$ , ECOC, Diagramme de dégénérescence des énergies.

Se limiter à la RMN H et donner des ODG. Méthode radiofréquence très sensible, non destructive.

Comment exciter ces transitions qui sont la RMN ?

**1.2 - Loi d'évolution du moment magnétique.****Calcul**

*Calcul de la précession via le théorème d'Ehrenfest (analogue classique du TMC) et relations de commutation des moments cinétiques. Attention ce sont des valeurs moyennes.*

**Illustration**

*Animation CD Basdevant sur la précession.*

Pour perturber, appliquer B1 faible et orthogonal à B0 (ne pas changer les gaps en énergie), dans le repère tournant (sinon deux effets antagonistes pour changer l'angle du moment magnétique, lié à l'énergie moyenne).

**Illustration**

*Expliquer via des schémas sur transparents*

**Calcul**

*Calcul de la précession dans le référentiel tournant. Attention subtilité sur le vecteur unitaire de B0.*

**Illustration**

*Animation CD Basdevant sur la résonance magnétique.*

*Faire varier les paramètres pour illustrer les différents cas exposés.*

Reconnaître une forme lorentzienne ( $1/(1+x^2)$ ). En déduire un ODG du facteur de qualité.

Préparer si on a le temps démonstration quantique sur transparent pour les questions.

Que se passe-t-il si on coupe B1 ?

**1.3 - Phénomènes de relaxations.****Calcul**

*A l'équilibre, distribution de Boltzman, calcul de l'écart entre populations  $\Delta N$  à température ambiante.*

*En déduire l'expression de l'aimantation M, proportionnel au signal.*

Interactions donc pas de précession éternelle. Deux types d'interactions.

## Illustration

### Tableau

$T_1$ , Mlong, eq. thermique extérieur, spin-réseau, limite taux de mesure.

$T_2$ , Mtrans, perte de cohérence intérieur car B inhomogène, spin-spin, limite durée mesure.

Montrer les équations de Bloch, qui traduit empiriquement ce phénomène, dans R puis R'.

Rediscuter le nouveau facteur de qualité et ODG de Q,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $\omega_0$ ,  $\omega_1$ .

## 1.4 - Couplage entre dipôles.

## Calcul

Expliquer le couplage de façon qualitative avec un schéma au tableau. En déduire doublement du pic.

Généraliser à n pics avec effet de toit (Attention coefficients du binôme ok pour  $s=1/2$ ).

## 2 - Applications

### 2.1 - Appareillage.

Lister et montrer les différents éléments sur l'expérience.

(Electroaimant, refroidissement N et He, émetteur, récepteur)

### 2.2 - Mesure.

Balayage champ ou fréquence ( $B_1/B_0$  fixe,  $B_0/B_1$  variable) : problème car précis => lent.

Méthode impulsionnelle par TF.

## Expérience

Faire mesure de RMN macroscopique. Montrer et expliquer aussi sur le gyroscope.

### 2.3 - Spectroscopie.

Très utilisé en chimie : environnement -> signal -> structure. Ecrantage.

Déplacement chimique permet de comparer. Référence TMS. Protons équivalents et couplage J3.

Donner des ODG de  $\delta$ .

## Illustration

Exemple éthanol. Cas des aromatiques.

Possible aussi sur cristal car dépendance en angle.

### 2.4 - IRM : Imagerie par Résonance Magnétique.

## Illustration

Gradient de champ B -> signal proportionnel à densité selon l'axe du gradient ->  $I=I(z)$ .

Répétition dans différentes directions : localisation.

Bon contraste si  $T_1$  et  $T_2$  faibles => Agents de contraste ( $T_1, T_2$ ),

Taux de répétition ( $T_1$ ) et écho de spin ( $T_2$ ) à expliquer avec les mains.

## Conclusion

On a expliqué en raffinant à chaque étape et montré les aspects expérimentaux. Devenu incontournable en chimie, utile en médecine (AVC, RMN fonctionnelle).

## Avis

Testée pendant l'année, très bonne leçon.

Leçon longue, il faut aller très vite !! Commencer la deuxième partie à 35 minutes.

## Remarques

- Le signal temporel enregistré s'appelle FID pour Free Induction Decay.

- Stern se trouvait être à un facteur 3 près la valeur du moment magnétique prédite par la théorie de Dirac. Ce facteur trois est dû au fait que le proton est une particule composée de trois quarks (uud).

- Le vecteur aimantation est la résultante volumique des moments magnétiques microscopiques. Ils sont désynchronisés d'où l'effet de moyenne. La minimisation de l'énergie est possible grâce aux frottements et pertes avec l'extérieur.



**Ce que dit le jury...**

*Le jury n'attend pas une présentation abstraite et très générale de la notion de système bouclé. Il estime indispensable de s'appuyer sur au moins un exemple concret et détaillé avec soin. Les notions de système linéaire et de fonction de transfert doivent être précisément définies. Il y a souvent confusion entre système bouclé et contre-réaction. La stabilité des systèmes bouclés est mal comprise. Le bouclage ne se limite pas uniquement à une fonction d'asservissement. Le lien entre les réponses temporelle et fréquentielle est un aspect important. Cette leçon doit être préparée avec soin avant le concours. Un oscillateur auto-entretenu constitue un exemple de système électronique bouclé. Cette leçon ne doit pas se limiter à la manipulation des transformées de Laplace. Cette leçon doit comporter des illustrations expérimentales. Expliciter à quoi correspondent les signaux d'entrée et de sortie, le signal de rétroaction, le signal différentiel. Il est insuffisant de se cantonner à la présentation de montages amplificateurs à amplificateurs opérationnels. Il faut en particulier dégager les changements qualitatifs que peut introduire le bouclage, notamment l'apparition d'oscillations ou la stabilisation d'une chaîne directe instable.*

**Bibliographie**

*Pérez, Electronique : Pour les rappels, le filtre de Wien théorique, la PLL aussi, les applications.*  
*Pérez, Mécanique : Pour le vase de Tentale.*  
*Fiat, Toute la physique de SPE : Pour le multivibrateur astable.*  
*Duffait, Expériences d'électronique : Pour le filtre de Wien expérimental, la boucle à verrouillage de phase.*  
*Duffait, Expériences d'optique : Pour le laser.*  
*Dangoisse, Les lasers : Pour des compléments sur les lasers.*  
*Manneville, Electronique tome 2 : Pour la PLL en calcul.*  
*BFR, Mécanique 2 : Pour le stick-slip corde de violon.*  
*Sanz, Physique PC/PC\* : Pour le stick-slip aussi.*

**Introduction**

On a vu déjà des oscillations de façon théorique, essayons de voir à quoi ça sert en pratique.

**1 - Oscillateurs quasi-sinusoïdaux****1.1 - Rappels****Illustration**

*Bouclage, classement des oscillateurs, condition de Barkhausen sur l'amplitude et sur la phase.*

**1.2 - Oscillateur de Wien****Calcul**

*Présentation théorique sous la forme de fonctions de transfert A et B (à prendre dans filtres). Ecrire la condition sur le gain.*

**Expérience**

*Réaliser l'expérience. Remarquer que si on s'écarte des valeurs on a déformation ou arrêt des oscillations.*

Permet de sélectionner une fréquence précise. Application dans poste radio.

**1.3 - Laser****Illustration**

*Ici on fait juste une analogie sur la sélection des modes pour discuter cavité et milieu amplificateur avec le graphique habituel.*



## Expérience

Observer ce graphique expérimentalement avec la cavité Melles-Griot et un laser. Attention on ne voit que ce qu'il y a au dessus de  $\text{Gain}=1$ .

### 1.3 - Boucle à verrouillage de phase

#### Calcul

Présentation théorique. Utilité dans les ordinateurs.

#### Expérience

Si possible en monter une (comparateur de phase = multiplieur; passe bas ordre 4; OCT tout prêt ou à faire si on est cool.

Applications dans la synchronisation des horloges d'ordinateur.

## 2 - Oscillations à relaxation

### 2.1 - Vase de tentale

#### Expérience

Présenter l'expérience.

#### Illustration

Graphique débit/hauteur, décrire le mouvement et parler de seuil, analogie avec un comparateur à hystérésis inverseur.

Interprétation énergétique pour introduire l'intégration. Analogie avec multivibrateur astable. Application dans la mesure de composant et dans l'oscillateur commandé en tension de la PLL.

### 2.2 - Corde de violon

#### Expérience

Expérience stick-slip, mettre en évidence les deux phases du mouvement avec vidéocom.

#### Calcul

Présentation théorique. Si la phase est très faible alors la période est indépendante de la vitesse et on joue une *référence partielle* unique note mais riche en harmoniques.

## Conclusion

Ouvrir sur les asservissements.

#### Expérience

Eventuellement monter l'expérience d'asservissement pour parler deux secondes du signal d'erreur.

#### Avis

Leçon transversale sympa.

#### Remarques

$Q=1/3$  pour l'oscillateur à pont de Wien.  
Amplitude limitée par effets NL.  
On peut se contenter de cet oscillateur comme expérience.  
Bouclé = pas de chaîne d'entrée, différent de rétroaction.  
Attention convention de signe chaîne retour.

### Ce que dit le jury...

*L'analyse de Fourier est centrale dans cette leçon, et les oscilloscopes numériques permettent de la mettre en oeuvre très facilement. Il est tout à fait possible d'étudier des systèmes non linéaires. La fonction de transfert doit être correctement définie. Le lien entre les réponses temporelle et fréquentielle est un aspect important. Les seuls signaux envisagés sont analogiques et la conversation analogique/numérique est exclue. Une bonne place doit être consacrée aux applications. Cette leçon ne saurait se limiter à l'étude des filtres du premier ordre. Le jury attend la définition d'un filtre et de ses caractéristiques ainsi que l'exploitation pratique de ces dernières. Cette leçon qui doit être illustrée expérimentalement. Le jury souhaite voir comment le filtrage transforme un signal électrique quelconque. Lien entre la forme du diagramme de Bode du circuit, le comportement de celui-ci (intégrateur, dérivateur...) et les propriétés de l'équation différentielle associée. Il n'est pas correct de définir un déphasage à partir d'une tangente ou d'un arctangente. Ces leçons sont souvent présentées de façon beaucoup trop formelle. La relation entre les signaux d'entrée et de sortie est une convolution associée à une fonction de transfert. Pour cela il faut que le système soit linéaire et invariant, donc on ne peut utiliser ce formalisme pour trouver la fréquence propre d'un oscillateur de relaxation.*

### Bibliographie

*Pérez, Electronique : Pour la simulation.*

*Renvoizé, Physique PSI/PSI\* : Pour le cours.*

*Duffait, expériences d'électronique : Pour la modulation/démodulation, les types de filtres, détection de crête.*

*Sanz, Physique PCSI : Pour des compléments.*

*Brenders, Electronique PSI : Pour des compléments.*

*Fiat, Toute la physique de SUP : Pour des rappels.*

## Introduction

Intérêt du traitement de signaux physiques

## 1 - Analyse fréquentielle d'un signal électrique

### 1.1 - Signal périodique

#### Expérience

*Montrer à partir d'un logiciel qu'en sommant des sinusoides on obtient des signaux périodiques un peu comme on veut : triangle, créneau.*

#### Calcul

*Généralisation développement en série de Fourier, d'abord sin et cos, puis exponentiel.*

Insister sur l'équivalence entre représentation de Fourier et représentation temporelle. Propriétés vis-à-vis de la dérivation.

#### Expérience

*Décomposition du signal créneau ou triangle. Visualisation du spectre à l'oscilloscope. Tenter de relier parité du signal et des harmoniques.*

### 1.2 - Généralisation à un signal quelconque

Définition de la transformée de Fourier.

## 2 - Filtrage linéaire

### 2.1 - Système linéaire invariant par translation temporelle

Définition. Equation différentielle. Solution libre et solution forcée. Notion de fonction de transfert.

## 2.2 - Représentation temporelle et spectrale

S'appuyer sur l'exemple du filtre RC. Equation différentielle. Introduction de la fonction de transfert. Equivalence des deux approches.

## 2.3 - Diagramme de Bode

Définir le diagramme de Bode. Montrer sa lecture : on superpose au diagramme de Bode le spectre du signal d'entrée, ce qui donne le spectre du signal de sortie.

### Calcul

*Calcul pour le filtre RC.*

### Expérience

*Illustration expérimentale avec le filtre RC. Mentionner la pseudo-intégration en envoyant un carré bien choisi.*

Application au filtrage du bruit.

## 2.4 - Différents types de filtres

Définir passe-bas, passe-haut, passe-bande et montrer les diagramme de Bode sur transparent. Parler de l'ordre du filtre. Dire un mot sur les Butterworth et compagnie.

### Calcul

*Etude d'un deuxième exemple : passe-bande d'ordre 2. Application à la sélection de la station radio. Définir facteur de qualité et bande passante. Résonance reportée à une autre leçon.*

### Expérience

*Tenter la réponse indicielle avec tracé automatique de Duffait.*

# 3 - Opération non linéaire

## 3.1 - modulation d'amplitude, principe et intérêt

Définir signal modulant, porteuse, modulé. Intérêt au transport d'information. Taille des antennes.

## 3.2 - Spectre du signal modulé

### Calcul

*Faire le calcul.*

Commenter l'enrichissement spectral dû aux non linéarités.

## 3.3 - Démodulation par détection synchrone

### Calcul

*Expliquer le principe.*

### Illustration

*Justifier à chaque fois à partir des spectres.*

## 3.4 - Démodulation par détecteur de crête

### Expérience

*Mise en oeuvre et discussion sur les temps caractéristiques.*

Ici on fait appel à un effet NL.

# Conclusion

Intérêt pratique. Généralité du phénomène de filtrage.

### Avis

*Mettre l'accent sur les applications.*

### Remarques

*Compromis amplification/pureté. Détection synchrone : on décale la fréquence pour sortir du bruit. Multiplicateur = pont de diode => NL. Idées : Equivalence des représentations temps-fréquence Possibilité de modifier de façon simple le contenu fréquentiel d'un signal.*

**Ce que dit le jury...**

Il est important de savoir justifier la forme générale d'une onde progressive et d'une onde stationnaire. Si la notion d'impédance est utilisée, il faut préciser pour quel type d'onde elle s'applique. Un milieu unidimensionnel peut aussi être dispersif alors que les candidats n'envisagent trop souvent que des signaux monochromatiques. Pour éviter de répéter de lourds calculs, il est recommandé de développer les analogies entre les différents exemples. Il faut également consacrer du temps à des notions plus concrètes ainsi qu'à l'aspect énergétique, souvent sacrifié. Une onde stationnaire n'est pas forcément résonante. Les notions d'onde progressive, d'onde stationnaire, doivent être illustrées par des exemples avec des ondes mécaniques ou électromagnétiques. On veillera à distinguer l'onde stationnaire de l'onde stationnaire résonante dans un système fermé.

**Bibliographie**

Taillet, Dictionnaire de physique : Pour la définition d'une onde, les analogies.  
Fiat, Toute la physique de SPE : Pour le couplage des variables.  
Garing, Ondes mécaniques et diffusion : Pour la corde de Melde (équation et énergie).  
Garing, Ondes électromagnétiques dans le vide et les milieux conducteurs : Pour le câble coaxial.  
Sanz, Physique PC/PC\* : Pour toute la leçon ou presque.

**Introduction****Expérience**

Agiter une corde et observer la vibration se propager.

Donner la définition d'une onde.

**1 - Différents modèles, une unique équation****1.1 - Corde de Melde****Illustration**

Schéma du système.

**Calcul**

Modélisation de la propagation d'une onde dans une corde de Melde (bien faire les hypothèses), obtention de l'équation de d'Alembert avec une vitesse caractéristique, on peut également noter l'existence de deux équations couplées, bien dire qu'on a ici une onde transverse mais qu'on pourrait avoir une onde longitudinale dans le cas de la compression d'un solide par exemple.

**1.2 - Câble coaxial****Illustration**

Schéma du système.

**Calcul**

Modélisation de la propagation d'une onde dans un câble coaxial à partir du modèle à constante réparties.

**1.3 - Autres systèmes****Illustration**

Evoquer d'autres systèmes. Faire un tableau d'analogies.

**2 - Résolution de l'équation de d'Alembert**

## 2.1 - Solution générale

### Calcul

*Démonstration.*

### Illustration

*Interprétation en termes de superposition de deux ondes progressives dans des sens inverses. Schéma pour expliquer le couplage des variables.*

## 2.2 - Notion d'impédance

Pour une onde progressive unique, lien entre les deux grandeurs couplées.

Flux/Gradient ou encore effet/cause.

### Calcul

*Coefficients de réflexion et de transmission. Notion d'adaptation d'impédance.*

### Expérience

*Réflexion au bout d'un câble coaxial.*

## 2.3 - Onde progressive périodique harmonique

Une base des solutions (via la décomposition en série de Fourier). Relation de dispersion.

## 2.4 - Ondes stationnaires

Une autre base des solutions (montrer l'équivalence entre les deux bases).

## 2.5 - Conditions aux limites

Choix de la base en fonction du problème, conditions aux limites et ondes stationnaires.

### Calcul

*Cas de la résonance de la corde de Melde.*

## 3 - Aspect énergétique

### 3.1 - Cas des ondes stationnaires

#### Calcul

*Energie totale comme somme de l'énergie contenue dans chacun des modes (corde de Melde).*

#### Expérience

*Fréquences propres de la corde de Melde.*

### 3.2 - Vitesse de propagation de l'énergie

#### Calcul

*Cas du câble coaxial, bilan local de conservation de l'énergie (définition du « flux » et de l'énergie volumique).*

## Conclusion

Ouverture vers la richesse de la physique des ondes, ondes dans les fluides, ondes EM, dispersion, absorption. Effets NL et soliton.

### Avis

*Ne pas tomber dans l'aspect trop calculatoire, mettre de la physique et bien interpréter. Beaucoup de choses à faire.*

### Remarques

*La masse impose la tension du fil.  
Vitesse = racine(Rappel/Cinétique).*

**Ce que dit le jury...**

Cette leçon peut être l'occasion d'introduire le modèle limite de l'onde plane progressive harmonique et de la comparer éventuellement à l'onde sphérique. L'aspect énergétique est trop souvent négligé. L'approximation acoustique est souvent mal dégagée. Les ondes sonores ne sont pas toutes planes progressives et harmoniques. Est-il vraiment indispensable de se placer d'emblée dans le cadre formel de la mécanique des fluides ? Un modèle unidimensionnel et scalaire n'est pas sans intérêt pédagogique. Le développement de l'aspect énergétique doit faire apparaître une densité d'énergie et un vecteur de propagation.

**Bibliographie**

Fiat, *Toute la physique de SPE : Pour le cours.*

Garing, *Les 1001 questions de la physique en prépa PC/PC\* : Pour le double vitrage et l'échographie, les ODG.*

Pérez, *Mécanique : Pour des compléments.*

Renvoizé, *Physique PC/PC\* : Pour le cours.*

**Introduction**

Je parle, vous m'entendez parce que l'air vibre. Propagation du son nécessite un milieu matériel.

**1 - Modèle et mise en équation****1.1 - Caractère ondulatoire****Expérience**

Visualisation à l'oscilloscope du caractère ondulatoire d'une onde sonore reçue par un microphone.

**1.2 - Approximation acoustique****Calcul**

Onde de surpression, approximation acoustique (ODG)

Equation d'Euler et équation de conservation de la masse.

**1.3 - Modèle du fluide isentropique****Calcul**

Discuter les ordres de grandeur (domaine de validité en fréquence).

**1.4 - Équation d'onde****Calcul**

Etablir et déduire la vitesse caractéristique.

**Expérience**

La mesurer dans l'air, vérifier que ça correspond à la prédiction théorique.

On discrimine ainsi deux modèles.

**2 - Solutions de l'équation****2.1 - Solutions particulières : OPPH**

Décrire ces solutions

**2.2 - Impédance****Calcul**

Lien entre la vitesse et la pression, l'onde sonore est une onde de compression.

## 2.3 - Ondes stationnaires

### Calcul

*Conditions aux limites dans un tuyau acoustique, modes propres de vibration.*

## 2.4 - Bilan énergétique

### Calcul

*Construction de la densité d'énergie à partir de la conservation de l'énergie et de l'expression du flux de puissance.*

## 2.5 - Intensité sonore

### Illustration

*Définition, seuil de détection et seuil de douleur.  
Diagramme de Fletcher.*

## 3 - Réflexion et transmission à l'interface entre deux milieux

### 3.1 - Relations de continuité

Les donner en justifiant.

### 3.2 - Coefficients de réflexion et de transmission

#### Calcul

*En pression et en énergie, discussion dans le cas d'un milieu d'impédance infinie ou nulle (paroi rigide ou surface libre en sortie d'un tuyau acoustique).*

### 3.3 - Adaptation d'impédance

#### Calcul

*Application à l'échographie et/ou au double vitrage.*

## Conclusion

Ouverture sur les instruments de musique.

### Expérience

*Effet de résonance et harmoniques à mettre en évidence.*

### Avis

*Justifier tout, le Renvoizé est très complet.*

### Remarques

*Isentropique se justifie en comparant temps de diffusion et temps de propagation.  
Amplitude en  $1/r$  pour conservation de l'énergie.  
Au delà du GHz modèle plus valable.*



## Ce que dit le jury...

Les candidats doivent avoir réfléchi à la notion de *vitesse de groupe* et à son cadre d'utilisation. Il convient de ne pas consacrer trop de temps à présenter les circonstances rares où la vitesse de groupe ne s'interprète pas comme vitesse de transport de l'énergie. Les candidats ont à leur disposition une petite *animation* qui permet d'illustrer les notions délicates que sont la vitesse de phase et la vitesse de groupe. La notion de *paquet d'ondes* ne se réduit pas à la superposition de deux ondes. Lorsqu'ils décrivent un paquet d'onde beaucoup de candidats oublient que  $k$  et  $w$  sont reliés par la *relation de dispersion*. Il faut bien sûr s'intéresser aux *déformations* du paquet d'onde. Une superposition d'un nombre fini d'harmoniques ne permet en aucun cas de définir un paquet d'onde, puisque le phénomène reste périodique. Elle ne peut que constituer un intermédiaire avant le passage à la limite continue, qui doit être étudiée avec soin. Lorsqu'ils décrivent un paquet d'onde tridimensionnel, beaucoup de candidats oublient que  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  et  $w$  sont reliés par la relation de dispersion. Des exemples doivent être pris dans les *ondes mécaniques* et les *ondes électromagnétiques* par exemple dans la propagation d'information sur fibre optique. Le choix d'une représentation de Fourier spatiale ou temporelle pour représenter un paquet d'ondes dépend de la nature du problème de propagation étudié. Le concept de vitesse de groupe n'a de sens que si le phénomène de propagation étudié est associé à une relation de dispersion. La vitesse de groupe n'est pas toujours la vitesse de propagation de l'énergie. Le phénomène d'*étalement* du paquet d'ondes n'apparaît qu'à l'ordre deux du développement du vecteur d'onde en fonction de la pulsation.

## Bibliographie

*Fiat, Toute la physique de SPE* : Pour les définitions, le plasma aussi.

*Sanz, Physique PC/PC\** : Pour le paquet d'onde, le plasma.

*Renvoizé, Physique PC/PC\** : Pour les pendules couplés aussi, le plasma aussi, le GPS.

*Olivier, Physique PC/PC\** : Pour les pendules couplés, les solitons.

## Introduction

Cas d'un milieu dispersif, c'est-à-dire où la vitesse de propagation dépend de la fréquence.

### Expérience

*Dispersion de la lumière par un prisme. Donner l'explication rapide.*

## 1 - Chaîne d'oscillateurs couplés

### 1.1 - Modélisation

#### Illustration

*Présentation du dispositif.*

### 1.2 - Interprétation

#### Expérience

*Vérifier la pulsation de coupure (1s) sur l'expérience.*

### 1.3 - Vitesses

#### Calcul

*Les calculer, expliquer physiquement.*

## 2 - Paquet d'onde

### 2.1 - Réalité du paquet d'onde

#### Illustration

*Expliquer en quoi une onde sinusoidale est irréaliste.  
Bien définir le paquet d'onde comme une somme infinitésimale.*

### 2.2 - Faible dispersion

#### Calcul

*Calcul.*

### 2.3 - Forte dispersion

#### Calcul

*Interprétation en terme de limitation du débit d'information.*

## 3 - Ondes EM dans les plasmas

### 3.1 - Modélisation

#### Expérience

*Schéma du modèle de l'électron élastiquement lié.*

### 3.2 - Vitesses

#### Calcul

*Calcul et aspect énergétique.*

#### Illustration

*Graphique.*

### 3.3 - Positionnement GPS

#### Calcul

*Exercice corrigé.*

## Conclusion

Ouvrir sur la relativité et/ou la propagation guidée, les solitons.

#### Avis

*Bien choisir ce qu'on expose. Les trois livres de prépa se complètent bien. Recaser tous les ODG qu'on croise.*

#### Remarques

*Mesurer un indice optique revient à mesurer une vitesse de phase, alors que la mesure du temps de vol d'une impulsion dans un câble coaxial donne une mesure de la vitesse de groupe. L'absorption est une cause incontournable de dispersion (Exception = dispersion intermodale). Notation complexe si équation linéaire.*

**Ce que dit le jury...**

Les notions de *modes* et de *fréquence de coupure* doivent être exposées. On peut envisager d'autres *ondes* que les ondes électromagnétiques. La *propagation guidée* ne concerne pas les seules ondes électromagnétiques ou optiques. Il faut insister sur les *conditions aux limites* introduites par le dispositif de guidage. Domaine des *télécommunications* par exemple.

**Bibliographie**

*Pérez, Electromagnétisme* : Pour le guide d'onde rectangulaire, le câble coaxial.  
*Garing, Ondes électromagnétiques dans le vide et les milieux conducteurs* : Pour le guide d'onde rectangulaire, le câble coaxial.  
*Taillet, Optique physique* : Pour la fibre optique.  
*Pérez, Optique* : Pour la fibre optique.  
*Sanz, Physique PC/PC\** : Pour les deux plaques mode TE.  
*Renvoizé, Physique PC/PC\** : Pour.  
*BFR, Electromagnétisme 2 et 3* : Pour des compléments.  
*Dubost, Propagation libre et guidée des ondes électromagnétiques* : Pour des compléments.  
*Fiat, Toute la physique de SUP* : Pour le principe des calculs de statique.  
*Fiat, Toute la physique de SPE* : Pour établir d'Alembert dans la ligne.

**Introduction**

Importance du transport de l'information.

**Expérience**

*Laser et grosse fibre optique.*

**1 - Onde guidée entre deux plaques****1.1 - Mise en équations****Illustration**

*Schéma du dispositif.*

Enoncer l'équation de propagation et les conditions aux limites.

**1.2 - Mode TEM****Calcul**

*On considère  $k$  selon l'axe  $z$ , on obtient le mode TEM. Calculer  $E$  et  $B$  qui forme un trièdre direct.*

**1.3 - Mode TE****Calcul**

*Calcul des modes transverses électriques.*

**Illustration**

*Graphique de la relation de dispersion. Interprétation en terme de fréquence de coupure. Dispersion en fréquence et en mode.*

**Calcul**

*Faire l'étude énergétique à partir de l'expression des champs. Vitesse des modes.*

On a donc bien guidage, et en plus filtre passe haut.

**1.4 - Onde dans un guide d'onde rectangulaire**

TE est dispersif, on aimerait faire se propager TEM.

**Illustration**

*Schéma guide rectangulaire.*

## Calcul

*Montrer l'impossibilité d'un mode TEM en l'absence d'un conducteur à l'intérieur.*

## 2 - Câble coaxial

### 2.1 - Présentation

#### Illustration

*La structure du câble coaxial apporte une solution à ce problème. Schéma physique et électrique idéal.*

Rappeler le principe de calcul (Fiat) de la capacité et de l'inductance linéaire. ODG.

### 2.2 - Propagation

#### Calcul

*Etablir rapidement l'équation de D'Alembert.*

### 2.3 - Adaptation d'impédance

Donner la formule de l'impédance et du coefficient de réflexion. Discuter rapidement les cas limites.

### 2.4 - Pertes dans un câble

#### Illustration

*Rajouter les pertes (résistances) sur le schéma, écrire l'équation correspondante (télégraphistes) et donner un ODG des pertes. Dire que c'est beaucoup, et que les fibres optiques font mieux.*

## 3 - Fibre optique

### 3.1 - Présentation

Rapide descriptif de la structure. Saut d'indice / Gradient d'indice.

### 3.2 - Fibres optiques à saut d'indice

Description. Donner le calcul du déphasage après un aller-retour, la condition d'interférence constructive d'un mode, la relation de dispersion. Conclure que c'est en gros comme le guide d'onde métallique. Dispersion et déformation : Limitation par l'étalement des pulses. On peut faire mieux et éviter la dispersion intermodale avec les fibres à gradient d'indice.

### 3.3 - Fibres optiques à gradient d'indice

Donner l'équation de Newton optique. Expliquer de façon qualitative. On a le même chemin optique pour tout angle d'incidence c'est à dire différents modes.

### 3.4 - Utilisations

ODG de l'atténuation, de la bande passante, répéteurs tous les 40km (100 fois moins que pour un coax). Leur défaut sont le prix et la fragilité.

## Conclusion

Ouvrir sur les solitons. Pourquoi pas celui de Peregrin, mis récemment en évidence dans les fibres optiques par une équipe française.

#### Avis

*Leçon pas simple à mes yeux.*

#### Remarques

*Coaxial = blindage et âme, perte de 3dB/km. Fibre = gaine et coeur, pertes <1dB/km. Les modes TE et TM forment en fait une base de l'ensemble des modes qui peuvent se propager dans le guide d'onde. Ceci vient du fait que l'on peut découpler les équations de Maxwell. Une fibre optique à gradient d'indice bien calibrée compense bien la dispersion intermodale mais il reste une (faible) dispersion intramodale qui est due à l'absorption par la fibre. La longueur d'onde de 1,3 microns choisie en pratique est celle qui limite au maximum cette dispersion. La dispersion intramodale est due à un terme supplémentaire dans l'équation de propagation, qui n'est plus l'équation de d'Alembert. La dispersion intermodale est une dispersion effective, qui relie  $k_z$  à  $w$ . Aller vite sur le modèle à constantes réparties. Attention aux erreurs de calcul dans le Taillet.*

**Ce que dit le jury...**

Les *conventions* adoptées doivent être précisées avant toute discussion sur la partie imaginaire du vecteur d'onde. Il y a souvent confusion entre *absorption* et *atténuation*. Dans un *diélectrique*, l'équation de propagation ne peut être écrite sans précaution : en général la *permittivité* dépend de la fréquence et est complexe. Le modèle de l'*électron élastiquement lié* ne peut être utilisé sans en discuter les *limitations*. Les *aspects quantiques* de l'*interaction* entre l'onde électromagnétique et la matière peuvent être évoqués. Le lien entre le terme de rappel et la force électrostatique n'est pas fait et l'origine du terme de frottement fluide n'est pas interprétée. Il est parfaitement inutile et contreproductif de s'enfermer dans de longs calculs formels sur les parties réelle et imaginaire de l'indice de réfraction. Il est parfois utile de distinguer les raies de résonance des autres raies optiques.

**Bibliographie**

*Mauras, Electromagnétisme* : Pour les généralités, la loi de Cauchy, le modèle de l'électron et polarisation électronique, la propagation.

*Pérez, Electromagnétisme* : Pour la polarisation ionique.

*Renvoizé, Physique PC/PC\** : Pour le modèle de l'électron et la polarisation électronique, la propagation.

*Garing, Milieux diélectriques* : Pour la polarisation d'orientation.

*Ray, La physique par les objets quotidiens* : Pour le four à micro-ondes.

*Sanz, Physique PC/PC\** : Pour le bilan, la propagation.

*Taillet, Dictionnaire de physique* : Pour quelques définition et le côté historique.

*Fiat, Toute la physique de SPE* : Pour les rappels.

**Introduction**

On a vu la propagation dans le vide, et alors dans la matière ?

**Expérience**

QI et dispersion par un prisme. Remplir une cuve d'eau : (non)-absorption du laser/onde centimétrique.

**1 - Généralités sur les milieux diélectriques****1.1 - Définitions**

Définition du diélectrique. Hypothèses du diélectrique parfait. Définition du vecteur polarisation.

Equation locale de conservation de la charge.

**1.2 - Equations de Maxwell dans un diélectrique parfait**

Rappels de équations de Maxwell générales, pas de charges libres ici. Réécriture. Vecteur déplacement électrique D et excitation magnétique H. On a 12 relations pour 15 inconnues. Nécessité de relations constitutives.

**1.3 - Susceptibilité électrique dans le cas d'un DLHI**

Définition de la susceptibilité diélectrique. Scalaire dans le cas d'un DLHI.

**2 - Modélisation microscopique****2.1 - Polarisation électronique, modèle de l'électron élastiquement lié****Illustration**

Modèle de l'électron élastiquement lié, avec toutes ses hypothèses à discuter (matériau isolant, indépendance des électrons, peu dense pour confondre champ de l'onde et champ local, milieu non polaire, rappel élastique donc peu intense, rayonnement modélisé par frottement, champ uniforme donc longueur d'onde grande devant la distance atomique, cadre non relativiste donc force magnétique négligeable).

**Calcul**

Application du PFD. Solution en régime sinusoïdal complexe pour la position.

Remonter au moment dipolaire puis à la susceptibilité. ODG verre et diamant.

## 2.2 - Polarisation ionique

Idem avec des ions donc masse de  $10^3$  à  $10^5$  fois plus grande, donc pulsation propre plus faible.

## 2.3 - Polarisation d'orientation

Par exemple pour l'eau qui a un moment dipolaire. Polarisation qui résulte de l'application d'un champ extérieur. Régime statique. Hypothèses : on néglige les interactions dipôle-dipôle, on se place dans l'ensemble canonique.

### Calcul

*Calcul de la probabilité, intégration par parties, résultat de la permittivité. ODG pour l'eau.*

## 2.4 - Bilan

On a vu trois effets qui sont prépondérants à des fréquences différentes.

### Illustration

*Schéma de l'absorption de la molécule d'eau en fonction de  $\log(\omega)$ .*

# 3 - Equation de propagation et relation de dispersion

## 3.1 - Relation de dispersion

### Calcul

*Etablir l'équation de propagation pour E et pour B. Dédire la relation de dispersion.*

## 3.2 - Indice complexe

### Calcul

*En déduire indice réel et imaginaire dans l'approximation des milieux dilués. Remplacer dans l'expression de E, interpréter en propagation et absorption. On retrouve les mêmes expressions, courbes identiques.*

Définir dispersion normale et anormale. Vitesse de phase et de groupe (pas de sens quand absorption).

# 4 - Applications

## 4.1 - Dispersion dans un prisme, loi de Cauchy

### Calcul

*On part du résultat, on néglige les frottements, on retrouve la loi.*

## 4.2 - Four à micro-ondes

On voit donc pourquoi l'eau chauffe à 2.45 GHz et les aliments chauffent.

## 4.3 - Spectroscopie d'absorption infrarouge

Technique de spectroscopie en chimie.

# Conclusion

Ouvrir sur la RMN.

### Avis

*Passer très vite sur la première partie. Bien référencé. Penser aux ODG.*

### Remarques

*Donner la fréquence et le domaine optique associé. Effets LHI, effets anisotropes, effets Faraday et Pockels, la ferroélectricité, la piezoelectricité peuvent être évoqués. La loi de Cauchy est un bon classique. La dépendance en la densité de l'indice optique des milieux dilués permet d'expliquer le scintillement des étoiles et la nécessité de recourir à des techniques d'optiques adaptatives en astronomie, aussi utilisées en chirurgie oculaire. Dans toute la leçon, les ondes planes considérées sont monochromatiques. Les milieux considérés sont d'étendue infinie, immobiles dans un référentiel supposé Galiléen.*



**Ce que dit le jury...**

*Il faut s'interroger sur la dépendance en fréquence de la conductivité. L'étude peut également être menée en haute fréquence. Il faut bien caractériser le métal parfait comme limite du métal réel. Le jury attend que les candidats sachent exprimer le facteur de réflexion d'un métal réel et soient capables d'expliquer la couleur orangée du cuivre.*

**Bibliographie**

*Renvoizé, Physique PC/PC\* : Pour la modélisation, l'effet de peau.*

*Pérez, Electromagnétisme : Pour les coefficients de Fresnel.*

*Sanz, Physique PC/PC\* : Pour la ionosphère.*

*Garing, Les mille et une questions de la physique en prépa PC/PC\* : Pour les micros ondes et la radio, des ODG.*

*Garing, Ondes électromagnétiques dans le vide et les milieux conducteurs : Pour tous les calculs.*

*Garing, Les 1001 questions de la physique classe prépa : Pour les mêmes calculs, des ODG, la ionosphère aussi, des trucs sympa comme toujours.*

*Fiat, Toute la physique de SPE : Pour des rappels, éventuellement le modèle de Drude.*

*Olivier, Physique PC/PC\* : Pour la discussion sur l'origine inductive.*

**Introduction****1 - Modélisation d'un conducteur****1.1 - Modèle de Drude**

Hypothèse du modèle de Drude et modélisation des collisions par une force de frottement fluide.

**1.2 - Loi d'Ohm locale en régime sinusoïdal****Calcul**

*Etablissement de la loi d'Ohm locale par le formalisme complexe. ODG.*

*Discuter les limites basse et haute fréquence. Validité en fréquence de la Loi d'Ohm.*

**1.3 - Puissance transmise au conducteur****Calcul**

*Faire un bilan de puissance.*

**1.4 - Electroneutralité****Calcul**

*Démonstration, ODG et discussion de la fréquence plasma.*

**2 - Effet de peau****2.1 - Equation de propagation**

Approximation vérifiée => conductivité réelle. ARQS ok.

**Calcul**

*Etablir l'équation de propagation à partir de Maxwell et injecter la loi d'Ohm.*

*Aboutir à une équation de diffusion.*



## 2.2 - Epaisseur de peau

### Calcul

*Simplifier selon exercice 1D. Injecter solution complexe. Résoudre équation caractéristique. Trouver épaisseur de peau. Conditions aux limites pour finir. Passer en notation réelle. ODG.*

Remarque : L'amplitude est la somme de incident + réfléchi.

Discuter l'origine inductive.

## 2.3 - Applications

- Discuter choix installation EDF (Fréquence, voltage, diamètre fils).

- Fils de TP et intérêt câble coaxial tressé.

- Blindage.

### Expérience

*Expérience talkie-walkie (400Mhz) dans papier aluminium.*

## 2.4 - Cas limite du conducteur parfait

Le conducteur s'oppose à la pénétration du champ qui est alors réfléchi et les courants ne sont que surfaciques.

Application aux micros-ondes et ondes radio.

## 3 - Réflexion et transmission à la surface d'un conducteur

### 3.1 - Coefficients de Fresnel

Rappel du principe de la démonstration. Donner le résultat (incidence normale, polarisation tangentielle).

### 3.2 - Comportement à haute fréquence

Conductivité imaginaire. ARQS plus valable.

### Calcul

*Introduire la pulsation plasma et déduire l'indice.*

*Cas inférieur et supérieur à cette pulsation donne réflexion ou pénétration de l'onde.*

Application aux rayons X.

### 3.3 - Ionosphère

### Illustration

*ODG de la fréquence plasma. Illustrer et discuter les ondes radios AM et FM.*

## Conclusion

Effet de peau dans d'autres domaines, en gros quand il y a dispersion.

### Avis

*Attention, le Renvoizé et le Pérez n'ont pas la même convention de signe pour la phase. Leçon trop longue.*

### Remarques

*Justifiez par un ordre de grandeur le terme  $vB$  dans le modèle de Drude en estimant  $v$  avec  $mv^2 = 2kT$ . Dans la limite  $\omega T > 1$ , attention à l'électroneutralité. Dériver et discuter la relation de dispersion. ODG encore et toujours. Attention, il y a des lois de Fresnel pour une onde incidente polarisée normalement ou parallèlement au plan d'incidence. Parler d'énergie, calculer le vecteur de Poynting. On fait un bilan de quantité de mouvement entre  $t$  et  $t+dt$  sur un électron : pendant cet intervalle de temps il a une probabilité  $dt/T$  d'effectuer une collision ( $T$  : temps moyen entre 2 collisions) et  $1-dt/T$  d'avancer sous la force de Lorentz. Frottements car collisions. Flamme=plasma. Un conducteur n'aime pas les champs. L'effet de peau est propre aux conducteurs. L'effet de peau à une origine inductive.*

**Ce que dit le jury...**

La *polarisation* de l'onde émise n'est pas toujours présentée. L'accent doit être mis sur l'*interprétation physique* des propriétés du *rayonnement* dipolaire électrique. Le calcul des champs rayonnés doit être présenté de manière synthétique, en dégagant clairement les *approximations* successives nécessaires. La discussion des relations obtenues et la présentation d'applications sont essentielles. L'aspect énergétique doit être discuté ainsi que l'effet du rayonnement sur le mouvement du dipôle. Par ailleurs les candidats doivent avoir réfléchi sur le fait qu'un milieu homogène ne diffuse pas. Le rayonnement des dipôles induits par l'onde incidente ne contribue dans ce cas qu'à la propagation. Une explication qualitative de la *décroissance* des potentiels en  $1/r$ , alors que, dans ce cas, les champs  $E$  et  $B$  décroissent également en  $1/r$ , serait la bienvenue..

**Bibliographie**

*Renvoizé, Physique PC/PC\** : Pour la position du problème, les champs rayonnés, les antennes.

*Sanz, Physique PC/PC\** : Pour la position du problème, la diffusion.

*Feynmann, Mécanique 2* : Pour la directivité.

*Fiat, Toute la physique de SPE* : Pour des compléments.

*Pérez, Electromagnétisme* : Pour des compléments.

**Introduction**

Comment le rayonnement transporte l'énergie ?

**1 - Position du problème et approximations**

Distribution de charges (discrète), on cherche les champs rayonnés.

**Illustration**

*Approximation dipolaire électrique  $r > a$ , et hypothèse  $a \ll \lambda$ .*

**2 - Champs rayonnés****2.1 - Calcul des champs****Calcul**

*Calcul du potentiel vecteur. Calculer  $B$  complètement. Donner la formule de  $E$ .*

**2.2 - Zone de rayonnement****Calcul**

*Simplifier les termes dans la zone de rayonnement.*

**2.3 - Structure des champs****Calcul**

*Structure d'onde localement plane.*

**2.4 - Aspects énergétiques****Calcul**

*Calcul du vecteur de Poynting et de la puissance rayonnée. Cas de la charge accélérée.*

**Illustration**

*Diagramme de rayonnement.*

## 3 - Diffusion par des dipôles élémentaires

### Expérience

*Diffusion par du lait entier.*

### 3.1 - Modélisation

#### Illustration

*Expliquer que la matière est composée de dipôles qui vont rayonner (modèle électron élastiquement lié).*

### 3.2 - Puissance rayonnée

#### Calcul

*Effets de couleur*

### 3.3 - Polarisation par diffusion

#### Expérience

*Illustration expérimentale des deux effets (lait, polarisation) et justification qualitative.*

## 4 - Rayonnement d'antennes

### 4.1 - Champs rayonnés par une antenne de petite taille

Exploiter le 2.

### 4.2 - Rayonnement à grande distance d'une antenne réelle

#### Calcul

*Il faut sommer sur des antennes élémentaires (pour lesquelles l'ARQS des sources reste bien vérifiée).*

#### Illustration

*Montrer les diagrammes de rayonnement. Evoquer la directivité de façon qualitative.*

## Conclusion

Production de rayons X (cyclotron...). Invalidité du modèle classique de l'atome.

#### Avis

*Deux livres suffisent presque en fait.*

#### Remarques

*Commenter la structure de l'onde : décroissance en  $1/r$ , anisotropie, polarisation, planéité locale, en  $p$  seconde donc fonction de l'accélération.*

*Attention lorsque l'on parle des antennes et que l'on affirme que  $I(z)$  a une forme simple en cosinus, ça n'a rien d'évident et c'est même a priori faux en général.*

*Il est intéressant de discuter davantage des différentes zones (statique, intermédiaire, rayonnement).*

*Le dipôle de Hertz suffit.*

*L'hypothèse non relativiste est nécessaire.*

*Si on parle des antennes, lire le cours de l'ENS Ulm associé.*

*Charges indépendantes.*

**Ce que dit le jury...**

*Le caractère variationnel du principe de Fermat doit clairement ressortir. Cette leçon peut être l'occasion d'introduire le théorème de Malus. L'intérêt de l'introduction de la notion de chemin optique est central dans cette leçon. La notion de rayon lumineux reste imprécise. L'expression mathématique du principe de Fermat mettant en avant l'expression de l'infiniment petit du premier ordre mis en jeu est souvent ignorée. Par ailleurs, l'interprétation du stigmatisme est une application intéressante du principe de Fermat. Lien existant entre la notion de rayon lumineux et l'optique ondulatoire. Pour que cette leçon soit complète et afin de faire correctement le lien avec le théorème de Malus il est nécessaire de savoir relier chemin optique et phase d'une onde et de comprendre à la lumière de la théorie ondulatoire la concentration de l'énergie sur un rayon lumineux. On peut discuter sans calcul comment le principe de Fermat fonctionne dans la formation des images. Il est bon d'expliquer comment on est conduit à ne rechercher les courbes de chemin optique stationnaire que parmi les lignes brisées, et de souligner que le principe de Fermat ne fait que sélectionner les trajectoires possibles pour la lumière - sans préciser comment la répartition du flux s'effectue entre elles.*

**Bibliographie**

*BFR, Optique géométrique : Pour l'énoncé du principe, les lois de l'optique géométrique.  
 Houard, Optique : Pour la trajectoire dans un milieu à gradient d'indice, les mirages, les fibres optiques.  
 Pérez, Optique : Pour l'équation des rayons lumineux, les fibres optiques, l'introduction.  
 Dettwiller, Qu'est-ce que l'optique géométrique : Pour le rayon lumineux et chemin optique.,  
 Feynmann, Mécanique 2 : Pour l'analogie mécanique.*

**Introduction**

Introduction historique sur la dualité. Descartes en 1637 (corpuscule), Huygens en 1690 puis Maxwell en 1870 (onde). Ici approche géométrique par postulat de Pierre de Fermat en 1662, mais sous sa forme variationnelle moderne. On se limite aux milieux isotropes.

**1 - Principe de Fermat****1.1 - Rayon lumineux et chemin optique**

Approximation de l'optique géométrique. Définition d'un rayon lumineux en terme de vecteur de poynting et de mécanique quantique. Définition du chemin optique. Insérer la vitesse pour interpréter en terme de distance dans le vide. ODG.

**1.2 - Enoncé du principe****Illustration**

*Énoncer du principe d'extrémalisation. Explication de ce que signifie stationnaire.*

**1.3 - Analogie cinématique****Calcul**

*Analogie avec le nageur (aussi fait dans Fiat PCSI).*

**2 - Lois de l'optique géométrique****2.1 - Principe de retour inverse****Calcul**

*Démontrer et énoncer.*

**2.2 - Propagation rectiligne dans un milieu homogène****Calcul**

*Démontrer et énoncer.*

## Illustration

*Illustration.*

### 2.3 - Loi de Malus

#### Calcul

*Démontrer avec lemme et énoncer.*

### 2.4 - Lois de Snell-Descartes

#### Illustration

*Schémas réflexion et réfraction.*

#### Calcul

*On utilise le lemme pour être dans le plan d'incidence. Pour le reste on écrit la démonstration.*

## 3 - Applications

### 3.1 - Equation des rayons lumineux

#### Calcul

*Etablir l'équation des rayons lumineux, analogue du PFD.*

### 3.2 - Trajectoire de la lumière dans un milieu à gradient d'indice

#### Calcul

*Démontrer trajectoire parabolique.*

### 3.3 - Mirages

#### Illustration

*Explication qualitative. Mirages inférieurs et supérieurs.*

### 3.4 - Fibres optiques

#### Calcul

*Exercice saut d'indice et ODG puis qualitativement fibre optique gradient d'indice.*

#### Calcul

*Illustration explicative.*

## Conclusion

Théorie toujours utile. Mais n'explique pas tout. Ouvrir sur la diffraction. Ouvrir aussi sur la formulation variationnels dans d'autres domaines de la physique, en particulier le principe de moindre action en mécanique.

#### Expérience

*Diffraction d'un laser par une fente.*

#### Avis

*Merci à Emmanuel pour le plan.*

#### Remarques

*L'approximation de l'optique géométrique consiste à négliger les propriétés ondulatoires et vectorielles de la lumière. La longueur d'onde de la radiation considérée doit être très inférieure à la taille caractéristique  $D$  de variation des propriétés optiques (indice) du milieu. Travailler en 3D, caractère extrémal du principe moderne. Préciser le caractère homogène du milieux et autres quand il faut. On peut parler de Gladstone et Cauchy.*

**Ce que dit le jury...**

*Notions d'objet ou d'image réelle ou virtuelle maîtrisés avant les instruments d'optique et leurs limites. Diffraction et formation des images. Pas descriptive et qualitative. Appliquer avec soin les lois de l'optique géométrique et physique. Notions de diaphragme d'ouverture et de champ, de cercle oculaire, de clarté, de champ, de pouvoir séparateur. Comparer le diamètre du cercle oculaire à celui de la pupille de l'oeil. Notions de grossissements équipupillaire, résolvant et optimal.*

**Bibliographie**

*Houard, Optique : Pour la théorie (différents chapitres).  
Duffait, Expériences d'optique : Pour l'expérience.*

**Introduction**

Rapide historique. Même l'oeil a ses limites. Ici lunette de Kepler. Conditions de Gauss.

**1 - Présentation du dispositif et du cahier des charges****1.1 - Cahier des charges**

Observer des objets à l'infini, les grossir, avoir une image lumineuse, ne pas fatiguer l'oeil.

**1.2 - Objet et Oeil****Expérience**

*Avoir mesuré expérimentalement les focales avant tout. Créer sur le banc d'optique après avoir tout choisi et aligner, un objet (160mm) et un oeil (200mm) avec des barres. Rappeler que l'image est inverser sur la rétine.*

Schéma.

**1.3 - Construction de la lunette astronomique****Illustration**

*Présentation objectif (500mm), oculaire (120mm), système afocal. Notation et convention des angles.*

**1.4 - Grossissement****Expérience**

*Mesure expérimentale.*

Evaluation théorique (-4,15). Ordres de grandeurs commerciaux (initiation : -100, Yerkes : -2000).

On a déjà trois objectif du cahier des charges.

**2 - Collecte de la lumière par le système****2.1 - Diaphragme d'ouverture**

Définir diaphragme d'ouverture (quantité de lumière) et pupille d'entrée/sortie (son image par les lentilles en amont/aval). Justifier qu'il ne diminue pas le champ.

**Expérience**

*Illustrer expérimentalement avec un diaphragme derrière l'objectif. Chercher la pupille de sortie avec un papier.*

Compléter le schéma.

**2.2 - Cercle oculaire**

Définition (= pupille de sortie). Explication de l'intérêt.

**Calcul**

*Calcul de la position et du diamètre.*

**2.3 - Grossissement équipupillaire**

Définition. C'est un grossissement minimum d'utilisation. ODG (initiation : 10, Yerkes : 170).

## 2.4 - Clarté

Important pour la résolution des détails par l'oeil. Définition dans le cas ponctuel, intérêt. ODG (0,8).  
Cahier des charges complet.

## 3 - Champ

### 3.1 - Diaphragme de champ et vignetage

Définir diaphragme de champ (lieux visibles) et lucarne d'entrée/sortie (son image par les lentilles en amont/a-val). Justifier qu'il ne diminue pas la luminosité (au moins au début, après rôle se croisent).

#### Expérience

*Illustrer expérimentalement avec un diaphragme au foyer de l'objectif. Montrer que la lucarne d'entrée se situe dans le plan de l'objet, et la lucarne de sortie dans le plan de l'écran. Discuter champ de contour.*

#### Illustration

*Compléter le schéma. Expliquer le vignetage.*

### 3.2 - Champ objet et champ image

#### Expérience

*Intérêt d'un diaphragme de champ (diminue champ de contour mais réduit champ d'observation).*

#### Illustration

*Schéma explicatif.*

#### Calcul

*Calcul du champ observable et ODG.*

## 4 - Résolution

### 4.1 - Abbérations

#### Expérience

*Ajouter un verre de champ (conjugue les deux autres lentilles, grand diamètre) et discuter les abérations. On corrige ainsi la distorsion mais pas les abérations chromatiques.*

### 4.2 - Diffraction

Calcul de la limite de résolution par critère de Rayleigh. ODG. Illustration pour expliquer. Bonus : illustrer expérimentalement.

Comparaison avec l'oeil, notion de grossissement résolvant et optimal.

## Conclusion

Ouvrir sur l'apodisation, Hubble et l'optique adaptative.

#### Avis

*Revenir sur le cahier des charges au fil de l'exposé pour y répondre.*

#### Remarques

*Montage impeccable. Clarté : le facteur de transmission des éléments de la lunette est limitant aussi. Conditions de Gauss pour le bon fonctionnement de la lunette. Les plus grands télescopes actuels ont un diamètre de 10m, la turbulence est ce qui limite la résolution d'un instrument dès que l'on dépasse un diamètre de 20cm. En France, la limite de résolution est le plus souvent supérieure à 1". Newton a fait le télescope en pensant qu'on ne pourrait pas corriger les abérations chromatiques. Lunette de Yerkes = la plus grande lunette au monde, construite en 1897 (à l'exception d'une lunette fabriquée pour une exposition universelle et qui n'a jamais marché correctement).*



### Ce que dit le jury...

*Il faut réfléchir à l'opération de moyenne réalisée par le détecteur et il est bon de connaître quelques ordres de grandeurs à ce sujet. Dans cette leçon doivent apparaître les problèmes liés aux détecteurs (moyennes quadratiques) et aux sources (processus d'émission et nature des ondes émises), conduisant à la nécessité d'utiliser des montages interférométriques pour obtenir un terme de corrélation. Les phénomènes de localisation sont souvent mal formulés ou ignorés. Cette leçon doit être illustrée expérimentalement, le candidat devant être en mesure de montrer clairement les effets de cohérence spatiale ou temporelle de la source. On ne doit pas se polariser d'emblée sur les dispositifs à division d'amplitude qui constituent la réponse au problème de perte de contraste par élargissement de la source. L'illustration expérimentale de la notion de cohérence est indispensable. La notion de cohérence n'est pas un point annexe mais un point central de cette leçon. Dans cette leçon difficile, la première partie relative à l'obtention des interférences à deux ondes doit être traitée soigneusement, même si elle paraît simple. La partie notion de cohérence doit faire l'objet d'une approche pragmatique, en évitant de présenter systématiquement un facteur de visibilité comme une transformée de Fourier. En particulier, il est important de faire comprendre pourquoi les résultats ne sont pas identiques avec une source quasi-ponctuelle et avec une source étendue.*

### Bibliographie

*Pérez, Optique : Pour des ODG.  
Sextant, Optique expérimentale : Pour l'expérience.  
Taillet, Dictionnaire de physique : Toujours utile.*

## Introduction

Recouvrement de deux ondes, il peut y avoir interférence. On s'intéresse à l'optique, dualité et historique.

### Expérience

*Cuve à onde et lampes de poches.*

## 1 - L'expériences des trous d'Young

### 1.1 - L'expérience historique

#### Expérience

*Fentes d'Young avec laser. 1 fente pour voir la diffraction. 2 fentes de même taille pour voir les interférences dans la diffraction.*

#### Illustration

*Schéma et champ d'interférence.*

### 1.2 - Interférences à deux ondes, modèle scalaire

Présentation du modèle scalaire, expression mathématique d'un vibration. Puissance. Energie. Eclaircement = valeur moyenne. Plusieurs ondes => on somme les amplitudes.

#### Calcul

*Cas de deux ondes, somme de 4 termes. ODG visible ( $10^{15}$  Hz). ODG temps capteur. Simplification de la formule pour retrouver la formule habituelle.*

#### Illustration

*Eclaircement en fonction de la différence de phase. Constater périodicité.*

## 1.3 - Analyse de l'expérience d'Young dans le cadre du modèle scalaire

### Calcul

Calcul habituel de l'éclairement en un point  $M(x)$  sur l'écran. Justifier les approximations  $x \ll D$  et  $a \ll D$ . Déduire l'interfrange.

### Expérience

Mesurer l'interfrange et comparer à ODG.

Pourtant avec deux lampes de poches on voit pas d'interférences, pourquoi ?

## 2 - Notion de cohérence de la source

### 2.1 - Influence de la non-monochromaticité et étude des sources, cohérence temporelle

La cohérence est en quelque sorte la mesure de la capacité à donner des interférences. Comparer laser et lampe de poche  $\Rightarrow$  taille (ponctuelle/étendue) et fréquence (monochromatique/polychromatique). On va donc s'intéresser à ces deux aspects.

### Illustration

Onde à  $w_1$  et  $w_2$  passant par les deux fentes  $\Rightarrow$  somme de quatre ondes au carré.

### Calcul

Ecrire les quatre amplitudes avec leurs phases. On a  $E = E_1 + E_2 + \langle \text{termes croisés} \rangle$ . Calculer un terme croisé. Un est clairement trop rapide pour l'oeil, le second l'est si l'écart de fréquence est inférieur à 10Hz. Sinon, tout se passe comme si on sommait les éclairissements de chaque fréquence.

Conclure sur la notion de cohérence temporelle.

### Illustration

ODG laser ( $10^{-6} \text{ nm}$ ), lampe spectrale (1nm), QI (200nm) et commenter.

Pourquoi pas raies fines alors qu'on a quantification de l'énergie ?

- Temps d'émission fini (10ns), train d'onde (diffraction temporelle, 100MHz).
- Effet Doppler (1GHz)
- Collisions (10 à 100 GHz).

### Illustration

Train d'onde et collision, récapitulatif de l'élargissement.

Irisation des deux systèmes d'interférences rouge et vert avec deux transparents.

### Expérience

Remplacer la source laser par une QI avec fente source fine. Introduire la largeur de cohérence temporelle comme la différence de marche maximale pour voir des franges. ODG. Interpréter les irisations et le brouillage.

### Illustration

Résumer : termes croisés pas vus si écart supérieur à 10Hz, cosinus pas vus si différence de marche supérieure à longueur de cohérence.

### 2.2 - Influence de la largeur de la source, cohérence spatiale

### Illustration

Schéma de deux points différents de la source.

### Calcul

Ecrire les 4 amplitudes (même fréquence), l'éclairement, un terme croisé. La première partie est trop rapide, la deuxième partie du terme croisé ne dépend pas du temps. On estime le nombre de train d'onde arrivant en 1ms à partir de la puissance du laser et de la MQ ( $10^{14}$ ). On a donc un moyennage statistique car la phase du train d'onde est aléatoire. Tout se passe comme si on sommait les intensités de chaque point source.

### Illustration

Deux systèmes d'interférence de même couleurs avec les transparents.

## Calcul

Calcul de la longueur de cohérence spatiale à partir de Thalès et Rayleigh. ODG (10 micromètres). Cohérence si l'étendu est inférieure à cette distance.

## Expérience

On augmente la largeur de la fente. On interprète.

## Illustration

On résume : Termes croisés non visible car moyennage statistique. Termes en cosinus non visible si l'extension spatiale de la source est supérieure à la longueur de cohérence. Noter qu'en fait ça dépend du système.

## Conclusion

Ouverture sur Fresnel-Arago et sur les interféromètres à division d'amplitude (on perd alors la non localisation contre un bon contraste peu importe l'extension).

## Avis

Relire la leçon d'Helmy. Ne pas oublier les valeurs moyenne. Se détacher de la bibliographie. Feynmann approuve cette leçon n

## Remarques

Attention à la méprise entre les interférences (noir à la place de lumière) et la superposition linéaire de deux ondes (battements). Dans les livres, les interférences sont à chaque fois définies à partir de l'éclairement, qui est à chaque fois défini avec une moyenne temporelle. Les trains d'onde ne sont qu'un modèle. Le profil spectral des raies peut aussi faire l'objet de questions. Une lampe basse pression présente des raies gaussiennes, dominées par l'élargissement Doppler. Dans une lampe haute pression, le profil est lorentzien, gouverné par les collisions entre atomes. Dans les cas intermédiaires le profil est appelé profil de Voigt. C'est un produit de convolution entre une gaussienne et une lorentzienne. Le degré de cohérence mutuelle est égal à la transformée de Fourier normalisée de la distribution d'intensité de la source = théorème de Zernike-Van Cittert. La transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation d'un signal est égale à sa densité spectrale en énergie = théorème de Wiener-Khintchine. Eclairement en EM = flux à travers une surface. Train d'onde = rectiligne (QCD ordre 1). En acoustique on est sensible à  $A$ , en optique à  $A^2$ . Champ d'interférence = recouvrement des faisceaux. ODG oeil (0,05s), CCD ( $10^{-6}$ s). La longueur de cohérence ne dépend pas que de la source mais aussi du système et de la distance entre les deux.

Mettre la leçon d'Helmy ici.

**Ce que dit le jury...**

Le calcul des *différences de marche* doit être effectué aussi simplement que possible, en exploitant au maximum les *déplissements de rayons*. L'influence de l'*extension spatiale de la source* sur la figure d'interférences est au coeur de la leçon. Il est indispensable de développer des *applications*. Le *Michelson* n'est souvent utilisé qu'en lame d'air. Les problèmes de *localisation* et les détails expérimentaux sont rarement présents, tout comme les applications. On peut, pour cette leçon, admettre que les dispositifs par division du front d'onde ont déjà été étudiés auparavant, ce qui permet au candidat d'entrer tout de suite dans le vif du sujet de la division d'amplitude et de son intérêt. Cette leçon doit être l'occasion pour le candidat de montrer qu'il sait conduire l'analyse théorique du phénomène expérimental montré. La notion de *cohérence*, spatiale et temporelle, est centrale et doit être abordée. L'intérêt des interféromètres à *division d'amplitude* sur ceux qui utilisent la *division du front d'onde* doit clairement ressortir de l'exposé. Compte tenu de l'importance expérimentale de ces appareils il est inutile de perdre du temps à l'étude exhaustive des *lames d'indice n* dans l'air, qu'elles soient à faces parallèles ou non, et souhaitable de développer quelques applications des interféromètres étudiés. Il faut savoir expliquer pourquoi on n'étudie les interférences qu'avec deux rayons incidents confondus : les intersections des émergents correspondants forment le lieu de localisation où les interférences subsistent usuellement quand la source est étendue. Le jury attire aussi l'attention des candidats sur la simplicité démonstrative et l'intérêt pédagogique des franges obtenues à partir d'un séparateur de faisceau laser.

**Bibliographie**

Fortunato, *L'interféromètre de Michelson - BUP 795* : Pour les ordres de grandeurs tolérables et détectables.

Brébec, *Optique ondulatoire (H-prépa)* : Pour le théorème de localisation.

Renvoizé, *Physique PC/PC\** : Pour l'interféromètre de Michelson, le filtre interférentiel.

Sanz, *Physique PC/PC\** : Pour l'interféromètre de Michelson. *Taillet, Optique physique* : Pour l'interféromètre de Fabry-Pérot.

Fiat, *Toute la physique de SPE* : Eventuellement pour les calculs.

Taillet, *Dictionnaire de physique* : Pour la différence entre les deux types d'interféromètres.

**Introduction**

Limites de la division du front d'onde. On veut de la luminosité avec aussi de la cohérence.

**Illustration**

*Différence division d'amplitude et division du front d'onde. Exemples.*

**1 - Théorème de localisation****1.1 - Extension de la source****Calcul**

*Différence de différence de marche entre deux points de la source.*

**Attention**

*Attention : il y a une erreur de signe dans la démonstration du H-Prépa.*

**1.2 - Condition de non brouillage et localisation**

Dégager l'intérêt de la division d'amplitude : elle permet le non-brouillage.

**Illustration**

*Énoncé du théorème de localisation.*

**2 - Interféromètre de Michelson****2.1 - Principe**

Bref historique. Présenter l'interféromètre : schéma projeté + montrer sur le dispositif réel.

## 2.2 - lame d'air

### Illustration

*Schéma équivalent.*

### Calcul

*Calcul de différence de marche.*

### Expérience

*Éclairage et lieu de localisation. Montrer les annulations de contraste du sodium.*

Application à la spectroscopie.

## 2.3 - Coin d'air

### Illustration

*Schéma équivalent.*

### Calcul

*Calcul de différence de marche.*

### Expérience

*Éclairage et lieu de localisation. Passage en lumière blanche et visualisation des défauts de surface d'une lame.*

## 3 - Interféromètre de Fabry-Pérot

### 3.1 - Description

#### Illustration

*Présenter le dispositif sur un schéma. Éclairage et lieu de localisation.*

### 3.2 - Figure d'interférences

#### Calcul

*Différence de marche par analogie avec le Michelson. Faire le calcul de l'intensité. Finesse. Meilleure résolution qu'avec un Michelson.*

### 3.3 - Application au filtre interférentiel

Principe rapide et ODG. On peut mentionner aussi les lasers.

## Conclusion

Applications : spectroscopie et mesure de défauts.

### Avis

*Centrer la leçon sur le théorème de localisation qui est le seul calcul indispensable à détailler.*

### Remarques

*Séparatrice pour différence de marche et dispersion. Il faut démontrer et commenter le théorème de localisation. Montrer en quoi la division d'amplitude résout le problème de la cohérence spatiale. Théorème de localisation : on recherche la zone du champ d'interférences dans laquelle la différence de marche ne dépend pas du point de la source étendue considérée. On peut faire un DL de vecteurs. La compensatrice est là pour la dispersion. Seuls quelques lasers monomodes stabilisés en fréquence ont une longueur de cohérence temporelle de plusieurs kilomètres. Pour les lasers de TP, l'ordre de grandeur est plutôt 50cm. VIRGO est un interféromètre de Michelson géant, avec un Fabry-Pérot dans chaque bras pour augmenter leur longueur effective. La localisation est plus stricte en coin d'air (vraie à l'ordre 1 seulement) qu'en lame d'air (vraie à tous les ordres). Toute dissymétrie de couleur dans la figure d'interférences est due à un réglage imparfait du parallélisme entre séparatrice et compensatrice. Défaut acceptable =  $\lambda/10$ , teinte plate de 40 degrés, compensatrice au micromètre près, parallélisme à 30" près. Connaître interféromètre de Mach-Zender (on recompose) et de Sagnac (on tourne en rond). Source étendue pour plus de lumière. Front d'onde = surface équiphase dans milieu isotrope. On peut utiliser un laser comme étalon.*

**Ce que dit le jury...**

Enoncer clairement les principes d'Huygens et Fresnel.

Insister sur les conditions de l'approximation, les discuter. Préciser l'intérêt dans les applications.

Ne pas se limiter aux applications simples, et justifier les calculs (traiter les phases avec soin).

**Bibliographie**

Pérez, *Optique* : Pour l'énoncé des principes et les calculs.

Goodman, *Introduction to Fourier Optics* : Pour le passage sur les lentilles.

Duffait, *Expériences d'optique* : Pour les expériences.

**Introduction**

Image en optique géométrique.

**Illustration**

Schéma de l'expérience à venir au tableau : Optique géométrique vs Optique ondulatoire.

Après l'expérience, dévoiler schéma complet avec les notations pour la formule qui suivra.

**Expérience**

Laser rouge sur fente réglable qu'on amincie pour observer la diffraction.

On observe un éparpillement de la lumière. Ce n'est ni de la réfraction ni de la réflexion, il s'agit de diffraction. Lié à la nature ondulatoire de la lumière, à la limitation du front de l'onde.

**1 - Diffraction de Fraunhofer****1.1 - Principe d'Huygens-Fresnel**

Permet de décrire la diffraction (On supposera onde lumineuse scalaire monochromatique).

**Illustration**

Enoncer les deux principes sur transparent : Huygens (1678) et Fresnel (1818). ("tout se passe comme si..."). Illustrer par un schéma au tableau les ondelettes sphériques du principe de Huygens. Fresnel ajoute les interférences.

En déduire la formule reliant les amplitudes complexes de l'onde reçue et de l'onde émise, à écrire au tableau.

**Illustration**

Dévoiler la formule écrite aussi sur transparent en précisant le terme correspondant à l'ondelette sphérique.

Caractériser l'objet diffractant en introduisant la fonction complexe de transparence.

Donner des exemples de la fonction de transparence (cas général, trou, objet opaque, déphaseur).

**1.2 - Approximation de Fraunhofer**

On s'intéresse maintenant à la diffraction à l'infini, dite de Fraunhofer. Décrire la situation à partir du schéma.

**Calcul**

On part de l'hypothèse  $OP \ll OM$ , c'est à dire qu'on se place à grande distance devant la taille de l'objet diffractant. On fait le DL vectoriel de la distance  $PM$  au deuxième ordre. (Adapter les notations.) Approximer la distance  $PM$  à l'ordre 0 au dénominateur et à l'ordre 1 dans la phase. On justifie cette différence par la présence d'une autre échelle de longueur qui est la longueur d'onde. Valable si ordre 2 négligeable  $\Rightarrow$  on abouti ainsi au critère de Fraunhofer pour le point d'observation. En faisant la même chose pour la source, on obtient la formule avec les vecteurs d'onde et les angles. Donner des ODG pour montrer que c'est un critère strict.

**Illustration**

Projeter critère de Fraunhofer, nouveau schéma avec vecteurs d'ondes et angles sources et diffractés, ainsi que la formule finale, où on reconnaît une TF qui est la représentation fréquentielle de l'objet.

**1.3 - Utilité des lentilles minces**

En OG on a calculé le déphasage induit par une lentille. L'écrire, en déduire la fonction de transparence. Remarque qu'il compense exactement le terme d'ordre 2. L'autre étant négligeable dans l'approximation pa-



raiale => conditions de Fraunhofer si la source et l'écran sont dans le plan focal d'une lentille mince.

## 1.4 - Cas d'une fente rectangulaire

### Calcul

*Donner l'expression des vecteurs d'onde sous l'approximation paraxiale, donner la fonction de transparence de la fente, et faire le calcul qui mène à des sinus cardinaux (à montrer). Attention on observe l'intensité.*

### Expérience

*Constater sur l'expérience et interpréter la différence entre les deux directions. Remarquer que la tâche centrale est deux fois plus grande que les autres, et qu'elle contient plus de 90% de l'énergie.*

## 1.5 - Propriétés de la figure de diffraction

### Expérience

*Observer figure de diffraction sur l'expérience : Translation, Rotation, Homothétie, Complémentaire.*

### Illustration

*Dévoiler les résultats sur transparent. Noter l'intérêt de la translations pour N objets répartis de façon aléatoire, et l'exception de l'image géométrique pour le théorème de babinet*

Si l'on ne respecte pas les conditions de Fraunhofer, alors on est dans la diffraction dite de Fresnel, à distance finie. La figure de diffraction est alors dans l'image géométrique au lieu d'être autour.

## 2 - Applications

### 2.1 - Résolution

Tout instrument d'optique (dont l'oeil) est limité donc diffracte et limite la résolution de l'image. Pourtant vous me lisez, mais moi je distingue deux poussières sur le tableau, pas vous => échelle caractéristique. Si lumière  $\lambda$  et pupille de diamètre  $d$ , tâche d'Airy (donner le diamètre angulaire de l'anneau central). En déduire le critère de résolution. (schéma tableau éventuellement.) Donner ODG oeil et télescope. Parler d'apodisation (lisser la fonction de transparence) pour résoudre ce problème.

### Illustration

*Montrer image ordi tâche d'Airy. Illustrer fonctions et leurs TF. Une brutale et l'autre douce.*

Compromis : Pas d'anneau secondaire, donc plus de pieds d'où le nom, mais tâche plus large.

### 2.2 - Filtrage

La diffraction n'a pas seulement des effets négatifs, elle peut être utile. Expliquer le principe de la filtration des fréquences spatiales dans le plan de Fourier (détramage = passe bas, nstrioscopie = passe-haut). Expérience d'Abbe : filtre selon la direction. Faire le schéma de l'expérience et dévoiler le transparent.

### Expérience

*Expérience d'Abbe en lumière blanche et grille. Expliquer le principe sur transparent ou au tableau.*

## Conclusion

Limites de l'optique géométrique. Diffraction possible sur d'autres ondes (son, vague, neutrons). Cas de Fraunhofer utile pour la formation d'images. Limite la résolution mais utile en pratique. Utilisée pour contrôler la planéité des surfaces dans l'industrie, et permet de sonder la matière (découverte double hélice de l'ADN en 1953 par Watson et Crick).

### Expérience

*Montrer la figure de diffraction complexe avec un petit ressort et un laser vert.*

### Avis

*Testée pendant l'année. Très bonne leçon mais il faut aller vite.*

### Remarques

*Modèle scalaire utilisé. Interpréter diffraction par les relations d'incertitude d'Heisenberg. Calcul de Kirchhoff justifie pas de retour. Holographie = Application des objets déphaseurs. Brouillage si polychromatique. Critère de Fraunhofer = Ondes planes, RIEN D'AUTRE !! Et surtout pas  $\lambda \ll a$ .*

## Ce que dit le jury...

Cette leçon donne souvent l'occasion de présenter les travaux de Bragg; malheureusement, les ordres de grandeur ne sont pas toujours maîtrisés. La notion de facteur de forme peut être introduite sur un exemple simple. L'influence du nombre d'éléments diffractants doit être discutée. Le jury souhaite que la diffraction d'ondes autres que les ondes électromagnétiques soit envisagée. C'est pourquoi l'intitulé 2008 précise dans différents domaines de la physique. On peut admettre que l'expression mathématique du principe de Huygens-Fresnel est acquise, ainsi que son application au cas d'une ouverture unique, plus particulièrement d'une fente fine. Il est inutile de faire l'étude de la diffraction de Fraunhofer qui doit être supposée connue et il est souhaitable de consacrer plus de cinq minutes à l'étude de la diffraction des rayons X par les cristaux par exemple. La leçon ne peut pas se limiter à une étude du réseau plan en optique. Il faut donc pouvoir dégager les idées importantes assez rapidement pour pouvoir passer à l'étude d'autres domaines. Cette leçon doit être illustrée expérimentalement de manière efficace. Le pouvoir de résolution d'un réseau est toujours présenté, mais la détermination de son expression théorique pose systématiquement des problèmes aux candidats. L'influence des différentes dimensions : largeur de fente, pas du réseau, largeur du réseau couverte par l'onde incidente, doit être clairement dégagée. Le calcul de la différence de phase entre les ondes qui interfèrent doit être justifié avec soin. Il faut également expliquer le calcul de l'amplitude diffractée lorsqu'on prend en compte la largeur finie des traits du réseau.

## Bibliographie

Ashcroft, *Physique des solides* : Pour des compléments bonus.  
 Garing, *Ondes mécaniques et diffusion* : Pour l'échographie.  
 Pérez, *Optique* : Pour la diffraction des électrons, la présentation et le calcul du réseau aussi.  
 Ray, *La physique par les objets quotidiens* : Pour l'échographie.  
 Renvoizé, *Physique PC/PC\** : Pour le réseau plan en spectroscopie aussi.  
 Garing, *Les 1001 questions de la physique en prépa PC/PC\** : Pour tout sur les réseaux (!).

## Introduction

On a vu des objets simples, maintenant structures périodiques.

### 1 - Réseau plan en optique

#### 1.1 - Position du problème

##### Expérience

Réseau éclairé de façon parallèle.

Définition d'un réseau. Eclairement parallèle. Rappel du principe de Huygens-Fresnel dans le cas de la diffraction de Fraunhofer. Donner des ODG de pas des réseaux et de longueurs d'ondes. Nature des ondes considérées (électromagnétiques). Nature de la structure périodique (1D).

#### 1.2 - Calcul de l'intensité diffractée

##### Calcul

Mener le calcul.

##### Calcul

Tracer la courbe et commenter.

Identifier facteur de forme (lié à la forme d'un motif, ici l'exponentielle) et facteur de structure (lié à la répartition des motifs).

## 1.3 - Utilisation d'un réseau en spectrométrie

### Calcul

*Formule des réseaux, ordres. Pouvoir de résolution. Discuter l'influence des différents paramètres. Tout dans le Garing.*

### Expérience

*Tout montrer expérimentalement.*

## 2 - Échographie

### 2.1 - Principe de l'échographie

Principe et utilisations de l'échographie. Donner des ODG de distance et de longueurs d'ondes. Nature des ondes considérées (acoustique). Nature de la structure périodique. Attention : En échographie ce n'est pas de la diffraction au sens strict : les transducteurs sont les sources secondaires qui vibrent de façon cohérente.

### 2.2 - Intérêt d'utiliser plusieurs transducteurs

#### Calcul

*Un réseau de transducteurs permet d'augmenter considérablement la directivité.*

### 2.3 - Balayage par déphasage

#### Calcul

*Un déphasage contrôlé entre les sources permet de choisir la position du maximum principal.*

## 3 - Étude de cristaux par diffraction

### 3.1 - Position du problème

#### Illustration

*Rappel rapide de cristallographie : définition des vecteurs du réseau.*

Diffraction de rayons X. ODG.

### 3.2 - Position des maximums de diffraction : approche de von Laue

Condition d'interférences constructives. Commentaire essentiel : on a une condition sur les trois composantes de  $k$ , et plus seulement sur une seule. Observer des pics dans les cristaux est donc beaucoup plus dur. Méthodes expérimentales : faisceau polychromatique, poudre, cristal tournant.

#### Expérience

*Montrer expérimentalement sur la diffraction des électrons (notice).*

## Conclusion

Sonder la matière. Découverte de l'ADN.

#### Avis

*Pas ma préférée car assez calculatoire à mes yeux, mais bons on verra.*

#### Remarques

*S'interroger sur la cohérence et l'orientation pour les applications. Souligner les analogies et les différences.*

### Ce que dit le jury...

Trop souvent, il y a confusion entre les processus élémentaires pour un atome et un ensemble d'atomes. De même le candidat doit préciser au cours de sa leçon le caractère monochromatique ou non du champ de rayonnement qu'il considère. Le laser n'est pas la seule application de cette leçon, ni la plus simple. Il est maladroit d'introduire les coefficients d'Einstein dans une situation de rayonnement parfaitement monochromatique. Ils ne doivent pas être évoqués dans le seul cas du rayonnement thermique. Le laser ne doit pas être présenté de façon trop superficielle. La résonance du Sodium est une arnaque.

### Bibliographie

Taillet, *Optique physique* : Pour la modélisation du milieu matériel aussi, les coefficients d'Einstein aussi, introduire les relations entre coefficients, l'importance relative des processus.

Dangoisse, *Les lasers* : Pour l'introduction, la modélisation du milieu, les coefficients d'Einstein et leurs relations, caractéristiques et principe du laser à trois niveaux.

Bretenaker, *Le laser* : Pour la cavité résonante.

Cagnac, *Lasers* : Pour introduire les relations entre coefficients.

Taillet, *Dictionnaire de physique* : Pour l'introduction, la conclusion, la fluorescence.

Duffait, *Expériences d'optique* : Pour la cavité Melles-Griot.

## Introduction

Historique, variété des applications. Pourtant appel à des concepts récent en physique.

## 1 - Interaction matière-rayonnement

### 1.1 - Modélisation du milieu matériel

#### Illustration

Atome et niveaux d'énergie (non dégénérés), fréquence.

Regardons les différents processus.

### 1.2 - Emission spontanée

#### Illustration

Description du processus et équations avec le coefficient d'Einstein. Discuter ses dépendances. Interpréter en terme de taux de désexcitation. ODG.

### 1.3 - Absorption

Même chose mais pour l'absorption.

### 1.4 - Emission stimulée ou induite

Même chose et dire que ça va intervenir dans le fonctionnement du laser.

### 1.5 - Relation entre les coefficients d'Einstein

Compatibilité entre Planck et Maxwell => émission stimulée (démarche d'Einstein). Relations dans le cas d'un équilibre thermique mais propres à l'atome. les coefficients d'Einstein sont intrinsèques et indépendants des conditions expérimentales.

#### Calcul

Faire la démonstration.

Connaître un seul des coefficients d'Einstein et la fréquence de la transition suffit pour connaître les trois.

### 1.6 - Importance relative des processus

#### Calcul

Montrer les dépendances : de la population des deux niveaux entre émission induite et absorption, de la fréquence entre émission stimulée (BF) et émission spontanée (HF).

## 2 - Application aux lasers

### 2.1 - Caractéristiques et principe du laser

#### Illustration

*Tableau de comparaison entre laser et lampe (Cohérence temporelle, cohérence spatiale, directivité, intensité).*

Expliquer le principe d'un laser et pourquoi deux niveau ne peuvent pas suffir.

### 2.2 - Laser à trois niveaux

#### Illustration

*Présentation. Schéma des niveaux d'énergie et transitions.*

#### Calcul

*Bilan de population. Condition pour inversion de population.*

### 2.3 - Rôle de la cavité résonante

Distinguer le rôle de l'émission et de la cavité résonante. Condition de résonance.

#### Illustration

*Graphique des modes avec gain du milieu et pertes.*

#### Expérience

*Mise en évidence expérimentale avec la cavité Melles-Griot. Estimation de l'ISL et de la longueur de cohérence.*

## 3 - Refroidissement d'atomes par laser

#### Calcul

*Expliquer et faire le calcul rapidement.*

#### Illustration

*Petit schéma pour expliquer.*

## 4 - Fluorescence

#### Expérience

*Montrer qu'on peut observer la raie UV du mercure (PVD) par fluorescence de la cellulose.*

#### Illustration

*Distinguer fluorescence (descend directement et vite) et phosphorescence (descend d'un autre état car couplage spin orbite et plus lentement).*

## Conclusion

Tout plein d'applications.

#### Avis

*C'était les 50 ans du laser il y a peu de temps.*

#### Remarques

*$1/A_{21}$  ne correspond pas directement au temps de vie du niveau. D'autres processus de désexcitation non radiatifs existent. Ne pas parler de section efficace. Importance de l'inversion de population. Ici équilibre signifie stationnaire pas équilibre thermique. Choisir  $A$  pour radiatif et  $\gamma$  pour non radiatif. Plus intense mais pas plus puissant. Energie apportée par pompage. Démarrage par un photo qui correspond à la transition et fait de nombreux aller-retours émis de façon spontanée. Dans la pratique, la raie atomique a une largeur non nulle (1,5GHz pour un laser He-Ne de montage), pour beaucoup due à des effets thermiques. Elle est a priori plus grande que la largeur de la résonance de la cavité (40MHz) qui permet donc d'augmenter la cohérence temporelle du faisceau. Il existe des règles de transition. L'ajout d'un réseau de diffraction à l'intérieur de la cavité d'une diode laser qui permet de sélectionner certains modes seulement.*

**Ce que dit le jury...**

*Le transfert de quantité de mouvement est souvent présenté par le biais de l'expérience de Compton, il peut également être illustré à l'aide d'applications modernes de l'interaction atome-rayonnement. Cette leçon peut éventuellement permettre de parler de la notion de superposition d'états. Le jury invite les candidats à réfléchir sur la physique à l'oeuvre à l'échelle de la longueur d'onde Compton. La notion de spin associée à un photon n'est pas toujours maîtrisée. Les expériences réalisées à l'aide d'une cellule photoélectrique sont souvent mal comprises ou interprétées abusivement. Les candidats cernent souvent mal pourquoi la notion de photon s'est dégagée de l'effet photoélectrique et du corps noir. Il ne faut pas oublier que le photon possède un moment cinétique. Les applications ne se limitent pas à l'effet Compton. Les récents développements dans le monde quantique constituent une mine d'applications pour cette leçon. Cette partie importante de la physique quantique est mal couverte par les manuels usuels. Idées : ralentissement d'atomes par la lumière, interférences avec des photons uniques, comportement de la lumière sur une lame semi-réfléchissante, information quantiques. Des expériences doivent être décrites et modélisées en prenant soin de donner des ordres de grandeur. Les échanges de moment cinétique méritent d'être discutés. On peut aussi s'intéresser à la création de paires, au moment cinétique d'un photon et à sa relation avec la polarisation d'une onde.*

**Bibliographie**

*Cagnac, Physique atomique tome 1 : Pour le corps noir, l'effet photoélectrique, l'expérience de Beth.  
Aslangul, Mécanique quantique tome 1 : Pour le corps noir aussi, l'effet photoélectrique aussi.  
Sanz, Physique PC/PC\* : Pour la quantité de mouvement et le moment cinétique.  
Dangoisse, Les lasers : Pour le refroidissement d'atomes.  
BFR, Mécanique 1 : Pour l'effet Compton.*

**Introduction**

On a vu que la lumière est une onde en optique. Ce n'est pas la seule description possible. On peut parler de photon aussi.

**1 - Mise en évidence du caractère corpusculaire du rayonnement****1.1 - La rayonnement du corps noir**

Rappeler les propriétés du corps noir, les courbes de rayonnement d'équilibre, la catastrophe UV et la loi de Planck. Relier avec l'hypothèse des paquets d'énergie quantifiée.

**1.2 - L'effet photoélectrique**

Etudier en 1905 par Einstein.

**Expérience**

*Expérience. Electroscope et lampe à vapeur de mercure, avec et sans verre pour mettre en évidence l'effet de seuil.*

**Illustration**

*Présenter courbes expérimentales et commenter. Dégager la notion de photon. ODG.*

On a donc bien des paquets d'énergie.

**2 - Caractéristiques du photon****2.1 - Quantité de mouvement****Calcul**

*Exercice corrigé. Déduire impulsion du photon.*



## 2.2 - Moment cinétique

### Calcul

*Suite de l'exercice. Déduire le moment cinétique du photon.*

## 2.3 - Masse du photon

### Calcul

*Déduire avec la quantité de mouvement et la relation de Planck-Einstein que  $m=0$ .*

## 3 - Expériences

### 3.1 - Effet Compton

#### Calcul

*A présenter plus ou moins rapidement, avec ou sans calcul. Mise en évidence de la quantité de mouvement.*

### 3.2 - Refroidissement d'atomes

#### Illustration

*Explication qualitative et discussion plus pratique.*

### 3.3 - Expérience de Beth

#### Illustration

*Présenter, mise en évidence du moment cinétique du photon.*

## Conclusion

Résumé : intuité par Planck, réaffirmé par Planck, confirmée par Aspect. Dualité. Ouvrir vers le formalisme quantique et la fonction d'onde.

### Avis

*Faire un calcul, passer les autres plus rapidement.*

### Remarques

*Etre clair sur la trajectoire de la leçon. La catastrophe UV est due à la divergence de la densité d'énergie. Les relations  $E=h\nu$  et  $E=hc/\lambda$  n'ont pas le même statut. La première est une des relations de de Broglie et fait partie des postulats de la mécanique quantique. La seconde s'en déduit en utilisant la relation de dispersion du photon dans le vide  $\nu=c/\lambda$ . En tant que particule quantique relativiste, un photon n'obéit pas à l'équation de Schrödinger, mais à l'équation de Klein-Gordon. Pour une particule de masse nulle, celle-ci se réduit à l'équation de d'Alembert. Compton = élastique. Photoélectrique = inélastique. Photon = boson de spin 1 mais valeur 0 interdite. En fait, piège magnéto-optique puis refroidissement par diminution de la largeur du piège. Longueur d'onde thermique à savoir démontrer (GP). On entend parfois que le corps noir et l'effet photoélectrique constituent des preuves expérimentales de l'existence du photon, ce qui est en fait faux. Ces deux effets pourraient s'expliquer à l'aide d'un modèle considérant le champ EM classique et la matière avec niveaux d'énergie quantifiés. Une vraie preuve expérimentale a été apportée par Philippe Grangier, Gérard Roger et Alain Aspect en 1986. L'idée de l'expérience est très simple : il s'agit d'envoyer de la lumière sur une lame semi-réfléchissante, et de mesurer les corrélations entre lumière réfléchie et lumière transmise.*



**Ce que dit le jury...**

*Cette leçon peut être l'occasion d'introduire simplement l'équation de Schrödinger. La signification physique des différents termes de l'équation de Schrödinger n'est pas toujours connue. Le jury constate qu'un nombre significatif de candidats confondent équation aux valeurs propres et équation de Schrödinger. Enfin, les candidats sont invités à s'interroger sur les aspects dimensionnels de la fonction d'onde et sur sa signification physique précise. La justification physique des relations de continuité aux interfaces est trop souvent éludée.*

**Bibliographie**

*Basdevant, Mécanique quantique : Pour Davisson et Germer, les fentes d'Young, la notion de fonction d'onde, le paquet d'onde, les inégalités d'Heisenberg, la stabilité de la matière.*

*Cohen-Tannoudji, Mécanique quantique tome 1 : Pour les ondes de De Broglie et ODG, l'équation de Schrödinger, les inégalités d'Heisenberg (ODG).*

**Introduction**

On connaît la dualité onde-corpuscule pour la lumière + historique. Cette dualité s'applique aussi à la matière.

**1 - Nature ondulatoire de la lumière****1.1 - Les ondes de De Broglie**

Donner la relation de 1923, on a donc une symétrie entre particule et onde. Donner des ODG.

**1.2 - L'expérience de Davisson et Germer**

Preuve en 1927.

**Expérience**

*Diffraction d'électrons (donc de la matière !). Faire un ODG (notice).*

**2 - Description quantique de la matière****2.1 - Fentes d'Young et quantiques****Illustration**

*Explication, onde de matière.*

**Expérience**

*Vidéo du CD.*

Mentionner le caractère probabiliste et l'impossibilité de savoir par quel fente l'atome passe sans détruire la figure d'interférence.

**2.2 - Description probabiliste : notion de fonction d'onde**

On remplace les 6 grandeurs Lagrangiennes par un champ scalaire complexe. Donner l'expression de la probabilité, commenter la dimension, la phase, la normalisation. Justifier le principe de superposition, et évoquer le chat de Schrödinger.

**Calcul**

*Expliquer l'expérience des fentes d'Young en faisant apparaître le terme d'interférence.*

*pas de référence*

**3 - Dynamique de la fonction d'onde****3.1 - Equation de Schrödinger**

Donner l'équation en l'admettant, constater la linéarité.

**Calcul**

*Cas d'une particule libre type onde plane. Relation de dispersion et interprétation en terme d'énergie.*

## 3.2 - Paquet d'onde

Problème : onde plane pas normalisable. Solution = paquet d'onde.

### Calcul

*Introduire le paquet d'onde. Noter qu'on a deux représentation possible échangeable par TF. Etudier la propagation, déduire la vitesse de groupe. Faire le lien avec le cas particule (impulsion centrale).*

### Illustration

*Cas limites : particule localisé ou onde plane.*

## 3.3 - Inégalités d'Heisenberg

On a une TF, donc on a l'inégalité, qu'on donne, sur les composantes. ODG.

## 3.4 - Stabilité de la matière

### Calcul

*Démontrer la stabilité et faire l'ODG.*

## Conclusion

Généralité de la dualité. Perte de la trajectoire, notion de probabilité en MQ. Ouverture sur les autres formalisme en MQ.

### Avis

*Il faut bien gérer le temps, la dernière partie est importante.*

### Remarques

*L'équation de Schrödinger n'est pas une équation de diffusion. la description quantique exige de remplacer six variables lagrangiennes  $r$  et  $p$  par un champ scalaire  $\psi$ . Parler de la dimension de la fonction d'onde. La nécessité de la construction du paquet d'onde est à amener à partir du caractère non normalisable de l'onde plane, et sa validité avec la linéarité de l'équation de Schrödinger. L'inégalité de Heisenberg porte sur les composantes. Si on va plus loin, spinneurs et matrice densité. Si relativiste, équation de Klein-Gordon (bosons) et Dirac (fermions). Dans un potentiel, la relation d'incertitude change légèrement.*

**Ce que dit le jury...**

*Cette leçon ne doit pas se résumer à un catalogue d'expériences retraçant l'histoire de la mécanique quantique, ni à une juxtaposition d'exemples sans une logique didactique. On attend par suite du candidat un choix raisonné d'un petit nombre d'exemples, traités de manière suffisamment approfondie afin de faire ressortir quelques concepts propres à la mécanique quantique. Le jury a relevé que dans les leçons évoquant l'expérience des franges d'Young, la notion de la perturbation de la mesure et son lien avec la disparition du contraste n'est pas comprise. Illustrer en quoi les phénomènes quantiques diffèrent des phénomènes décrits par la physique classique. Eviter autant que faire se peut d'aborder le formalisme mathématique. Le candidat pourra aborder la dualité onde-corpuscule (interférences de matière, quantification de l'énergie, effet tunnel), l'aspect probabiliste des phénomènes (interférence en lumière très faible ou avec des photons uniques, sauts quantiques dans les atomes excités ou les noyaux radioactifs, réflexion et transmission de photons sur une lame semi-réfléchissante), la complémentarité (mesures simultanées de position et de quantité de mouvement, illustrations de l'inégalité de Heisenberg), la mesure en physique quantique (expérience de Stern et Gerlach, exemples de perturbation du système par la mesure, réduction du paquet d'onde, mesures successives), les corrélations quantiques entre mesures (états intriqués).*

**Bibliographie**

*Basdevant, Mécanique quantique : Pour la cryptographie, les ondes de matière, Stern et Gerlach, la mesure, la cryptographie et l'ordinateur, la polarisation.*

*Aslangul, Mécanique quantique tome 1 : Pour l'effet photoélectrique.*

*Cagnac, Physique atomique tome 1 : Pour l'effet photoélectrique aussi.*

*Taillet, Dictionnaire de physique : Pour l'intrication et ce qui s'en suit.*

**Introduction**

La mécanique quantique est fortement liée à l'expérimental. Historique (corps noir, Planck, Einstein). On va regarder quelques exemples importants.

**1 - Corpuscules de lumières****1.1 - Principe et mise en évidence****Expérience**

*Expérience de l'électroscope et plaque de Zinc avec et sans la plaque de verre.*

On a émission d'électron par le métal sous l'effet d'un rayonnement.

**Illustration**

*Présenter les courbes expérimentales et interpréter. Dégager la notion de photon et de paquet d'énergie. Puis schéma du dispositif d'étude.*

**1.2 - Insuffisance de la théorie classique**

La saturation s'explique bien (ZCE), mais pas l'effet de seuil et le caractère instantané.

**1.3 - L'approche d'Einstein**

Notion d'énergie de Fermi et de travail d'extraction. ODG (3,4eV pour le zinc).

**Calcul**

*Bilan d'énergie de la collision. Apparition de la fréquence seuil. ODG.*

Interprétations des divers points.

**2 - Ondes de matière****2.1 - Position du problème et mise en évidence expérimentale**

Ondes de Broglie et symétrie entre matière et rayonnement. Atomes froids de Davisson et Germer en 1927.

## Expérience

*Interférences simulées sur CD-ROM.*

### 2.2 - Mise en défaut de la théorie classique

Montrer qu'on a bien interférence, on ne peut pas interpréter en terme de projectiles.

### 2.3 - Approche quantique

Expliquer, commenter. Dire un mot sur le problème de la mesure ou garder pour la fin.

## Calcul

*Faire apparaître le terme d'interférence avec les amplitude de probabilité.*

*pas de référence*

## 3 - Notion de Spin

### 3.1 - Principe de l'expérience de Stern et Gerlack, approche classique

Le spin n'a pas d'analogie classique. Nombre caractéristique d'une particule, un peu comme la masse, la charge...

## Illustration

*Présentation de l'expérience. Prédiction classique et résultat expérimentaux.*

### 3.2 - Résultats expérimentaux et interprétation

Montrer les résultats expérimentaux. développer la notion de moment cinétique, d'observable et de valeur propre. expliquer que la mesure projette sur un état propre.

### 3.3 - La mesure en mécanique quantique

On met bout à bout trois appareils de Stern et Gerlach. On discute l'influence d'une mesure intermédiaire, et la notion d'ECOC.

## Expérience

*Illustration avec deux polariseurs croisés et une QI, où on vient intercaler un troisième polariseur.*

*pas de référence*

Il y a non commutativité des mesures, ce qui se retrouve dans la non commutativité du produit matriciel.

### 3.4 - Cryptographie et ordinateur quantique

Prendre le temps de bien expliquer. Cryptographie, principe et ODG détection espion. Ordinateur, q-bit et sécurité. Problème de la décohérence. Société D-wave et 512 q-bits.

## Conclusion

Prix Nobel Serge Haroche (décohérence..). Toujours pas mis en défaut, et déjà des applications. Crainte pour la sécurité actuelle car supercalculateurs mais espoir pour avoir des systèmes de sécurités plus sûrs.

## Avis

*Sorte de leçon bilan-résumé. Peut-être faudra-t-il sacrifier une partie. Eviter de parler d'intrication (nécessaire pour expliquer le clonage, mais conduits aux questions sur le paradoxe EPR et les inégalités de Bell). Pour ma part la dernière partie est à garder car sa fin est originale.*

## Remarques

*Les interférences ont été observées avec des atomes, des électrons dans le vide et des molécules, jusqu'aux fullerènes. L'effet photoélectrique est l'expérience historique qui a amené à la notion de photon, mais ne constitue pas une preuve de son existence (on peut quantifier la matière). Si on ajoute un détecteur sur une fente, on a un produit tensoriel. Serge Haroche prix nobel, dire un mot dessus. Il y a un historique de la MQ à la fin du Bas-devant. Haroche : "Ces expériences nous ont aussi permis de préparer des superpositions mésoscopiques d'états à quelques photons exhibant des effets d'interférence quantique spectaculaires. Nous avons reconstruit expérimentalement l'état quantique complet de ces superpositions, appelées "chats de Schrödinger" en référence à la fameuse expérience de pensée imaginée en 1935 par ce physicien. En dévoilant l'évolution dans le temps de ces états, nous avons pu réaliser de véritables films du processus de décohérence qui efface les interférences quantiques, transformant les superpositions mésoscopiques en simple mélanges statistiques classiques. Nous ferons le point sur ces expériences qui réalisent une exploration de la frontière entre les mondes classique et quantique et discuterons de leurs prolongements et généralisations à d'autres systèmes." Interféromètre de Ramsey.*

**Ce que dit le jury...**

Dans le traitement de l'effet tunnel, les candidats perdent souvent trop de temps dans les calculs. Le jury invite les candidats à réfléchir à une présentation à la fois complète et concise sans oublier les commentaires physiques relatifs à la dérivation de la probabilité de transmission. Certains candidats choisissent d'aborder le cas de la désintégration alpha mais ne détaillent malheureusement pas le lien entre la probabilité de traversée d'une barrière et la durée de demi-vie de l'élément considéré. La justification des conditions aux limites est essentielle ! Le microscope à effet tunnel peut être un bon exemple d'application s'il est analysé avec soin (hauteur de la barrière, origine de la résolution transverse,...). Le modèle de Bohr a maintenant une importance surtout historique. Il est évidemment possible de l'aborder mais il n'est pas un passage obligé pour aborder la quantification. L'interprétation des principaux résultats de la théorie quantique de l'atome d'hydrogène est primordiale. La quantification des niveaux d'énergie des atomes est évidemment un exemple important, mais pas unique. La résolution analytique du puits de potentiel doit être présentée de façon synthétique pour réserver une durée suffisante aux applications. Cette leçon n'est pas une leçon d'histoire des sciences. Présenter les résultats de la mécanique quantique sans se placer à un niveau de second cycle universitaire. La physique des hétérostructures à base de semi-conducteurs offre des exemples simples de puits de potentiel que les candidats pourraient facilement traiter.

**Bibliographie**

Basdevant, Mécanique quantique : Pour le confinement.  
 Basdevant, Problèmes quantique : Pour les ions colorés.  
 Cohen-Tannoudji, Mécanique quantique tome 1 : Pour l'atome d'hydrogène.  
 Le Bellac, Physique quantique : Pour les prémices de la quantification.  
 Pietryk, Panorama de la physique : Pour des exemples d'applications du puits carré.

**Introduction**

Il ne faut pas associer trop vite quantification et mécanique quantique. En effet cela n'apparaît pas dans les postulats. On va essayer d'en dégager l'origine via des analogies, le cas de l'électron et des applications.

**1 - Les prémices de la quantification****1.1 - Niveaux d'énergie en mécanique classique, modèle classique de l'atome**

Cas d'un potentiel et d'un système isolé. Puit et barrière. Etats liés et états de diffusion. On conclut que la quantification ne vient pas du caractère corpusculaire classique.

Modèle de Rutherford.

**Expérience**

Spectre de raie lampe à Mercure.

**1.2 - L'atome de Bohr**

Pour expliquer la quantification, on introduit le critère de bouclage en phase.

**Calcul**

On retrouve les raies et la constante de Rydberg.

**2 - Confinement et quantification, lien avec la physique ondulatoire****2.1 - Particule dans un puits de potentiel carré****Calcul**

Calcul habituel avec les trois zones. Solutions paires et impaires. Résolution graphique, on a une quantification.

Application aux jonctions à hétérostructures et aux boîtes quantiques.

## 2.2 - Puits de potentiel infini et corde vibrante

### Calcul

Cas du puit infini. On peut généraliser à 3D.

### Illustration

Tableau de comparaison avec corde de Melde.

*pas de référence*

	Puit infini	Corde vibrante
Equation	Schrödinger	D'Alembert
Grandeur	Fonction d'onde	Elongation
Conditions aux limites	$\psi(0) = \psi(L) = 0$	$\psi(0) = \psi(L) = 0$
Allure solution	$\psi(x) = A_n \sin(k_n x)$	$\psi(x) = A_n \sin(k_n x)$
Quantification	$k_n = n \frac{\pi}{L}$	$k_n = n \frac{\pi}{L}$
Energie	$E_n = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$	Non quantifiée, dépend des CI

La quantification des modes stationnaires n'est donc pas un phénomène quantique mais ondulatoire dû aux conditions aux limites, donc au confinement de l'onde. En revanche, celle de l'énergie l'est en raison de la normalisation.

## 3 - Applications

### 3.1 - L'atome d'hydrogène

#### Calcul

Potentiel, hypothèses, résolution de l'équation de Schrödinger, ECOC, harmoniques sphériques. Equation radiale, changement de variable, potentiel effectif. On est ramené à un cas 1D.

#### Illustration

Allure du potentiel effectif. Niveaux d'énergie.

#### Expérience

Spectre lampe à hydrogène, purement illustratif.

### 3.2 - Les ions colorés

Alcènes et systèmes pi conjugués. Modélisation par puit infini.

#### Calcul

Principe de Pauli et somme de l'énergie. ODG longueurs d'onde de transition. Conclure sur le nombre de conjugaison nécessaire pour avoir une raie visible (au moins 7).

## Conclusion

On a vu que la quantification de modes stationnaires n'est pas quantique mais purement du à la nature ondulatoire. Résumé. Ouverture sur l'effet tunnel, autre phénomène quantique.

#### Avis

Comme souvent, ne pas sabrer la fin sinon on perd l'intérêt.

#### Remarques

La quantification sort naturellement avec les relations de Heisenberg : on fixe  $dx$ , ça nous donne l'ordre de grandeur pour  $dp$  et donc pour l'énergie quantifiée. Le traitement que l'on fait n'a rien de quantique en soi, puisque la quantification est quelque chose qui sort dès qu'on a des phénomènes ondulatoires, et donc les analogies avec la physique classique sont les bienvenues. Bohr a ajouté la quantification à la main. Un puit 3D n'a pas forcément d'état lié. Théorie quantique relativiste = équation de Dirac. Le problème c'est la relativité générale (gravitation), pas restreinte. Einstein découvre le photon en faisant le lien avec Planck.



**Ce que dit le jury...**

*Pas trop de temps dans les calculs. Présentation à la fois complète et concise sans oublier les commentaires physiques relatifs à la dérivation de la probabilité de transmission. Cas de la désintégration alpha : Détailler le lien entre la probabilité de traversée d'une barrière et la durée de demi-vie de l'élément considéré. La justification des conditions aux limites est essentielle ! Le microscope à effet tunnel peut être un bon exemple d'application s'il est analysé avec soin (hauteur de la barrière, origine de la résolution transverse,...). On pourra utiliser des considérations de symétrie. Le jury attend la présentation d'applications significatives et bien comprises. Il existe d'autres applications que la microscopie et l'émission alpha : les diodes tunnel, les super-réseaux, l'effet Josephson...*

**Bibliographie**

*Cohen-Tannoudji, Mécanique quantique - Tome 1 : Pour l'effet tunnel.  
 Basdevant, Mécanique quantique : Pour l'effet tunnel, microscopie, ammoniac.  
 Lévy-Leblond, Quantique Rudiments : Pour l'effet tunnel, Gamov.  
 Loroy, Le microscope à effet tunnel - BUP 699 : Pour microscopie.  
 Matta, L'effet tunnel : quelques applications - BUP 734 : Pour Gamov.*

**Introduction**

On a déjà étudié la quantification de l'énergie qui résulte du confinement d'un objet quantique dans un puits de potentiel, nous allons maintenant nous intéresser au cas d'une barrière de potentiel, qui va nous permettre de mettre en évidence l'effet tunnel.

**1 - L'effet tunnel****1.1 - Barrière de potentiel****Calcul**

*Particule d'énergie  $E$ , marche de potentiel  $V_0 > E$ , équation de Schrödinger et fonction d'onde dans les 3 régions. Définir alors  $k$  et  $\rho$  vecteurs d'onde.  
 Relation de passage,  $\psi$  et  $\psi_0$  continus (car courant de proba continu).*

**1.2 - Probabilité de transmission**

Il suffit de résoudre le système des relations de passage, on a accès au rapport des constantes (passer le calcul).

**Calcul**

*Hypothèse de la barrière épaisse  $\rho a \gg 1$  pour arriver à la proba qui est le module carré du rapport des amplitudes.*

**Illustration**

*Proba oscille puis évanescence.*

Regarder limites et ODG (classique/quantique).

Cas quantique fortement dépendant en  $a$  épaisseur de la barrière.

**2 - Microscope à effet tunnel****Illustration**

*Schéma de principe et schéma des potentiels : ddp -> courant tunnel,  $V = qU$  puis donner des ODG.  
 Résolution verticale et latérale + Photo CD.*

**3 - Théorie de Gamov de la radioactivité alpha****3.1 - Hypothèses du modèle**

Rappel de l'équation de la désintégration.

Observation expérimentale : loi de Geiger-Nuttal.

Forme potentiel vu par les particules  $\alpha$ , ODG.



## 3.2 - Estimation du temps de vie

### Calcul

Vitesse par incertitude de Heisenberg, proba  $T$  donc  $\tau = \frac{2R_0}{v_\alpha}$  uis ODG pour  $U_{238}$ .  
Evaluer  $T$  : Somme infinitésimale de barrières épaisses (donner résultat).  
Après calcul pas simple (à ne pas faire), on retrouve Geiger-Nuttal.

## 4 - Molécule d'ammomoniac

### 4.1 - Modélisation de la molécule

$NH_3$  pyramidale mais pas de moment dipolaire, donc 2 conformations.

Tracé du potentiel double puits vu par l'azote et modélisation par deux puits carrés.

Effet tunnel entre les deux conformations.

### 4.2 - Fonctions d'onde

#### Calcul

Chercher solutions stationnaires, résoudre Schrödinger avec CL. Calcul à ne pas exposer.

#### Illustration

Montrer sur transparent les solutions des trois zones + schéma + énergie dans les cas symétrique et antisymétrique.

### 4.3 - Battements quantiques

Phénomène d'inversion, états gauche et droit par CL des solutions symétrique et antisymétrique (il faut normaliser).

#### Calcul

Regarder évolution si gauche à  $t=0$ , déduire fréquence d'inversion (il y a un facteur de phase) + ODG.

Conclure sur l'absence de moment dipolaire.

## Conclusion

C'est une conséquence directe des aspects ondulatoires.

Contre intuitif classiquement, mais signature du comportement ondulatoire de la matière, analogue de la réflexion totale frustrée.

Microscope à effet tunnel : deux types de fonctionnement, à courant fixé ou à altitude fixée..

#### Avis

Reprise en grande partie d'une leçon de démonstration ayant obtenu un 18. Penser à utiliser la banque d'images.

#### Remarques

Recopier les calculs non faits explicitement au brouillon au cas où.

Fosbury analogue classique possible (centre de gravité sous la barre).

L'onde évanescente couple les deux milieux.

L'intérêt de la polarisation de l'échantillon existe.

En pratique, balayage à  $I$  constant et résolution latérale dépend de la forme de la pointe.

Résolution de  $10^{-10}$  en latéral et de  $10^{-11}$  en vertical. La continuité de la fonction d'onde et de sa dérivée découle de la finitude du potentiel et du fait qu'on considère un état stationnaire où la densité et le courant de probabilité ont une valeur définie en tout point (analogie avec l'électricité).

Attention,  $\psi_S$  et  $\psi_A$  sont vecteurs propres du Hamiltonien donc on fait l'étude temporelle à partir d'elles, pas à partir de  $\psi_D$  et  $\psi_G$ .

La barrière épaisse revient à négliger la réflexion sur la seconde discontinuité. La tension  $U$  du microscope permet de désymétriser la situation.

**Ce que dit le jury...**

*Le modèle de la goutte ne peut être simplement énoncé. Le candidat qui ferait le choix d'en parler doit commenter la physique inhérente à chaque terme du modèle. Cette leçon ne peut se réduire à un catalogue d'informations diverses et variées, mais les candidats doivent dégager du temps pour les applications. L'énergie est un point central et l'énergie nucléaire est difficile à ne pas aborder. Exposés souvent attractifs mais un peu trop qualitatifs et descriptifs. Les candidats doivent évidemment avoir des connaissances sur les techniques expérimentales qui permettent d'obtenir des informations sur la taille et la structure interne du noyau.*

**Bibliographie**

*Valentin, Physique subatomique, noyaux et particules : Pour le modèle de Rutherford, la structure du noyau, la goutte liquide, le modèle en couche, la fission.*

*Ngo et Le Sech, Physique nucléaire des quarks aux applications : Pour les interactions, la fission aussi.*

*Williams, Nuclear and particle physics : Pour des compléments, la fission aussi.*

*Halliday, Ondes optique et physique moderne tome 3 : Pour.*

*Meyerhof, Éléments de physique nucléaire : Pour le modèle de la goutte liquide aussi.*

*Pérez, Relativité et invariance : Pour plein d'ODG tout au long de la leçon et tous les aspects historiques, les effets biologiques, la goutte liquide aussi, la datation.*

*Ray, La physique par les objets quotidiens : Pour la centrale nucléaire et les problématiques associées.*

*Taillet, Dictionnaire de physique : Pour ITER.*

**Introduction**

Au début, le nucléaire était à la mode, aujourd'hui c'est une polémique. Mais qu'est-ce que le noyau ?

**1 - Structure et propriétés du noyau****1.1 - Le modèle de Rutherford**

Expérience historique de Rutherford. Découverte du noyau. ODG. Donner la section efficace différentielle.

**Illustration**

*Montrer les courbe expérimentale. Bon accord loin, mauvais accord à haute énergie. Il y a autre chose dans le noyau.*

**1.2 - Structure et constituants du noyau**

Notation du noyau. Unités énergétique adéquates. Taille. ODG pour proton/neutron et électron. Définition de isotones, isobares, isotopes.

**1.3 - Nature des interactions**

Equivalence entre masse et énergie. Immense énergie dans le noyau. ODG Ecinétique nucléon par Heisenberg. ODG des forces gravitationnelle et coulombienne => insuffisant. C'est l'interaction forte qui assure la cohésion. ODG.

**2 - Energie et stabilité du noyau****2.1 - Abondance et stabilité relative des noyaux****Illustration**

*Vallée de la stabilité. Expliquer par l'interaction coulombienne la déviation. Comptage des noyaux pair/pair, pair/impair et impair/impair. Stabilité particulière des nombres magique. Courbe d'Aston et parler rapidement des désintégrations radioactive et de comment on les a séparées, leur raison. Comment expliquer ces résultats expérimentaux ?*

## 2.3 - Le modèle de la goutte liquide

### Calcul

*Exposer en détail le modèle de la goutte liquide. Détailler chaque terme (explication, parallèle si possible, ODG) : volume, surface, coulomb, asymétrie, appariement.*

### Illustration

*Courbe théorique obtenu colle avec l'expérience. On explique les résultats expérimentaux sauf l'asymétrie.*

## 2.4 - Modèle en couche

Et les nombres magiques ? On introduit brièvement le modèle en couche, très brièvement, qui explique l'asymétrie. Utiliser l'analogie avec les électrons.

# 3 - Applications

## 3.1 - Datation

### Illustration

*Rappeler les désintégration avec neutrino et gamma. Mentionner différence selon parité.*

### Calcul

*Exemple de datation au carbone 14.*

## 3.2 - Fission et énergie nucléaire

### Calcul

*Faire un ODG de la désintégration d'un noyau d'uranium 235 avec le modèle de la goutte liquide. Comparer à d'autres énergies.*

### Illustration

*Expliquer en gardant le modèle de la goutte liquide qui se déforme. Dire que le calcul donne une réaction spontanée pour  $A > 385$  et  $Z > 138$ . Schéma et explication du fonctionnement d'une centrale. Dire aussi un mot sur les effets biologiques.*

# Conclusion

Problématiques énergétiques et environnementales. Ouvrir aussi sur les applications en médecine par exemple : traceurs, angiographie, TEP (sucre radioactif). Fusion avec ITER.

### Avis

*Beaucoup, vraiment beaucoup de choses à dire. Etre pédagogique. Faire une utilisation abusive de la banque d'images. Partir de l'expérimental et expliquer par un modèle. Je ne parle que peu de la désintégration, c'est un choix.*

### Remarques

*Cette leçon doit être basée sur une utilisation massive des ordres de grandeur d'énergie et de longueur. La distribution de charges électriques peut être sondée par des électrons, tandis que la distribution de matière (et donc de charges nucléaires) peut être vue par des neutrons, on peut ainsi voir le potentiel de Wood-Saxon et la force forte. Fission (200MeV) à comparer à réaction chimique (1eV). Un gramme de matière fissile donne  $10^7$  J contre  $10^4$  J pour la combustion d'un gramme de charbon. Une centrale nucléaire et au charbon sont de grandes bouilloires limitées par le rendement de Carnot. Il y a  $10^{44}$  nucléon/m<sup>2</sup>. En gros, 8MeV/nucléon. Energie d'appariement = spin/spin. Nombre quantique important = isospin. Bosons des interactions (EM=photon, gravité=Higgs, forte=gluons(8), faible= $W^+ / W^- / Z$ ). Portée proportionnelle à  $1/M_{boson}$ . Seul le fer n'est pas métastable, mais les autres ont des temps de vie très longs. Asymétrie car fermions, spin 1/2. Une centrale nucléaire n'explose PAS.*

# Oscillateurs à deux degrés de liberté en mécanique classique : modes propres. Systèmes à deux niveaux d'énergie en physique quantique.

47

## Analogies et différences.

Niveau : L3, Prérequis : Mécanique classique, Mécanique quantique, Formalisme matriciel.

### Ce que dit le jury...

Le phénomène de *battement* (comme son analogue quantique) est au coeur de la leçon. La notion de *mode propre* doit être parfaitement maîtrisée et définie. Trop souvent les leçons privilégient la partie classique par rapport à la partie quantique. *Différences et analogies* sont rarement mises en lumière. Dans la partie relevant de la mécanique classique, il n'est pas utile d'envisager le cas le plus général, l'important étant de dégager les effets physiques avec un *minimum de calculs*. Les *aspects énergétiques* méritent d'être considérés. *L'inversion de l'ammoniac* est un exemple délicat, car le terme de couplage  $y$  est difficile à interpréter physiquement. On peut trouver d'autres systèmes à deux niveaux, plus simples à présenter. Le couplage par *effet tunnel* est délicat à traiter.

### Bibliographie

*Pérez, Mécanique : Pour les pendules.*

*Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Mécanique : Pour les pendules.*

*Basdevant, Mécanique quantique : Pour l'ammoniac aussi, les polariseurs.*

*Cohen-Tannoudji, Mécanique quantique : Pour l'ammoniac.*

## Introduction

On va chercher des états pertinents pour la physique du système. Annonce des systèmes étudiés. On négligera les frottement et les autres états pouvant exister.

## 1 - Exemple classique : Pendules couplés par élasticité

### Illustration

Schéma du dispositif, justification du couplage et du nombre de degrés de liberté. On fera l'approximation des petits angles. Donner des ODG.

### Calcul

Appliquer le PFD à un pendule et forme de la solution. Puis résoudre par les matrices le problème des pendules couplés en posant la pulsation utile pour alléger les notations. Ne pas oublier le couple de la pesanteur. Attention mettre un facteur racine de 2 pour un changement de base orthonormé (important pour l'énergie). Dédire les modes propres et les étudier. Conditions initiales pour déterminer le mouvement. Energie des oscillateur et totale. Montrer oscillation de l'énergie entre oscillateur et conservation de l'énergie dans les modes pour CI quelconque. Fréquence des battements. ODG.

### Illustration

Graphique des fréquences : libre  $\Rightarrow$  un pendule couplé  $\Rightarrow$  deux pendules couplés. Mode symétrique plus stable.

### Expérience

Montrer les modes, faire une TF pour montrer l'écart de fréquence. Faire également une étude énergétique en direct pour montrer l'échange d'énergie et l'énergie de couplage plus grande pour le mode antisymétrique.

## 2 - Exemple quantique : Molécule d'ammoniac

### Illustration

Schéma des états gauche et droite. Justifier les deux niveaux d'énergies, et le couplage par effet tunnel. Donner des ODG. Modélisation du potentiel.

### Calcul

Cas de la barrière infini  $\Rightarrow$  quantification de l'énergie dans un puit. Couplage modélisé par barrière pas infinie. Résolution rapide en notant  $c_1(t)$  et  $c_2(t)$ . Solution symétrique et antisymétrique puis gauche et droite. Diagonalisation. Fréquence des oscillations de probabilité. ODG.

## Illustration

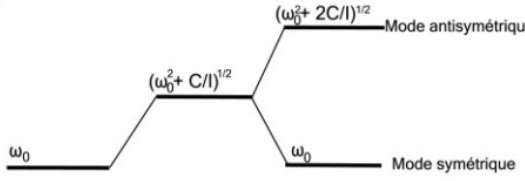
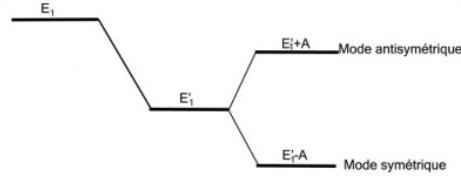
Graphique des solution symétrique et antisymétrique puis gauche et droite. Energie E => Energie E1 plus faible par délocalisation => Couplage.

## 3 - Analogies et différences

### Expérience

Bonus sur la mesure : pièce de monnaies et polariseurs.

### Illustration

	Pendules couplés	Ammoniac
Paramètres	$\theta_1$ et $\theta_2$ réels	$c_1$ et $c_2$ complexes
Couplage	Torsion C	Effet tunnel A
Equadiff	$\frac{d^2}{dt^2} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\omega_0' & C/I \\ C/I & -\omega_0' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix}$	$i\hbar \begin{pmatrix} \dot{c}_1 \\ \dot{c}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1' & -A \\ -A & E_1' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}$
Modes	$\begin{cases} u_s = \frac{1}{\sqrt{2}}(\theta_1 + \theta_2) \\ u_a = \frac{1}{\sqrt{2}}(\theta_1 - \theta_2) \end{cases}$	$\begin{cases} u_s = \frac{1}{\sqrt{2}}(c_1 + c_2) \\ u_a = \frac{1}{\sqrt{2}}(c_1 - c_2) \end{cases}$
Dégénérescence		
Battements	$\begin{cases} \theta_1(t) = \frac{2\theta_0}{\sqrt{2}} \cos(\Delta\Omega.t) \cos(\Omega.t) \\ \theta_2(t) = -\frac{2\theta_0}{\sqrt{2}} \sin(\Delta\Omega.t) \sin(\Omega.t) \\ \Omega = 2\omega_0 + \frac{C}{I\omega_0} \\ \Delta\Omega = \frac{C}{I\omega_0} \\ E_1 = E_m \cos^2(\Delta\Omega.t) \\ E_2 = E_m \sin^2(\Delta\Omega.t) \end{cases}$	$\begin{cases} c_1(t) = e^{-i\frac{E_1'}{\hbar}t} \cos\left(\frac{A}{\hbar}t\right) \\ c_2(t) = i e^{-i\frac{E_1'}{\hbar}t} \sin\left(\frac{A}{\hbar}t\right) \\ \Omega = \frac{E_1'}{\hbar} \\ \Delta\Omega = \frac{A}{\hbar} \\ P_1(t) = \cos^2\left(\frac{A}{\hbar}t\right) \\ P_2(t) = \sin^2\left(\frac{A}{\hbar}t\right) \end{cases}$
Stabilité	Mode symétrique	Mode symétrique
Grandeur échangée	Energie	Probabilité
Type d'échange	Temporel	Spatial
Face à mesure	Robuste	Perturbé

## Conclusion

Vers N oscillateurs.

### Avis

Cette leçon ne peut clairement pas se faire juste en suivant une bibliographie. Adapté de celle de Jérémy. L'ajout de la mesure est un petit pari. Toujours utiliser le formalisme matriciel

### Remarques

Mode symétrique le plus stable car gradient nul. Mode propre = état stationnaire. Pas d'analogie sur la position d'équilibre. Il s'agit bien sûr d'une analogie formelle, il faut le dire. Attention la molécule d'ammoniac est fait dans plusieurs chapitre, recoller les bouts avec l'index.



**Ce que dit le jury...**

*Il faut clairement dégager l'origine de la stabilité de la liaison chimique. Cette leçon ne doit pas se réduire à une succession de calculs, on attend des ordres de grandeur et une discussion sur la physique du phénomène. Dans le cas de la présentation des interactions de Van der Waals, la nature de ces interactions doit être précisée ainsi que l'origine de la dépendance en  $r$ . Dégager du temps pour rendre les analyses moins superficielles et aborder d'avantage d'applications concrètes.*

**Bibliographie**

*Atkins, Chimie physique : Pour, édifices polyélectroniques, édifices polyatomiques.*  
*Cohen-Tannoudji, Mécanique Quantique tome 2 : Pour le formalisme, LCAO, stabilité et viriel.*  
*Cohen-Tannoudji, Mécanique Quantique tome 1 : Pour Born-Oppenheimer.*  
*Gréacias, Chimie PC/PC\* : Pour LCAO, stabilité, édifices polyélectroniques, édifices polyatomiques, la spectroscopie d'absorption.*  
*Aslangul, Mécanique quantique tome 2 : Pour LCAO, stabilité.*  
*Basdevant, Mécanique quantique : Pour le viriel.*  
*Basdevant, Problèmes quantiques : Pour les ions colorés.*  
*Durupthy, Chimie PC/PC\* : Pour LCAO aussi, Hückel.*

**Introduction**

On a vu les atomes, mais la réalité nous offre une infinité de molécules.

**1 - De l'atome d'hydrogène à l'ion moléculaire****1.1 - Formalisme et approximations****Illustration**

*Modélisation ion  $H_2^+$ . Discuter stabilité.*

**Calcul**

*Hamiltonien complet puis simplifié avec Born-Oppenheimer. Solution = orbitales moléculaires monoélectroniques. ODG pour justifier l'approximation.*

**1.2 - Résolution dans le cadre de la méthode LCAO****Illustration**

*Allure potentiel.*

**Calcul**

*Résolution complète via perturbation, déterminant séculaire. Énergie. Intégrale coulombienne, intégrale de résonance. Etat propre.*

**1.3 - Etats liants et antiliants, stabilité****Illustration**

*Graphique expliquant la stabilité. ODG et comparaison à l'expérience.*

**Calcul**

*Calcul du Viriel, justification de l'origine de la liaison par abaissement plus important de l'énergie potentielle que de l'énergie cinétique.*

**2 - Généralisation****2.1 - Edifices polyélectroniques, approximation orbitale**

On ajoute un électron. Approximation orbitale.

### Illustration

Diagramme d'OA du dihydrogène et Helium. Expliquer pourquoi on a une molécule et pas l'autre. Dire qu'on peut généraliser la méthode sous certaine condition de symétrie et d'énergie entre les orbitales. Diagramme du dioxygène et du diazote. Expliquer paramagnétisme et diamagnétisme.

### Expérience

Expérience paramagnétisme du dioxygène.

## 2.2 - Edifices polyatomiques, théorie de Hückel simple

### Calcul

Hypothèses de la théorie de Hückel simple. Cas du benzène. Résoudre

### Illustration

Diagramme d'énergie. Commenter stabilité et délocalisation.

## 3 - Applications

### 3.1 - Les ions colorés

### Calcul

Analogie avec un puit infini. ODG pour couleur.

### 3.2 - Spectroscopie d'absorption

Il existe aussi des niveaux d'énergies autres : électroniques (on a vu), vibrationnels, rotationnels. ODG.

### Illustration

Exemple de spectre.

## Conclusion

Résumé, on a fait des approximations. Pour le reste calcul numérique, logiciel Foldit.

### Avis

Je ne suis pas franchement fan de cette leçon. Ne pas oublier la discussion du viriel pour rendre cette leçon plus physique que chimique.

### Remarques

Il est important de montrer la nécessité de faire des approximations pour traiter le problème, mais il faut qu'elles soient bien justifiées et formulées. L'approximation de Born-Oppenheimer revient à négliger l'énergie cinétique des noyaux devant celle des électrons. Couplage tunnel en exponentiel et électrostatique en  $1/R \Rightarrow$  minimum pour l'état liant. Pour avoir délocalisation, il faut des couplages non-diagonaux dans la représentation matricielle du hamiltonien dans la base considérée. Les recouvrements jouent un rôle secondaire. Couleur d'une molécule est une formulation maladroite. Il est possible d'observer le dimère  $\text{He}_2$ , alors que cet assemblage ne permet pas l'existence d'une liaison chimique. C'est une conséquence des interactions de Van der Waals. Ajouter des ODG. Molécule normalement neutre. Hamiltonien général :  $H = -\frac{\hbar^2}{2m_p} \Delta_{p1} - \frac{\hbar^2}{2m_p} \Delta_{p2} - \frac{\hbar^2}{2m_e} \Delta_e - \frac{e^2}{r_1} - \frac{e^2}{r_2} + \frac{e^2}{R}$ .  $e = \frac{|q|}{\sqrt{4\pi\epsilon_0}}$ . Transitions vibrationnelles, rotationnelles, électroniques. On peut essayer de caser le Viriel pour faire un bilan énergétique de la liaison chimique (Basdevant, exercice corrigé). L'origine physique de la liaison est un abaissement d'énergie potentielle des électrons plus important que l'augmentation d'énergie cinétique de ceux-ci.



### Ce que dit le jury...

La relation entre les paramètres macroscopiques du milieu et la modélisation microscopique doit être explicitée. L'oscillateur unique, et même les deux oscillateurs couplés peuvent être considérés comme des pré-requis. Il est intéressant de montrer le lien entre les paramètres microscopiques du modèle et les grandeurs macroscopiques caractéristiques du milieu. Il est indispensable de justifier la modélisation harmonique du potentiel d'interaction entre atomes et de préciser les ordres de grandeur des quantités introduites. Il faut dégager nettement les enseignements et les limites du modèle. Enfin on peut aussi tenter une approche énergétique. L'interprétation de la première zone de Brillouin doit être reliée au caractère périodique du système. La notion de modes propres doit être bien comprise pour traiter cette leçon.

### Bibliographie

Pérez, *Mécanique* : Pour des compléments.

Ashcroft, *Physique des solides* : Pour la modélisation du solide cristallin, conséquences thermodynamiques.

Taillet, *Dictionnaire de physique* : Pour des compléments.

Faroux Renault, *Mécanique des fluides et ondes mécaniques* : Pour la mise en équation, la résolution, la modélisation du solide cristallin.

Garing, *Ondes mécaniques et diffusion* : Pour la résolution, les conséquences énergétiques, l'approximation continue.

Portelli, *La physique par la pratique* : Pour le module d'Young.

## Introduction

Beaucoup d'onde dans la vie courante (vagues, tremblement de terre, tsunamis...).

### Expérience

Modèle des pendules couplés.

## 1 - Chaîne unidimensionnelle infinie d'oscillateurs harmoniques

### 1.1 - Mise en équation

#### Illustration

Modélisation par chaîne masse-ressort. A l'équilibre et hors équilibre.

#### Calcul

PDF et équation différentielle.

### 1.2 - Résolution

#### Calcul

Chaîne infinie, onde progressive. Invariance par translation (pas d'amortissement). Notation complexe car équation linéaire. Dédurre relation de dispersion. Vitesses dans les cas limites et ODG.

#### Illustration

Relation de dispersion. Fréquence de coupure. Vitesse de phase (maxima de l'onde), de groupe (paquet d'onde). Première zone de Brillouin. Une longueur d'onde courte sera perçue comme une longueur d'onde plus grande (interpolation par les masses de la fonction).

#### Expérience

Montrer la fréquence de coupure.

## 2 - Approche discrète au solide cristallin

### 2.1 - Modélisation du solide cristallin réel

Hypothèses : Cristal parfait donc pas de défauts et périodicité infinie (grande devant le paramètre de maille), définir position moyenne de repos et petites perturbations, interactions de plus proches voisins, étude 1D.

#### Illustration

*Potentiel de Lennard-Jones.*

#### Calcul

*Développement limité au second ordre pour approximation harmonique. Constante de raideur et ODG.*

Le modèle peut donc rendre compte de la propagation d'onde dans un solide cristallin. Remarque : correction d'ordre 3 et 4 expliquent la dilatation.

### 2.2 - Conséquences énergétiques et thermodynamique

#### Calcul

*Calcul de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle. On retrouve bien sûr l'oscillateur harmonique isolé.*

### 2.3 - Conséquences thermodynamiques

#### Calcul

*1918 : Dulong et Petit. Retrouver résultat expérimental par l'application de l'équipartition de l'énergie.*

Remarque : En fait, vrai seulement à haute température.

## 3 - Du discret au continu

### 3.1 - Démarche et mise en équation

On peut même déduire des lois macroscopiques. Choix ultrason 200kHz.

#### Calcul

*Approximation continue, équation de D'Alembert et vitesse (4000m/s). ODG.*

On a plus de dispersion car on s'est placé dans la zone linéaire.

### 3.2 - Conséquences mécaniques

Peut-on faire mieux ? Estimer la rigidité.

#### Illustration

*Courbe expérimentale Contrainte=f(Allongement).*

#### Calcul

*Loi de Hook, module d'Young. Identification et ODG.*

#### Expérience

*Bonus : mesure du module d'Young du Dural.*

## Conclusion

Très bons résultats malgré grosses approximations. Ouvrir vers ondes de cisaillement, dilatation.

#### Avis

*Repris sur Julien, très bonne présentation. Questions sur : branches optiques et acoustiques, modèles de Debye et d'Einstein, anharmonicité. Le module d'Young est déduit par acoustique ou vibration d'une lame. Harmonique aux petits angles uniquement.*

#### Remarques

*On cherche à comprendre des phénomènes macroscopiques à l'aide d'une modélisation microscopique. Repos = position moyenne à l'équilibre thermique. Pour deux types d'atomes voir Garing (2 branches). Si défaut : gap qu'on peuple. Si fréquence interdite, il y a réflexion. En bord de zone de Brillouin, il y a en fait découplage des oscillateurs (le dire). Capacité des électrons linéaire, capacité du réseau cubique avec la température (à faible température). Le module d'Young du Dural est dans la banque d'images.*

**Ce que dit le jury...**

*Elle ne doit pas se limiter à un long exposé de méthodes calorimétriques mais laisser une place importante aux modèles microscopiques. Les capacités thermiques sont définies à partir des dérivées partielles de l'entropie ou de l'énergie interne.*

**Bibliographie**

*Diu, Physique statistique : Pour le cours presque complet.*

*Diu, Thermodynamique : Pour le cours.*

*Faroux Renault, Thermodynamique : Pour des compléments.*

*Ashcroft, Physique des solides : Pour des compléments.*

*Kreith, The CRC Handbook of Thermal Engineering : Pour des valeurs numériques si besoin.*

**Introduction**

On connaît entièrement un système avec son équation d'état et les variations d'une capacité thermique avec la température.

**1 - Première approche : définitions et modèle simplifié****1.1 - Définitions****Calcul**

*Rappel des définitions des coefficients calorimétriques et chaleurs latentes d'après la physique statistique. Cas d'une transformation réversible. Relation de Mayer. Fonction de partition, énergie et capacité calorifique. Ensemble canonique.*

Interprétation statistique du travail et de la chaleur.

**1.2 - Théorème d'équipartition de l'énergie****Calcul**

*Énoncé et preuve du théorème. ODG.*

**1.3 - Modèle simplifié : système à deux niveaux d'énergie****Calcul**

*Fonction de partition, capacité calorifique. Cas extrêmes, interprétation, ODG.*

**Illustration**

*Courbes expérimentales et du modèle pour l'énergie et la capacité calorifique. Degré de liberté gelé/saturé.*

**2 - Capacité thermique des gaz****2.1 - Gaz parfait monoatomique****Calcul**

*Hypothèses du gaz parfait. Description et hamiltonien classique, Equipartition, énergie, capacité calorifique. On retrouve la thermodynamique.*

**2.2 - Gaz parfait polyatomique****Calcul**

*On rajoute les autres degrés de liberté que la translation. ODG des températures caractéristiques. TEE, énergie, capacité.*

**Illustration**

*Schémas pour justifier les 2 degrés de rotations et les 2 degrés de vibration. Graphique  $C_v=f(T)$ .*

## 2.3 - Comparaison avec l'expérience

### Calcul

Tableau de résultat expérimentaux mesurant le rapport  $C_p/C_v$  pour des gaz monoatomiques et polyatomiques. Ca correspond. Dire un mot sur la méthode utilisée expérimentalement.

### Expérience

Normalement on ne fait pas d'expérience, mais on pourrait faire le Tube de Kundt et mesurer  $\gamma$  ici. *pas de référence* Pour ma part je le tenterai bien si on a un peu de temps (la mesure est simple et répétitive).

## 3 - Capacité thermique des solides

### 3.1 - Constat expérimental de Dulong et Petit (1819)

#### Illustration

Capacité thermique molaire des solides à haute température est une constante. Explication par le théorème d'équipartition : 3 directions,  $N$  atomes,  $E_c$  et  $E_p$ . ODG. Loi en  $T^3$  à basse température, origine quantique.

### 3.2 - Le modèle d'Einstein (1907)

#### Calcul

Approche de type champ moyen. Hamiltonien, énergie, fonction de partition monoatomique, puis du réseau. Énergie du réseau, puis capacité. Température d'Einstein. Cas limites et ODG. On a le refroidissement mais pas la bonne dépendance.

### 3.3 - Le modèle de Debye (1912)

On considère un couplage, et on interprète les vibrations comme des ondes. CL périodiques.

#### Calcul

Chaîne 1D d'oscillateurs couplés. PFD, équadiff. Résolution par les complexes et onde plane car linéaire et base des solutions. Relation de dispersion et pulsation propre. CL périodiques  $\Rightarrow$  vecteur d'onde. 1ère zone de Brillouin. Notion de décomposition en modes propres.

#### Illustration

Relation de dispersion.

#### Calcul

Généralisation 3D. Calcul très long... ne pas le faire, donner l'idée et le résultat, prévoir un transparent si questions. Introduction de la température de Debye. ODG. On a la bonne dépendance.

## Conclusion

### Avis

Un exposé de physique statistique à l'ancienne (surtout pas de thermo). Tous les calculs ne sont surtout pas à tous détailler. Repris sur la très bonne présentation de Sandrine.

### Remarques

Le modèle de Debye n'est valable qu'à des températures faibles, mais pas trop, sinon, on ne peut plus faire l'approximation continue dans le calcul. Ne pas hésiter à ajouter des analyses dimensionnelles. Notion de degré de liberté gelé (ou pas) et donc de température caractéristique. Le modèle de Debye prend en compte le fait que la collection d'oscillateurs harmoniques introduits par Einstein pour modéliser un solide ne sont pas tous de même fréquence et a la bonne dépendance pour la décroissance de la température alors qu'Einstein explique simplement la décroissance de la capacité calorifique. Le modèle de Sommerfeld traite de la contribution des porteurs de charges à la capacité thermique des corps conducteurs. Pour un système à deux niveaux, la capacité calorifique présente un maximum pour une certaine température. Notion de température caractéristique. Expérimentalement on évalue  $C_p/C_v$  en mesurant la vitesse d'une onde sonore dans le gaz. TEE valable si  $H$  diagonalisable. Potentiel = Lennard-Jones. A 0K, on a le mouvement minimal, énergie de point zéro. Parler d'indétermination pour Heisenberg. Travail : modifie niveaux. Chaleur : modifie populations.

**Ce que dit le jury...**

*Le moment magnétique, son image semi-classique et son ordre de grandeur doivent être maîtrisés. De même, le lien avec l'ordre de grandeur de l'aimantation d'un aimant doit être connu. L'origine microscopique de l'interaction d'échange doit être discutée. L'influence de la température sur les propriétés magnétiques est au coeur de la leçon. Il s'agit ici de présenter une interprétation microscopique du paramagnétisme et du ferromagnétisme. Il convient de conserver du temps pour discuter du modèle du champ moyen lors de l'étude du ferromagnétisme. On doit faire ressortir l'aspect phénoménologique du champ moyen. Cette leçon est une occasion de faire apparaître les propriétés essentielles d'une transition de phase. L'expérience du *clou chauffé* au-dessus de la température de Curie n'est pas la seule illustration possible du ferromagnétisme. Il serait par exemple souhaitable que les candidats manipulent des *ferrofluides* et puissent citer des applications dans le domaine de l'enregistrement magnétique.*

**Bibliographie**

*Trémolet, Magnétisme tome 1 : Pour des compléments et ODG, le champ moyen et ferromagnétisme.*  
*Diu, Physique statistique : Pour la loi de Curie.*  
*Ray, La physique par les objets quotidiens : Pour le disque dur (magnétorésistance géante).*  
*Pietryk, Panorama de la physique : Pour le disque dur (magnétorésistance géante) aussi.*  
*Pérez, Electromagnétisme : Pour des compléments, les expériences, le moment magnétique atomique, les origines, le refroidissement.*

**Introduction**

Tous les matériaux n'ont pas les mêmes propriétés magnétiques. Certains présentent une aimantation permanente (matériaux ferromagnétiques), d'autre s'aimantent dans un champ magnétique (matériaux paramagnétiques), tandis que d'autres encore n'interagissent pas ou peu avec un champ magnétique (matériaux diamagnétiques). Rappel de la définition de la susceptibilité.

**Expérience**

*Fe, Bi et Al avec aimant/électroaimant (Flexcam ?). Interpréter.*

**1 - Origine du magnétisme d'un corps****1.1 - Le moment magnétique atomique****Calcul**

*Justifier l'origine atomique du magnétisme par modèle classique. Montrer que c'est dû aux électrons et pas au noyau par ODG.*

**1.2 - Origine du diamagnétisme**

Effet d'induction microscopique. Signe en vertu de la loi de Lenz. ODG susceptibilité.

**1.3 - Origine du paramagnétisme**

Orientation des moments microscopique sous l'effet d'un champ. Notion d'aimantation. ODG susceptibilité. ODG température magnétique.

**1.4 - Origine du ferromagnétisme**

Le ferromagnétisme existe à température ambiante. On montre que l'interaction entre deux moments ne suffit pas à l'expliquer. Explication quantique via l'interaction d'échange. ODG (8meV) sans calcul.

**Expérience**

*Observer les domaines de Weiss et les parois de bloch. Utiliser une bobine avec noyau de fer doux et champ sinusoidal.*

## 2 - Paramagnétisme de Curie

### 2.1 - Loi de Curie

La loi de Curie vient préciser la dépendance de susceptibilité magnétique vis-à-vis de la température et du champ magnétique.

#### Calcul

*Poser le Hamiltonien en le justifiant. Calcul via la fonction de partition. Cas limites. Dédurre susceptibilité et interpréter par analogie avec l'équation d'état d'un gaz parfait : les particules n'interagissent pas (à savoir).*

#### Illustration

*Graphique  $M=f(T)$ .*

### 2.2 - Application : refroidissement par désaimantation adiabatique

#### Illustration

*Discuter rapidement la méthode. Graphique. ODG.*

## 3 - Ferromagnétisme

### 3.1 - Calcul de l'aimantation spontanée dans l'approximation du champ moyen

#### Calcul

*On reprend le modèle précédent avec couplage entre plus proches voisins cette fois. Discuter hypothèses et modèles du champ moyen. Effectuer le calcul (ou pas). Donner le résultat. Notion de température critique.*

#### Illustration

*Résolution graphique  $M=f(T)$ . Trois cas à distinguer. ODG. Discussion graphique de la loi du Curie Weiss (influence d'un champ, les courbes se penchent) et comparaison avec les résultats expérimentaux en très bon accord.*

### 3.2 - Transition ferromagnétique/paramagnétique

On interprète ça en terme de transition de phase. Notion de paramètre d'ordre.

#### Expérience

*Expérience de la transition ferro/para. Mesure de la température de transition.*

## Conclusion

Champ moyen donne de bons résultats. On a vu aussi transitions de phases. Ouverture sur la magnéto-résistance géante et ses applications.

#### Avis

*Une leçon très riche.*

#### Remarques

*On peut observer les domaines de Weiss pendant la leçon. Parler de magnéto-résistance géante (Albert Fert) serait cool. Il est utile de rappeler la quantification du moment cinétique en unités de  $\hbar/(2\pi)$ . Cela permet d'introduire le magnéton de Bohr, qui permet de comprendre qu'on ne peut pas saturer des moments magnétiques indépendants avec des champs usuels à température ambiante, et que l'interaction magnétique entre ces moments est incapable de justifier le champ moléculaire de Weiss. Le milieu est composé de petits aimants (moments magnétiques) qui vont s'orienter dans le sens de l'excitation d'entrée  $H$ . A un niveau macroscopique, cela se traduit par une aimantation  $M$ . Linéaire à faible  $H$ . Sinon système bouclé. Plus la dimension du système est élevée, plus on a de voisins et plus l'approximation de champ moyen est adapté. Garder les mêmes conventions de signe.*



**Ce que dit le jury...**

L'intérêt du *champ H* doit être clairement dégagé. L'obtention expérimentale du *cycle d'hystérésis* doit être analysée. Il existe bien d'autres *applications* que le *transformateur idéal*. Il faut consacrer du temps aux applications (stockage des données, transformateurs, électroaimants,...) en justifiant l'*adéquation du type de matériau* ferromagnétique à la fonction visée. *Algébrisation*. Les diverses sources de *pertes* doivent être mentionnées. Il est souhaitable de distinguer plus nettement les domaines d'application des *ferro doux* et des *ferro durs*. Le point représentatif du matériau d'un aimant permanent se situe dans le deuxième (ou le quatrième) quadrant de son cycle d'hystérésis de jeux de variables  $(B, H)$  : pour obtenir un champ magnétique donné dans un entrefer de volume donné, le volume du matériau magnétique utilisé est minimal lorsque la quantité  $BH$  est maximale, l'aimantation n'ayant pas, alors, sa valeur rémanente.

**Bibliographie**

*Ray, La physique par les objets quotidiens* : Pour le disque dur, les applications.  
*Pietryk, Panorama de la physique* : Pour le disque dur aussi, les applications.  
*Pérez, Electromagnétisme* : Pour des compléments, le paléomagnétisme.  
*Fiat, Toute la physique de SPE* : Pour le cycle d'hystérésis, les rappels, le transformateur.  
*Taillet, Dictionnaire de physique* : Pour la magnétorésistance géante.  
*Trémolet, Magnétisme tome 2* : Pour le tableau d'analogies.  
*Brenders, Electrotechnique PSI* : Pour les pertes et pas mal de choses.

**Introduction**

On a vu les origines microscopiques, maintenant le macroscopique.

**1 - Caractérisation du ferromagnétisme****1.1 - Équations de Maxwell dans un milieu magnétique**

Faire quelques rappels : vecteur aimantation, densité volumique de courants d'aimantation. Équations de Maxwell et définition de  $H$ . Nécessité d'une relation constitutive pour fermer le système d'équations.

**1.2 - Relation constitutive**

Dia, para et ferromagnétisme. ODG de susceptibilité, exemples de matériaux. Transition ferro-para.

**Expérience**

*Transition ferro/para éventuellement.*

**1.3 - Réductance magnétique**

Réductance magnétique. Un ferro canalise les lignes de champ. Théorème d'Ampère.

**Illustration**

*Tableau d'analogies entre circuits électrique et magnétique.*

**2 - Aimantation d'un corps ferromagnétique****2.1 - Dispositif expérimental****Calcul**

*Présenter le dispositif et justifier qu'il donne accès à  $H$  et  $B$ .*

**2.2 - Cycle d'hystérésis****Expérience**

*Choisir un rhéostat de 30 Ohm environ, et un tore ferrimagnétique. Montrer première aimantation, cycle d'hystérésis, désaimantation.*



## Calcul

*Discuter champ rémanent, excitation coercitive. Matériaux durs et doux.*

## 2.3 - Interprétation microscopique

### Expérience

*Domaines de Weiss.*

### Illustration

*Interprétation des courbes d'aimantations avec les domaines de Weiss. Basculement du spin dans la paroi de Bloch. Zoom virtuel.*

## 2.4 - Étude énergétique

### Calcul

*Montrer que l'aire du cycle est la puissance dissipée pendant une période. Pertes fer et pertes cuivres. Solution : choix matériau et feuilletage.*

## 3 - Applications

### 3.1 - Transformateur parfait

#### Illustration

*Modèle du transfo parfait.*

#### Calcul

*Rapport de transformation des courants et des tensions. Conservation de la puissance. Discuter le choix du matériau.*

#### Expérience

*Transformateur pédagogique et mesure du rapport des tensions.*

### 3.2 - Disque dur

#### Illustration

*Codage des bits. Lecture des données. Écriture des données. Magnétorésistance géante. Etre qualitatif. Tenter un ODG à la main. Choix des matériaux. Prix Nobel.*

### 3.3 - Paléomagnétisme

#### Illustration

*Détermination du champ terrestre, âge des cailloux. Dorsale et inversion du champ magnétique terrestre. ODG champ et période. Un mot sur la MHD et le régime chaotique des inversion. Type matériau (oxydes en fait).*

## Conclusion

Ouvrir sur les moteurs, ou sur la RMN. Magnétisme = applications macroscopiques et microscopiques.

### Avis

*Il faut se détacher de la bibliographie et créer son propre fil conducteur. La bibliographie est un peu redondante.*

### Remarques

*Albert Fert et magnétorésistance géante. Feuilletage pour éviter les courants de Foucault. Ferrites comme filtre passe-bas sur les câbles informatiques. L'énergie d'interaction responsable de l'alignement des moments magnétiques au niveau microscopique n'est pas l'énergie d'interaction de deux dipôles magnétiques mais bien l'énergie de répulsion électrostatique qui diminue lorsque les spins s'alignent en diminuant le recouvrement des parties spatiales de la fonction d'onde antisymétrique par principe de Pauli (Fonction=Espace(antisym)\*Spin(sym)). La susceptibilité diminue avec la température, c'est la réponse de la matière au champ. B et H reliés par équation d'état. Transfo et tête d'écriture : ferro doux. Stockage et paléomagnétisme : ferro dur. HDD remplacé par SSD (flash, transistors bloqués) car lents. Forme de tore pour symétrie. M sature mais pas B. Pertes via bilan de puissance et Maxwell en prérequis. Ferro : up up up. Antiferro : up down up down. Ferri : UP down UP down.*

**Ce que dit le jury...**

Dans cette leçon, il est important de bien distinguer les grandeurs microscopiques et les grandeurs moyennes. La conduction électrique dans les semi-conducteurs est en général présentée de manière très approximative. Si l'on utilise le modèle de Drude, on s'efforcera d'en préciser les limites. Une approche probabiliste peut être envisagée. La théorie quantique de la conduction peut être évoquée. Adopter une approche hydrodynamique pour décrire la vitesse des porteurs conduit certains candidats à des erreurs. Il paraît indispensable de mentionner le phénomène de supraconductivité. Il est inadmissible de laisser croire à des élèves que le modèle de Drude, si respectable et si utile soit-il, s'applique réellement aux métaux et de ne pas évoquer les limites du modèle imposées par la mécanique quantique et le principe de Pauli. La confusion entre force de Lorentz et force de Laplace n'est pas davantage admissible. Trop peu de candidats réalisent que la relation  $j = \rho v$  est une définition de la vitesse d'ensemble  $v$ , plutôt que du courant  $j$ . Par ailleurs, trop de candidats se figurent que le modèle de Drude est une description suffisante de la réalité microscopique.

**Bibliographie**

Ashcroft, *Physique de l'état solide* : Pour plein de tables d'ODG, les modèles, les hypothèses, des compléments sur tout, en particulier la supraconductivité.  
 Durupthy, *Chimie des matériaux inorganiques* : Pour les bandes d'énergies et le semi-conducteurs.  
 Guinier, *Propriétés électroniques des solides - BUP 550* : Pour les limites du modèle de Drude.  
 Renvoizé, *Physique PC/PC\** : Pour le modèle de Drude.  
 Taillet, *Dictionnaire de physique* : Pour la supraconductivité, toujours très utile.  
 Ray, *La physique par les objets quotidiens* : Pour l'IRM et peut-être d'autres applications à mentionner.  
 Pietryk, *Panorama de la physique* : Pour l'IRM et peut-être d'autre applications à mentionner.  
 Fiat, *Toute la physique de SPE* : Pour un point de vue prépa et les calculs qui vont avec si besoin, les passage de la loi d'Ohm micro à macro, la loi d'Ohm, le calcul de Drude.

**Introduction**

On connaît la loi d'Ohm, on veut la comprendre microscopiquement.

**1 - Modèle de Drude de la conduction dans les métaux****1.1 - Hypothèses****Illustration**

Les énoncer clairement sur transparent.

**1.2 - Calcul de la conductivité****Calcul**

Démonstration de la conductivité (choc ou régime forcé). ODG.

**1.3 - Loi d'Ohm locale et intégrale****Calcul**

Définir  $j = \sigma E$  comme la loi d'Ohm. Faire l'intégration pour arriver à  $U = RI$ . Généraliser éventuellement aux électrolytes. Bien dire que  $j$  est un mouvement d'ensemble noyé dans une agitation.

## 2 - Effet Hall

### 2.1 - Dispositif

Présenter le dispositif.

#### Expérience

*Plaque de Hall ENSL semiconducteur Ge dans un électroaimant. Montrer que c'est linéaire après calibration (exceptionnellement avec une sonde à effet Hall commerciale). Mentionner la nécessité de retourner la plaque pour avoir une mesure précise.* *pas de référence*

### 2.2 - Tension de Hall

#### Calcul

*Expliquer physiquement le régime transitoire et calculer la tension de Hall. Donner des ODG.*

Application en tant que sonde.

## 3 - Prise en compte d'effets quantiques

### 3.1 - Limites du modèle de Drude

#### Calcul

*Suivre les discussions expérimentales du BUP pour arriver à l'utilisation de la statistique de Fermi-Dirac et de la dualité onde-corpuscule. Arriver au modèle de Sommerfeld.*

### 3.2 - Bandes d'énergie dans les solides

#### Illustration

*Expliquer qualitativement la formation de bandes. Classifier les solides à partir de la structure en bandes. Différence semi-conducteur intrinsèque et extrinsèque.*

### 3.3 - Supraconductivité

#### Expérience

*Bonus : expérience de la transition supra + lévitation.* *pas de référence*

Application à l'IRM, aux SQUID, jonctions Josephson.

## Conclusion

Supraconductivité du domaine de la recherche pour certains matériaux. Ouvrir sur l'énergie électrique et sa production.

#### Avis

*On part de la base et on va très loin.*

#### Remarques

*Le tenseur de conductivité est diagonalisable si  $B=0$ , et dépend de la fréquence. Loi de Kohlrash  $\lambda \propto -\sqrt{c}$ . Potentiel périodique. Bien préciser quelles sont les grandeurs locales et quelles sont les grandeurs moyennées. Les semi-conducteurs sont plus intéressants que les métaux pour l'effet Hall car il y a une densité de porteur de charge inférieure.*

**Ce que dit le jury...**

L'analyse du seul *circuit RLC* est très insuffisante pour cette leçon. Le phénomène de résonance ne se limite pas aux oscillateurs à un degré de liberté. Le jury regrette que les *cavités résonnantes* soient rarement présentées. L'*aspect énergétique* de la résonance est ignoré la plupart du temps. Trop souvent, la notion même de résonance n'est liée qu'à l'existence d'un maximum d'amplitude. Les applications dans le *domaine microscopique* sont rarement abordées. Une illustration souvent choisie est l'étude d'un dispositif mécanique comportant une masse suspendue à un ressort vertical excité à une extrémité. Cette expérience est bien choisie mais la mise en équation pose régulièrement des difficultés. Le candidat ne doit pas se limiter à l'électricité et à la mécanique. Il doit prendre soin de dégager les *propriétés communes* aux différents exemples présentés. Insister sur la généralité du phénomène de résonance. Les relations entre le comportement des *systèmes forcés* et les propriétés des mêmes *systèmes libres*, doivent être soulignées, de même que les aspects énergétiques des phénomènes de résonance.

**Bibliographie**

Taillet, *Dictionnaire de physique* : Pour la définition, critère de résonance.  
 Garing, *Les 1001 questions de la physique en prépa PC/PCSI* : Pour le circuit RLC.  
 Pérez, *Mécanique* : Pour les pendules couplés.  
 Garing, *Les 1001 questions de la physique en prépa PC/PC\** : Pour la cavité Fabry-Pérot.  
 Duffait, *Expériences d'optique* : Pour la cavité Melles-Griot (expérience).  
 Houard, *Optique* : Pour le Fabry-Pérot aussi.

**Introduction**

On se limite au linéaire. Définir la résonance. Donner plein d'exemples.

**Illustration**

Film pont de Tacoma. Militaires qui marchent (mieux que le vent !) Mauvais.

**Expérience**

Résonance d'un quartz et mesure du facteur de qualité. Bon.

*pas de référence*

**Expérience**

Expérience de résonance avec aiguille et bobines et/ou gyroscope avec masse sur tabouret d'inertie.  $Q = \frac{\omega}{\Delta\omega}$ .

Ces deux/trois choses ont en commun la résonance : Réponse de grande amplitude à une excitation faible, donc résonance par rapport à une grandeur (tension/amplitude, intensité/vitesse ou encore puissance).

**1 - Résonance à 1 degré de liberté : Circuit RLC série, Electronique****1.1 - Mise en équations, impédance****Illustration**

Schéma du circuit et équation différentiel en RSF formalisme complexe car équations linéaires.

**1.2 - Réponse en courant****Calcul**

Calcul. S'appuyer sur l'étude de l'impédance et bien discuter amplitude et phase, diagrammes de Bode, sens de Q, ODG. Faire le lien entre le temps du transitoire et la résonance. Condition de résonance.

**Expérience**

Tracé expérimental par réponse indicielle à discuter rapidement.

**Illustration**

Courbes théoriques.

## 1.3 Aspect énergétique

### Calcul

*S'intéresser à la puissance transmise. Interpréter la résonance = transmission maximale d'énergie.*

## 2 - Résonance à 2 degrés de liberté : Pendules couplés, Mécanique

### 2.1 Description du système

#### Illustration

*Pendules couplés.*

### 2.2 Résonance et modes propres

#### Calcul

*Résolution et émergence des modes propres.*

Expliquer : N oscillateurs => N modes propres. Chacun peut engendrer une résonance. Interprétation en terme de phase, analogie de la balançoire.

#### Expérience

*Faire un TF sur l'expérience pour voir les deux pics. Discuter les différences entre les modes symétriques et anti-symétriques.*

### 2.3 - Généralisation à N oscillateurs

#### Expérience

*Corde de Melde, N = une infinité. On a bien une infinité de fréquence de résonance (observer des fréquences multiples avec le stroboscope. [On peut aussi faire les 4 pendules couplés mais bon...])*

## 3 - Cavité résonante : Cavité Fabry-Pérot, Optique

#### Illustration

*Présentation du principe du LASER. Présentation de la cavité résonante.*

#### Calcul

*Traitement par calcul. Discuter l'ISL etc.*

#### Expérience

*Cavité Melles-Griot et laser. On observe les modes du laser.*

## Conclusion

#### Illustration

*Petit tableau d'analogie avec ce qu'on a présenté des choses en plus si on est inspiré : grandeur excitatrice, grandeur de réponse, facteur de qualité, fréquence centrale, application.*

Effet intéressant mais parfois dangereux. Généralité du phénomène. Après un séisme, la terre résonne à 7,8 Hz. Intérêt pour la mesure.

#### Avis

*Leçon transversale et très bonne je pense. Aller vite en préparation sur les calculs pour se faire plaisir en montrant des expériences.*

#### Remarques

*Facteur de qualité mécanique supérieur à facteur de qualité optique. Horloge atomique  $Q=10^{17}$ . Pour le Fabry-Pérot,  $Q = \frac{F\omega}{ISL}$ .  
HS : La localisation pour Michelson est bien traité dans le 1001 questions PC.*

**Ce que dit le jury...**

Une *simulation numérique* bien présentée peut enrichir cette leçon. L'analyse de l'*anharmonicité* des oscillations du pendule pesant ne constitue pas le coeur de la leçon. *Différents effets* des non linéarités doivent être présentés. Le *régime forcé* des oscillateurs non linéaires est également envisageable. La leçon ne doit pas se limiter à une résolution d'équations différentielles non linéaires. Une discussion des effets en liaison avec la *forme de l'énergie potentielle* peut être intéressante. La présentation d'un oscillateur de *van der Pol* précablé sur une plaquette reste trop souvent théorique. En quoi ce système est-il représentatif de problèmes usuels en électronique? La simple étude de la non-linéarité du *pendule simple* et du *vase de Tantale* ne peut suffire. Il faut dégager clairement, sur différents exemples, l'impact des non-linéarités sur (selon les cas) la période, l'amplitude des oscillations, voire la forme du signal et sa valeur moyenne. Evoquer les phénomènes, beaucoup plus riches, d'instabilités ou de transition vers le chaos.

**Bibliographie**

*Taillet, Dictionnaire de physique : Pour discuter le chaos.*  
*Vigoureux, Introduction à l'étude des systèmes non linéaires (Le chaos et l'approche du chaos) - BUP 722 et 724 : Pour le chaos.*  
*Pérez, Mécanique : Pour le calcul du pendule aux grands angles.*  
*BFR, Mécanique 1 : Pour l'étude du portrait de phase du pendule.*  
*Krob, Electronique expérimentale : Pour le Van der Pol.*  
*Clerc, Système dynamique et plan de phase étude d'une PLL - BUP 868 : Pour montrer le plan de phase d'une PLL.*  
*Strogatz, Nonlinear dynamics and chaos : Pour un cours complet.*

**Introduction**

On connaît l'oscillateur harmonique, mais il existe plus compliqué.

**1 - Du linéaire au non-linéaire : Pendule pesant aux grands angles****1.1 - Perte de l'isochronisme****Expérience**

Faire une mesure de la période à faible et grande amplitude, constater une différence. Donner la formule de Bordas.

On a donc perte de l'isochronisme, écart au modèle linéaire.

**1.2 - Un outil d'étude : le portrait de phase**

Expliquer le principe : on néglige les frottements.

**Expérience**

Tracer le portrait de phase. Voir les différents cas. Aborder la notion de point fixe et de séparatrice.

**Calcul**

Déterminer les points fixes étudier leur stabilité. Equadiff 2nd ordre => 2 equadiff 1er ordre => matrice => valeurs propres => type de point fixe => vecteurs propres => directions et sens. Démarche générale.

**Illustration**

Montrer que la donnée d'une CI nous donne une évolution qualitative. On peut montrer celui d'une PLL aussi.

**1.3 - Enrichissement spectral et perte du principe de superposition****Calcul**

Calcul par développement perturbatif pour le justifier (on a l'harmonique 3) et déduire la formule de Bordas. On a création de nouvelles fréquences. Remarquer que c'est l'harmonique 3. Conclure qu'on perd le principe de superposition.

Source NL = Couple de la pesanteur.



## 1.4 - Double puits, bifurcation et paramètre de contrôle

Expliquer qu'on pourrait mettre des aimants.

### Illustration

*Tracer le potentiel et en déduire le diagramme de bifurcation. Notion de paramètre de contrôle, analogue aux transitions de phase (cas de l'eau).*

On a mis tous les outils en place.

## 2 - Oscillateur de Van der Pol

### 2.1 - Présentation

Commenter brièvement l'équation. Dissipation non linéaire négative.

### 2.2 - Instabilité et cycle limite

#### Expérience

*Essayer de montrer sa dynamique. On retrouve l'idée de seuil. Les effets NL causent une saturation, on a un cycle limite.*

#### Illustration

*Dessiner portrait de phase pour cycle limite.*

### 2.3 - Déformation des oscillations

Constater la déformation des oscillations à haute non-linéarité. En temporel et en XY (OH-> VdP).

## 3 - Transition vers le chaos

### 3.1 - Expérience

C'est déterministe, pourtant on arrive pas à prévoir. De plus, on entend parfois des régimes particuliers.

#### Expérience

*Balle de ping pong qui rebondit sur un vibreur. On repère la phase du choc en fonction de l'amplitude excitatrice. <sup>pas de référence</sup> Montrer les premiers modes. Source de NL = perte de mémoire du système.*

### 3.2 - Simulation numérique

Discuter rapidement la généralité de l'équation logistique et son sens physique.

#### Expérience

*Comme c'est long, tracer le diagramme par une simulation numérique. Equation logistique :  $x_n = a * x_{n-1}(1 - x_{n-1})$  pour  $a$  variant de 1 à 4. Faire le parallèle car il n'est pas évident. Mesurer la constante de Feigenbaum. <sup>pas de référence</sup>*

Discuter comme dans l'article du BUP. Faire des analogies avec le monde réel. Parler d'imprédictibilité exponentielle.

Définir le chaos proprement et discuter autour de ça (météo, attracteurs...).

## Conclusion

Considérations sur la dimension du système. Ouvrir sur les effets non-linéaires optiques, sur les solitons et les communications par fibre.

#### Expérience

*Montrer un soliton sur la chaîne de pendules.*

#### Avis

*Beaucoup de choses à faire sans biblio mais pas dur. La partie 3 est un petit pari personnel.*

#### Remarques

*On peut parler de transition vers le chaos. Exemple => idée forte => message clair. Identifier les sources de non-linéarités et dire comment on peut étudier le système. Analogie avec les transitions de phase. A 1D, pas d'oscillation. A 2D, cycle limite (les trajectoires ne se coupent pas). A 3D, chaos. Le forçage rajoute le temps comme dimension. Exposant de Lyapunov. Connaître le diagramme trace-déterminant. Le temps ajoute une dimension. Systèmes déterministes et autonomes (non forcés).*



## Ce que dit le jury...

Les *invariances* peuvent être traitées dans cette leçon. Cette leçon doit mettre en évidence les conséquences des *symétries* en physique. Elle ne doit pas se borner à des calculs de champs électromagnétiques. Le jury jugera en partie la leçon sur la pertinence et la variété des exemples proposés par le candidat. Application dépendant du *temps* bienvenue. Ne pas se restreindre aux plans de symétrie et d'antisymétrie. La transformation d'antisymétrie devra être clairement définie. Les candidats doivent invoquer le principe de symétrie (*principe de Curie*) et l'appliquer à des cas divers, après avoir justifié les propriétés de symétrie. Les conséquences du renversement du sens du temps peuvent également être évoquées et utilisées. Les exposés entendus manquent en général de profondeur. On peut penser aux rotations discrètes, importantes en cristallographie et en chimie, ou à d'autres transformations comme les dilatations. Cette leçon peut être aussi l'occasion d'une réflexion sur la symétrie des termes multipolaires.

## Bibliographie

*Sivardière, Symétries et propriétés physiques* : Pour toute la leçon.  
*Taillet, Dictionnaire de physique* : Pour des compléments.  
*Guyon, Hydrodynamique physique* : Pour adimensionner NS.  
*Fiat, Toute la physique de SUP* : Pour la solution des exercices si besoin.  
*Fiat, Toute la physique de SPE* : Pour la solution des exercices si besoin.  
*Renvoizé, Physique PC/PC\** : Idem.  
*Sanz, Physique PC/PC\** : Idem.

## Introduction

Petit historique et exemples variés.

### 1 - Symétries d'échelle et analyse dimensionnelle

#### 1.1 - Notion de dimension

##### Illustration

Donner les 7 unités fondamentales. Quelques exemple d'unités dérivées. Bien dire que c'est un choix arbitraire. Ne pas confondre dimension et unité.

#### 1.2 - Analyse dimensionnelle

##### Calcul

*Théorème de Vashy-Buckingham. Caractère prédictif limité. Exemple du pendule simple. Invariance par changement d'unité. Exemple de la période du pendule simple. Une grandeur temporelle (la période) doit être invariante sous un changement d'unité d'espace.*

#### 1.3 - Adimensionnalisation

##### Calcul

*Adimensionnaliser Navier-Stokes, faire sortir  $Re$ .*

Deux écoulement sont identiques s'ils ont le même  $Re$ . Application aux maquettes d'écoulement.

### 2 - Principe de Curie

#### 2.1 - Enoncé

Énoncer le principe. Mentionner qu'il n'y a pas de réciproque. Insister sur l'unicité de la solution, et dans le cas contraire le caractère vrai en moyenne (cas du flambage).

##### Expérience

*Diffraction d'une lumière laser par une fente verticale et un trou circulaire. Mentionner la découverte de l'ADN.*

## 2.2 - Simplification des problèmes

Définir vecteur polaire/axial.

### Calcul

*Exemple : Théorème de Gauss (vecteur polaire). Exemple : Théorème d'Ampère (vecteur axial).*

Mentionner exemple de la diffusion thermique dans un mur en régime stationnaire. Discuter les symétries du problème, à opposer aux symétries du système. Ainsi la conductivité thermique est invariante par translation dans le mur, mais pas la température, en raison des CL imposées.

## 3 - Lois de conservation

### 3.1 - Théorème de Noether

Etre modeste et parler d'une première approche. S'intéresser au Lagrangien.

### Calcul

*Retrouver la conservation de quelques grandeurs sur des exemples simples.  
Translation -> impulsion, rotation -> moment cinétique, temps -> énergie.*

Généraliser l'idée.

### 3.2 - Application au problème de Kepler

### Calcul

*Traiter le problème à partir du potentiel. Déduire loi des aires et mouvement plan.*

### 3.3 - Interactions et symétries

Parler des symétries C,P,T et de la découverte du neutrino, ainsi que de ses propriétés.

## 4 - Brisure de symétrie

### Calcul

*Exercice masse en rotation sur un cerceau. Paramètre de contrôle.*

### Illustration

*Allure du potentiel et diagramme de bifurcation. Généralité de la démarche.*

## Conclusion

Récapituler les différents domaines qu'on a vu (optique, mécanique, thermodynamique, électromagnétisme). Simplification et prédiction limitée.

### Avis

*Leçon à la fois transversale et introductive. Pas simple de faire un bon exposé cohérent.*

### Remarques

*Symétrie des états, invariance des propriétés. Symétrie = invariance par transformation. La physique est une science parce que l'espace est homogène. Principe de symétrie vrai en moyenne.*

# Solutions électrolytiques ; mise en solution d'espèces ioniques ou moléculaires. (L)

01

Prérequis : Mole, Electronégativité, Lewis, VSEPR, Conductimétrie, Coulomb, A-B, Tests, VdW & H.

## Ce que dit le jury...

*Conductimétrie quantitative attendue. Interactions inter et intra moléculaires à discuter, par exemple avec les effets thermiques de la dissolution. Caractères dispersant et dissociant des solvants à discuter aussi. Distinguer les étapes d'ionisation, solvation et dispersion et justifier ce découpage. Bien connaître le solvant eau. Illustrer au moins un autre solvant.*

## Bibliographie

*Durupthy, Physique-Chimie 1ère S : Pour les étapes de dissolution ioniques, dissolution moléculaire, les définitions de concentration.*

*Durupthy, Physique-Chimie Tle S : Pour la conductimétrie et le sérum physiologique.*

*Hunt, La chimie de A à Z : Pour les test d'ion et un bon recueil d'infos.*

*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour les ions conducteurs, NaCl dans l'eau, jet d'eau NH<sub>3</sub>, les effets thermiques, acide sulfurique, eau de chaux, la conductimétrie.*

*Arnaud, Chimie physique : Pour la description de NaCl, la dissolution ionique aussi.*

*Durupthy, H-prépa PC-PC\* : Pour les polymères.*

## Introduction

### Expérience

*On ajoute du sel dans l'eau. La lampe s'allume. Que se passe-t-il.*

## 1 - Mise en solution d'un solide ionique

### 1.1 - Le solide ionique cristallin

#### Illustration

*Description sur l'exemple de NaCl.*

### 1.2 - Mise en solution

#### Expérience

*Identification des ions Cl par AgCl. Equation de dissolution. Les ions qui conduisent le courant, NaCl n'est pas une molécule. Autres = KNO<sub>3</sub>, KMnO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.*

### 1.3 - Saturation

#### Expérience

*Ajouter juste un peu trop de NaCl. Définition et calcul de la solubilité massique, comparer à la valeur tabulée. Ensuite chauffer pour évaporer l'eau et retrouver le sel. Peser pour vérifier et refaire le calcul comme ça.*

## 2 - Mise en solution d'espèces moléculaires

### 2.1 - Mise en solution d'un gaz : exemple de l'ammoniac

Rappels sur liaison covalente et H, Lewis, Cram, VdW. La molécule est une entité propre.

#### Expérience

*Expérience du jet d'eau avec NH<sub>3</sub>. Equation de dissolution. Utiliser ballon, cristallisoir et seringue. Papier pH pour vérifier le remplissage. Tests caractéristiques à la phénolphtaléine et au sulfate de cuivre.*

Autres exemples : HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, I<sub>2</sub>, saccharose.

### 2.2 - Mise en solution d'un liquide : exemple de l'acide sulfurique

#### Expérience

*Mise en solution et tests caractéristiques au papier pH et au chlorure de baryum.*

## 3 - Principe et étapes de la dissolution

### 3.1 - L'eau, une molécule polaire

#### Expérience

*Electronégativité. eau = moléculaire polaire. Déviation d'un filet d'eau colorée.*

### 3.2 - Dissolution d'un solide ionique

#### Illustration

*Détailler les 3 étapes : ionisation, solvation, dispersion. Importance du  $\epsilon = 80$  qui abaisse la force de cohésion du cristal. Dire que la couleur provient de la solvation.*

### 3.3 - Dissolution de composés moléculaires

#### Expérience

*NaCl/diiodure ne se dissout pas dans le cyclohexane/eau. Détailler les affinités : like likes like. pas de référence*

### 3.4 - Effets thermiques

La dissociation demande de l'énergie pour rompre les liaisons existantes : endothermique (+ effet entropique).

La solvation stabilise les ions grâce à VdW et H : exothermique.

La dispersion éloigne les anions des cations, demande de l'énergie : endothermique.

Donc une dissolution peut être globalement athermique (NaCl) ; exothermique ( $H_2SO_4$ ) ; ou endothermique.

#### Expérience

*Dissolution de NaOH et  $H_2SO_4$ . Diagrammes d'énergie. Différence = effet entropique.*

## 4 - Concentration d'une solution électrolytique

### 4.1 - Concentrations

Définir concentration molaire en soluté apporté et effective des ions en solution. Exemple.

### 4.2 - Conductimétrie

Définir conductance, conductivité constante de cellule et conductivités molaires ioniques. Préciser l'approximation en milieu infiniment diluée et donner l'évolution en  $-\sqrt{c}$ . Dire le type et la valeur du courant.

#### Expérience

*Refaire une solution saturée de sel et mesurer sa conductivité. En déduire la concentration critique et donc le produit de solubilité. Comparer à la valeur tabulée ( $pK_s=39$ ). pas de référence*

#### Expérience

*Sérum physiologique courbe d'étalonnage et détermination d'une concentration inconnue.*

### 4.3 - Application à l'eau de chaux

#### Expérience

*Montrer et expliquer le test caractéristique du dioxyde de carbone, parce que la solution est déjà à saturation.*

## Conclusion

Conclure sur l'intérêt de la limite de solubilité pour tester ou quantifier.

#### Avis

*Première leçon de chimie. Simple mais riche. Bien commenter les expériences.*

#### Remarques

*Ne pas confondre dilution, dissolution, fusion. Parler de VdW, liaison H, électronégativité, effet polaire du solvant, et conservation de la matière. Séparation endoénergétique et forte solvation exoénergétique des ions, par interactions (ion-dipôle, aquacomplexes, liaisons H, VdW). Dissolution de HCl, réaction AB en plus.  $NH_3$  se dissout bien car liaisons H. Faire le jet d'eau avec  $NH_3$ , pas HCl. Dire qu'en fait  $\lambda = \Lambda^0 - K\sqrt{c}$ . NaCl pas soluble dans cyclohexane et  $I_2$  pas soluble dans l'eau. Mélange = phénomène entropique = perte d'information.*

**Ce que dit le jury...**

Les candidats se limitent souvent aux aliphatiques, voire aux premiers alcanes et à quelques alcènes. Ce ne sont pas les seuls hydrocarbures. Les interactions inter et intramoléculaires sont mal connues et rarement évoquées spontanément pour expliquer certaines observations expérimentales (effets thermiques, valeurs de constantes physiques). Des exemples plus variés en lien avec l'industrie et la vie courante sont attendus. Les relations structures-propriétés physiques sont généralement traitées trop superficiellement. La présentation des chaînes carbonées est superflue.

**Bibliographie**

Durupthy, Physique-Chimie 1ère S : Pour la combustion, Teb des alcanes, la distillation fractionnée.  
 Durupthy, Physique-Chimie Tle S : Pour le traitement du pétrole, les carburants.  
 JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour la synthèse du polystyrène.  
 JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour la carvone.  
 Hunt, La chimie de A à Z : Pour pétrole, polymères.  
 Galiléo, Physique-chimie 1ère S : Pour le traitement du pétrole.  
 Rivas-Enterrios, Pétrole et essences commerciales - BUP 940 : Pour le pétrole et les carburants.

**Introduction**

Introduction sur le lien modèle microscopique/ propriétés macroscopiques. Origine pétrole et vivant.

**1 - Structure microscopique****1.1 - Représentations****Illustration**

Formules brutes, développée, semi-développée, topologique Exemples à présenter : méthane, éthène, cyclohexane, benzène.

**Expérience**

Construire les exemples sur des modèles moléculaires où la liaison double bloque.

**1.3 - Classification**

Définir linéaire/ramifié, saturé/insaturé, isomères. Montrer sur les modèles moléculaires que l'on peut tourner librement autour d'une simple CC, mais pas autour de C=C. D'où une différence de stéréoisomérisation. On peut même avoir de la chiralité.

**2 - Propriétés macroscopiques****2.1 - Réactivité****Expérience**

Test caractéristique des alcènes à l'eau de brome + cyclohexane/cyclohexène. Écrire le bilan réactionnel. Forte densité électronique et insaturation sur la C=C donne bonne réactivité, permet une addition. Les hydrocarbures saturés eux sont stables. pas de référence

**2.2 - Densité, solubilité****Expérience**

Mesure de la masse volumique de l'heptane et du pentane avec une fiole jaugée de 50mL. pas de référence

**Expérience**

Expliquer la marée noire et le like likes like. Deux tubes à essai avec solution aqueuse de sulfate de cuivre. Ajouter pentane dans tube 1, heptane dans tube 2. Mélanger les tubes et conclure.

## 2.3. Température de changement d'état

### Expérience

*Distillation d'un mélange heptane/pentane, contrôler température. Vérifier l'indice au réfractomètre.*

Influence de la longueur de la chaîne et des ramifications sur la température d'ébullition car plus ou moins d'interactions entre chaînes.

## 2.4 - Production d'énergie par combustion

Définir une réaction de combustion d'un alcène. Énergies de liaison. ODG.

## 2.5 - Chiralité

### Expérience

*Faire sentir les carvones.*

# 3 - Applications industrielles

## 3.1 - Carburants

### Illustration

*Traitement du pétrole*

Essence : moteur, on n'utilise pas l'octane qui pourtant libère le plus d'énergie à cause de l'auto-allumage. Carburants utilisés : alcanes ramifiés et dérivés du benzène. On les fabrique par reformage catalytique (isomérisation, cyclisation, déshydrocyclisation, craquage catalytique).

## 3.3 - Polymères

Définition, polyaddition, exemples, utilisations.

### Expérience

*Synthèse du polystyrène avec AIBN.*

Dire qu'on aurait pu regarder sur la polyacrylamide l'influence de la ramification. Donner d'autres exemples de la vie courante.

# Conclusion

Ouverture sur le reste de la chimie organique. On peut rajouter des groupes fonctionnels. Grande diversité d'applications dans la vie quotidienne.

### Avis

*Ne pas donner les termes explicitement si on ne doit pas à cause de niveau lycée (VdW...). Y aller mollo sur le pétrole, c'est pas ma tasse de thé.*

### Remarques

*Plus la chaîne est ramifiée, plus l'indice d'octane est élevé et meilleur est le carburant. Il ne faut pas oublier de citer les hydrocarbures cycliques, les aromatiques et les polyènes. Une analogie avec le système où un électron est susceptible de se déplacer dans un puits de potentiel permet une justification simple de la couleur. Ne pas oublier la chiralité. Gaz de ville = méthane en majorité. L'indice d'octane ne s'applique pas aux diesels (indice de cétone). Aborder les polymères. On doit effectuer une distillation d'un mélange de deux alcanes. Le reformage des fractions en C7 et C8 sert à obtenir des alcanes ramifiés. Le but du reformage est aussi l'obtention d'alcènes ou de composés aromatiques. L'indice d'octane mesure la résistance d'un carburant à l'auto-allumage. Un carburant a un indice d'octane de 95 si il se comporte du point de vue de l'auto-allumage comme un mélange à 95% d'isooctane et de 5% de nheptane. C'est le mode de vibration antisymétrie du CO<sub>2</sub> qui absorbe. Fiche INRS hexane -> toxique. Utiliser heptane et pentane. Dire un mot sur la RMN des aromatiques. Rétinène = molécule qui s'isomériser avec la lumière. Pour la carvone, petites quantités si possible car c'est cher.*



Prérequis : Acide-Base, Base de chimie organique.

### Ce que dit le jury...

Les bases de la chimie organique *biologique* ne sont pas souvent acquises. L'illustration expérimentale reste pauvre. Les connaissances sur la *structure géométrique* des amides et polyamides sont peu assurées. Le *caractère acido-basique* des amino-acides n'est pas toujours mis en évidence. Polyamides et polypeptides conduisent à une certaine confusion. Il convient d'expliquer un minimum la *synthèse peptidique*. Les connaissances générales sur le sujet sont rarement satisfaisantes. La présentation des protéines ne constitue pas le coeur de la leçon, et souvent la problématique de la synthèse peptidique est mal abordée.

### Bibliographie

Arnaud, *Chimie organique* : Pour la présentation des aa, les types de structures, Fisher.  
 Baroux, *Acides aminés et liaison peptidique - BUP 625* : Pour la présentation des aa, les structures, la liaison peptidique.  
 Durupthy, *Chromatographie sur papier et électrophorèse d'acides alpha-aminés - BUP 664* : Pour l'électrophorèse et son interprétation.  
 Prévost, *L'aspartame : un édulcorant intense - BUP 847* : Pour l'hydrolyse de l'aspartame et sa synthèse.  
 Blanchard, *Chimie organique expérimentale* : Pour le test du Biuret.

## Introduction

Parler du monde du vivant, de la digestion à la synthèse de protéines.

## 1 - Acides aminés

### 1.1 - Présentation

Définition. Résidu qui change les propriétés. Acides aminés essentiels.

#### Illustration

Présentation des 20 AA.

### 1.2 - Représentation de Fisher et chiralité

Les AA sont tous chiraux. Donner les règles pour la représentation de Fisher. Montrer sur un exemple. La vivant synthétise la série L.

### 1.3 - Electrophorèse et caractère acido-basique

Permet de séparer et d'identifier les AA. On va le faire sur le jus d'orange. On exploite la notion de zwitterion dû au caractère acido-basique des AA. Notion de pH iso-électrique.

#### Illustration

Diagramme de prédominance. pH isoélectrique. Donner les exemples des AA qu'on va séparer.

#### Expérience

Electrophorèse des AA du jus d'orange. Révélation sous hotte à la ninhydrine (toxique). Manipulation à lancer très très tôt. Comparer jus d'orange à témoin. Interpréter sens de migration.

## 2 - Liaison peptidique

### 2.1 - Définition

#### Illustration

Donner la définition et la géométrie particulière (plane) de la liaison peptidique.

### 2.2 - Polypeptides, groupe amide

#### Illustration

Exemple de l'aspartame, qui est un dipeptide. Encadrer la fonction amide.



## Expérience

*Hydrolyse de l'aspartame. Identifier les deux AA par CCM. Remarquer que les dipeptides réagissent aussi avec la ninhydrine -> test pour le groupe amide.*

## 3 - Protéines

### 3.1 - Définition

Montrer par un petit calcul le nombre gigantesque de protéines possibles.

#### Expérience

*Caractérisation par le test du biuret (urée ou blanc d'oeuf, à ne pas trop chauffer).*

### 3.2 - Structure

#### Illustration

*Primaire : Enchaînement d'AA linéaire.*

*Secondaire : Hélice alpha ou feuillet bêta.*

*Tertiaire : ponts disulfures.*

*Quaternaire : exemple de l'hémoglobine.*

### 3.4 - Synthèse

Très difficile en laboratoire. Expliquer qu'avec  $n$  AA on peut faire  $2^n$  protéines, d'où la nécessité de contrôler la réaction. Faire un petit calcul pour montrer que même avec un bon rendement unitaire on arrive à un mauvais rendement pour la protéine. Dire un mot sur la synthèse de l'aspartame.

#### Illustration

*Expliquer dans les grandes lignes la stratégie de protection pour la synthèse de l'aspartame.*

Dans le monde biologique, cette synthèse est effectuée avec une extrême précision par le ribosome, qui effectue une catalyse enzymatique en traduisant le code génétique.

#### Illustration

*Schéma ADN - (transcription) -> ARN - (traduction) -> Protéine.*

## Conclusion

Jeu Foldit. Collaboration interdisciplinaire pour comprendre le vivant et agir pour améliorer le quotidien.

#### Avis

*Le monde du vivant vue par la chimie. Commencer les expériences le plus tôt possible, absolument. Toujours mettre des gants lorsqu'on manipule les AA.*

#### Remarques

*Groupe amide = liaison peptidique. Supersélectivité de la nature grâce à la catalyse enzymatique. L'aspartame permet de lutter contre le diabète. Le méthanol rend aveugle. Expliquer que le passage de la molécule en solution aqueuse s'accompagne d'un transfert de proton conduisant à un zwitterion stabilisé par l'eau via des interactions ion-dipôle. Il y a 20 AA naturels. Pour séquencer une protéine, méthode de Sanger (poisons termineurs de chaîne) ou dégradation d'Edman. Si pas d'organisation précise on parle de pelote statistique. Un polyamide est un polymère contenant des fonctions amides résultant d'une réaction de polycondensation, mais les aa ne sont pas reliés par des liaisons peptidiques. Attention, ne pas confondre D et L avec dextrogyre et levogyre, rien à voir. Test du Biuret : avec NaOH et CuSO<sub>4</sub>, les protéines forment un complexe violet et les aa un complexe bleu. La structure primaire d'une protéine est le fruit de la traduction de l'ARNm en séquence protéique par le ribosome.*

**Ce que dit le jury...**

*Des expériences qualitatives et quantitatives sont souhaitées. Les solutions étalon doivent être préparées avec soin pour obtenir des résultats exploitables. L'origine de la couleur d'une solution, qu'elle contienne un complexe ou une substance organique reste incomprise de la majorité des candidats. Au moins deux applications exploitées. Réfléchir sur la nature des transitions spectroscopiques mises en jeu et la nature des substrats concernés par cette technique. L'illustration expérimentale de la loi de Beer-Lambert doit mettre en évidence une relation linéaire et non affine entre l'absorbance et la concentration. Dans cette leçon, le principe de fonctionnement du spectrophotomètre peut être présenté, mais il ne doit en aucun cas constituer le centre de la leçon. Lors de la présentation de la spectrophotométrie, trop de propriétés sont seulement postulées alors que des expériences simples permettraient de les vérifier (notion de couleur complémentaire, loi de Beer-Lambert...).*

**Bibliographie**

*JFLM, la chimie expérimentale (générale) : Pour les spectres, la courbe d'étalonnage, le dosage, la mesure du pKa.*

*Durupthy, Physique-Chimie Tle S : Pour la présentation de l'appareil, la loi de Beer-Lambert.*

*Mesplède, 100 manipulations de chimie (générale) : Pour le suivi cinétique.*

**Introduction**

Peut-on expliquer, comprendre et exploiter la couleur de certaines solutions ?

**1 - Principe de la spectrophotométrie****1.1 - Couleur d'une solution****Expérience**

*Spectre de la lumière blanche, spectre d'absorption d'une solution de  $KMnO_4$ . Refocaliser.*

**Illustration**

*Etoile des couleurs complémentaires (cyan + magenta + jaune).*

*pas de référence*

**1.2 - Le spectrophotomètre****Illustration**

*Décrire l'appareil en faisant le lien entre le dispositif de démonstration et l'appareil réel.*

**1.3 - Absorbance**

Définitions de transmittance et absorbance. Commenter l'échelle log (atténuation exponentielle). Limite des solutions trop concentrées.

**Expérience**

*Montrer le spectre de  $KMnO_4$  dans le vrai spectrophotomètre (attention, l'ordi allume le spectro).*

*pas de référence*

**1.4 - Loi de Beer-Lambert**

Bien préciser que ça dépend de la longueur d'onde comme on le voit sur le spectre précédent. On va donc se placer en quelques sortes à longueur d'onde fixe. Le choix de cette longueur d'onde sera le maximum d'absorbance pour des raisons de précision dans les applications qui suivront.

**Expérience**

*Retourner la cuve sur l'expérience de démonstration pour voir l'influence de la longueur, ou utiliser deux béchers de tailles bien différentes.*

**Expérience**

*Courbe d'étalonnage (échelle de teinte  $FeSCN$  améliorée, triple rinçage de cuve) pour montrer l'influence de la concentration. On vérifie ainsi la loi de Beer-Lambert.*

On en déduit l'énoncé de la loi. Additivité des absorbances. On précise les limitations.

## 2 - Utilisations de la spectrophotométrie

### 2.1 - Dosage par étalonnage

#### Expérience

*On réexploite la courbe d'étalonnage. Dosage du fer dans le vin.*

*Attention, ajouter seulement quelques gouttes d'eau oxygénée, et pas 2mL (sinon ça chauffe beaucoup et on peut plus rien faire).*

### 2.2 - Mesure du pKa d'un indicateur coloré

#### Expérience

*Mesure du pKa du bleu de bromophénol.*

*Faire le traitement complet.*

*Comparer à la valeur théorique de l'article du BUP.*

*Remarquer le point isobestique et commenter.*

*Attention, peut-être faire avec l'acide pour que le spectro ne sature pas...*

### 2.3 - Suivi cinétique

#### Expérience

*Réaction entre  $I^-$  et  $S_2O_8^{2-}$ .*

*Relier explicitement l'absorbance à l'avancement (seul  $I^3^-$  absorbe).*

*Mesurer un temps de demi-réaction.*

*Postuler ordre 1 sans le dire, et mesurer la vitesse de réaction par la méthode de Gugenheim dans Régressi.*

## Conclusion

Ouvrir sur la spectroscopie comme outil d'analyse des molécules (stoechiométrie des complexes).

#### Avis

*Pas mal d'expériences, mais le fond est simple.*

#### Remarques

*Triptyque observer comprendre agir.*

*Importance des incertitudes.*

*Interpréter l'absorbance.*

*Justifier qu'on se place à un maximum (précision en sensibilité et en stabilité).*

*Découvrir les tableaux d'avancement au fur et à mesure.*

*Si la loi de Beer-Lambert est vérifiée, la courbe d'étalonnage est une droite passant par l'origine.*

*Noir végétal/animal = graphite.*

*Utiliser le vrai spectromètre à cuve.*

*Milieu acide pour éviter le complexe  $Ce^{4+}$  et  $HO^-$  et turbidité.*

*Ne pas parler d'ordre.*

*Définir l'équivalence.*

*Eviter les volumes équivalents inférieurs à 10mL.*

*Penser à reprendre des points devant le Jury.*

*Couleur provient des transitions électroniques du champ cristallin du complexe ou de la conjugaison des longues molécules organiques.*

*Analogie avec un électron dans un puit de potentiel carré  $E \propto \frac{1}{L^2}$ .*

**Ce que dit le jury...**

*La notion d'équilibre n'est pas souvent bien mise en évidence. Les notions de quotient réactionnel et de taux d'avancement final, suggérées par le programme, peuvent être avantageusement utilisées pour comparer la force des acides. Les applications ne se limitent pas aux dosages. L'analyse de l'intitulé de la leçon invite à montrer expérimentalement le caractère constant du pKa d'un couple acido-basique. La détermination expérimentale d'une constante d'acidité doit être effectuée. Par ailleurs, une lecture attentive du programme est tout particulièrement nécessaire pour traiter cette leçon. Ici encore les effets de solvant de l'eau sont souvent mal compris. On confond trop souvent acide chlorhydrique et chlorure d'hydrogène. Il ne faut pas déséquilibrer la leçon en consacrant trop de temps à l'introduction de la notion d'équilibre. Une écriture faisant intervenir le proton H ne constitue nullement un équilibre chimique : il s'agit d'une écriture formelle définissant un couple acide-base. L'aspect nivelant est rarement abordé et ne semble pas être compris, mais il faut l'aborder. La notion de couple acide-base est souvent mal introduite. On évitera la notation A/B au profit de AH/A ou BH<sup>+</sup>/B. La constante d'acidité est la première constante d'équilibre introduite en Terminale S ; il convient donc de l'illustrer expérimentalement sur un exemple puis de la généraliser et non l'inverse. Les candidats doivent savoir retrouver les valeurs des pKa des couples de l'eau.*

**Bibliographie**

*Durupthy, Physique-chimie Tle S : Pour toute la théorie de la leçon, la mesure du pH, HCl/éthanol, Mesplède, 100 manipulations de chimie (générale) : Pour la détermination du pKa.*

**Introduction**

Réaction toujours totales ?

**1 - Rappels sur les réactions acido-basiques****1.1 - Définitions**

Acide et base au sens de Brønsted. Demi-réactions.

Couple acide-base, réaction entre deux couple = échange de proton.

**1.2 - Le pH et sa mesure**

Définir le pH. Ne pas oublier les concentrations de référence, qu'on pourra omettre par la suite.

On le mesure au papier pH ou au pH-mètre.

**2 - Notions d'équilibre chimique****2.1 - Constatations expérimentales****Expérience**

*TP HCl/éthanol. Déduire l'avancement final, comparer au maximal.*

Introduire alors le taux d'avancement final de la réaction. Réaction totale et réaction limitée.

**Expérience**

*BBT et ajout d'acide éthanoïque ou d'éthanoate de sodium. On en déduit le sens de la réaction, et l'influence sur la pH. Les deux sens sont possibles en général et vont alors se compenser pour aboutir à un équilibre.*

Rappeler ce qu'est une solution acide et une solution basique.

**2.2 - Modélisation microscopique de l'équilibre chimique**

Notations avec double flèche. Notion dynamique de l'équilibre chimique. Pas de variation macroscopique malgré des réactions perpétuelles au niveau microscopique (théorie des chocs).

**2.3 - Constante d'équilibre**

L'état du système à un instant donné est caractérisé par le quotient réactionnel.

### Illustration

Donner la formule générale avec les activités puis avec la concentration de référence. Après, particulariser tout de suite sur notre exemple. Préciser qu'on met 1 pour le solvant.

### Expérience

Solutions d'acide éthanóique à  $10^{-2}$ ,  $10^{-3,5}$ ,  $10^{-3}$ , calculer les  $Q_r$  initiaux et finaux. Constaté que le quotient final est constant. C'est la constante d'équilibre. Constaté que le sens d'évolution est tel que  $Q_r$  va vers  $K$ . *pas de référence*

### Illustration

Tableau d'avancement et exploitation par conductimétrie.

## 3 - Réactions acido-basiques

### 3.1 - Constante d'acidité

Définir la constante d'acidité comme le quotient réactionnel à l'équilibre de la réaction de la forme acide du couple avec l'eau. Lien avec le pKa.

Si on considère deux couples, montrer que la constante est égale au rapport des pKa.

### 3.2 - Autoprólolyse de l'eau

Donner l'équation et les couples. Dire qu'un est la référence, donner le produit ionique de l'eau. Donc l'eau "pure" n'existe pas. Mettre sur un axe des pKa avec la règle du gamma et parler du pouvoir nivelant de l'eau pour les acides et bases forts. Faire le lien avec le paragraphe précédent. Notion d'ampholyte.

### 3.3 - Détermination expérimentale de la force d'un acide

Donner la relation en log de la constante d'équilibre.

### Expérience

On part de deux solutions mère à 0.1M d'acide éthanóique et d'éthanoate de sodium. On fait 5 béchers avec des mélanges progressifs de 50mL. On mesure le pH. La pente nous donne le pKa grâce à l'ordonnée à l'origine. Comparer à la valeur attendue. Discuter les incertitudes.

### Illustration

Diagramme de pKa avec plein de couples. Indiquer les forces croissantes des acides et des bases. Placer (et définir si besoin) les acides et bases forts/faibles.

### 3.4 - Diagramme de prédominance

A partir de l'expression de la constante en log, déterminer les conditions pour avoir la forme acide ou basique majoritaire. En déduire le diagramme de prédominance sur notre exemple avec la valeur de pKa obtenue.

### 3.5 - Sécurité

### Expérience

Ajouter acide fort et base forte, constater élévation de température. Attention à la maison. *pas de référence*

## Conclusion

Déplacement d'équilibre, vie quotidienne, acides aminés (au choix).

### Avis

Annoncer ce qu'on choisi d'exposer ou non : couple A/B, équilibre, pas de dosage, pas de solution tampon.

### Remarques

Utiliser des flèches pour écrire les réactions et les équilibres. Programme lycée = Brönsted, tampon, biologique. Les compétences expérimentales exigibles des élèves sont la mesure du pH et la détermination d'une constante d'acidité. Bien indiquer que le proton n'existe pas en solution. le départ du proton est favorisé par la complexation du proton par l'eau et par la solvatation de la base par l'eau (interactions ion-dipôle et autres). La structure de la molécule d'eau intervient donc sur l'aptitude de l'acide à donner un proton. Définir les couples de l'eau, dont un est choisi comme référence. Définir solution acide/basique. La notion d'équilibre est dynamique. Lien avec la vie courante. Utiliser des diagrammes de prédominances. Incertitudes : première décimale du pH. Introduire l'activité. Relations structure-propriétés. La dissociation augmente quand la concentration diminue.



**Ce que dit le jury...**

La compréhension du protocole de *détermination du pKa* d'un indicateur coloré pose souvent problème. La deuxième partie de la leçon est souvent mal traitée. L'*origine de la couleur* d'une solution, qu'elle contienne un complexe ou une substance organique reste incomprise de la majorité des candidats. Les candidats ne s'interrogent généralement que sur la valeur du pKa de l'indicateur coloré sans jamais considérer la *pen- te de la courbe de titrage* autour de l'équivalence. L'apparent désaccord entre la *zone de virage* définie par  $[pKa-1, pKa+1]$  et les données tabulées est rarement analysé. Les *critères de choix de l'indicateur coloré* doivent être clairement donnés et justifiés. La courbe pH-métrique ne doit pas être présentée comme étant indispensable pour déterminer le choix de l'indicateur coloré. Le but de la leçon n'est pas de multiplier les dosages colorimétriques. Il ne suffit pas que la zone de virage de l'indicateur contienne le point à l'équivalence pour qu'il convienne au dosage. L'indicateur peut et doit être utilisé en faible quantité, cela est dû à ses propriétés et à son mode d'action.

**Bibliographie**

*Durupthy, Physique-chimie Tle S* : Pour le fond de la leçon.

*JFLM, La chimie expérimentale (générale)* : Pour l'étude de l'IC par spectro, le vinaigre et choix d'indicateur.

*Mahé, Expériences portant sur la notion d'indicateur coloré* : Pour la formule du BBP, du chou rouge.

*Hunt, La chimie de A à Z* : Pour les zone de virage des indicateurs.

**Introduction**

Introduction sur le fait qu'on aimerait bien avoir un moyen visuel de repérer le pH d'une solution.

**1 - Notion d'indicateur coloré****1.1 - Définition**

Définition. Cas monocolore/bicolore.

Rappel de la loi de Beer-Lambert.

**Expérience**

*Exemple de l'échelle de teinte du chou rouge pour repérer le pH (analogie avec le papier pH). Utiliser 9 solutions tampons entre 2 et 11. En déduire le pH de l'eau.*

**1.2 - Exemple : le BBT****Expérience**

*Montrer la couleur des formes acide et basique et la teinte sensible, avec le spectre au spectro.*

**2 - Mesure du pKa d'un indicateur****2.1 - Zone de virage**

Diagramme de prédominance, zone de virage à définir.

**Expérience**

*Mesurer le pH du BBP à la teinte sensible.*

**2.2 - Étude du bleu de bromophénol****Expérience**

*Etude par spectrophotométrie. Définir le point isobestique. Déduire le pKa. Discuter l'écart entre les deux mesures.*



## 3 - Suivi colorimétrique d'un titrage acido-basique

### 3.1 - Rôle de l'indicateur

But = repérer l'équivalence. Bien distinguer point équivalent et indicateur de fin de titrage.

L'indicateur va être dosé en même temps => faible quantité.

Pour qu'un couple acide-base soit utilisable comme IC, une des deux formes doit être très fortement colorée pour qu'on puisse l'utiliser en faible concentration (donc 2 conditions en tout), tout en voyant bien le changement de couleur.

### 3.2 - Choix de l'indicateur

#### Illustration

Présenter le choix de l'indicateur. Meilleur IC = zone de virage + virage avec faible volume (pente). Faire des graphiques pour illustrer.

#### Expérience

Dosage de l'acide éthanoïque par la soude avec deux IC différents (méthylorange et phénolphthaléine). Suivre par pH-métrie pour discuter les virages. Comparer à la valeur attendue. Cinétique lente près de l'équivalence. référence partielle

### 3.3 - Incertitudes

#### Calcul

On peut être aussi précis qu'en pH-métrie, à la goutte près. Facteur limitant : amplitude du saut de pH. Faire un beau calcul d'incertitudes.

Mentionner le cas des espèces colorées (colorimétrie souvent impossible).

## Conclusion

Il existe des IC autres que acido-basique, mais aussi des méthodes plus précises pour déterminer l'équivalence.

#### Avis

Leçon de lycée plutôt simple sur le fond.

#### Remarques

Si les coefficients d'extinctions sont égaux à une longueur d'onde, on a un point isobestique. Ne pas parler de  $pK_a-1, pK_a+1$ . Equivalence = réactifs introduits en proportions stoechiométriques = solution équivalente des produits. Dosage fort-fort : 1 point d'inflexion. Dosage fort-faible : 2 points d'inflexion. Echelle de teinte indispensable. IC absorbent car double-liaisons conjuguées. Plus il y a de conjugaison, plus la longueur d'onde d'absorption augmente. Visible à partir de  $n=5$ . Chercher les formules des IC. On parle d'effet bathochrome. Une condition de choix est que le pH à l'équivalence doit être compris dans le domaine de virage de l'indicateur, mais ce n'est pas la seule. Un autre impératif est que le changement de couleur se produise sur un volume aussi réduit que possible, donc la pente de la courbe de  $pH = f(V)$  ou  $pH = g(x)$  avec  $x$  degré de titrage, doit être très élevée au proche voisinage de l'équivalence. Une valeur minimale de 100 pour la dérivée de  $g(x)$  est usuellement reconnue. Illustrer un bon et un mauvais choix d'indicateur est aussi utile. Là aussi, il faut manipuler proprement. Au voisinage de l'équivalence les réactions sont lentes car, entre autres raisons, les concentrations des réactifs sont faibles. Goutte à goutte proche de l'équivalence. Incertitudes. Il faut bien dire que le changement de couleur est lié à un changement de l'espèce prépondérante colorée. Ce n'est pas la même espèce qui change de couleur. La zone de virage n'est pas centrée sur le  $pK_a$  en raison de la différence d'intensité des deux couleurs. Si la solution change de couleur, c'est parce que l'indicateur réagit aussi avec le réactif titrant. Peu d'IC sinon deux sauts et perturbation. IC => deux couleurs + intensité forte. Le bon indicateur pour un dosage est celui pour lequel le virage se fait sur l'intervalle de volume le plus faible. Ne surtout pas confondre le volume de virage (valeur expérimentale basée sur une observation) et le volume équivalent (notion stoechiométrique) même si on souhaite que le premier se rapproche le plus possible du deuxième. On se limite aux mono-acides et mono-bases. Couleur car délocalisation électronique rapprochant HO de BV et ramenant la transition électronique dans le visible. On parle aussi d'indicateur de fin de réaction, et ce n'est pas pour rien.

**Ce que dit le jury...**

Les *expérimentations* ne sont pas toujours conduites à leur terme et exploitées correctement. L'étude qualitative des facteurs cinétiques fait partie des pré-requis. C'est l'étude d'une cinétique de réaction, elle ne doit pas se limiter à un ensemble de définitions plus ou moins formelles. Les définitions sont à introduire à partir de l'étude expérimentale. Il ne faut pas confondre une suite de réactions avec un bilan oxydoréducteur, ou un *mécanisme réactionnel*, et, dans le même ordre d'idées, un *produit intermédiaire* et un *intermédiaire réactionnel*. Il ne faut pas négliger le rôle des différents facteurs sur la vitesse d'une réaction : ils devront être illustrés par des expériences qui permettent bien de constater les influences que l'on veut mettre en évidence. Il faut utiliser des courbes tracées expérimentalement pour illustrer les différentes définitions des vitesses de réaction. Le choix de la réaction d'oxydation de l'acide oxalique par le permanganate n'est pas judicieux dans la mesure où cette réaction, autocatalytique, a une cinétique particulière. Il peut être intéressant d'effectuer un *suivi spectrophotométrique* de la réaction d'oxydation des iodures par l'eau oxygénée, à condition de ne pas passer trop de temps à décrire la technique de spectrophotométrie, ce qui serait hors sujet.

**Bibliographie**

*Durupthy, Physique-chimie Tle S : Pour réaction rapide, réaction lente.*

*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour la concentration des réactifs, suivi spectrophotométrique.*

*JFLM, Physique-chimie Tle S : Pour la simulation de l'aspect microscopique (CD Microméga).*

**Introduction**

Réactions qui peuvent se faire à des vitesses différentes même si elles sont équilibrées (différence thermo/cinétique). Exemples de la vie quotidienne : débouche évier.

**1 - Réactions lentes et rapides****1.1 - Réaction rapide****Expérience**

*On mélange permanganate de potassium et chlorure de fer (II). On constate que le permanganate versé se décolore presque instantanément.*

La plupart des réactions acido-basiques, les réactions de précipitation ainsi que certaines réactions d'oxydo-réduction.

**1.2 - Réaction lente****Expérience**

*La solution prend une teinte légèrement orangée. La couleur évolue vers un orange foncé. On peut la comparer à une autre solution préparée avant la leçon et qui devrait avoir pris une teinte brun foncée. KI et eau oxygénée.*

**2 - Facteurs cinétiques****2.1 - Concentration des réactifs****Expérience**

*Eau oxygénée et ions tartrates. Diviser toutes les concentrations par 10, faire dans petit erlenmeyer. Le  $t=0$  est donné par l'ajout d'eau oxygénée à  $5 \cdot 10^{-2}$ . Utiliser iodex. Faire avec concentration simple et double de KI.*

*référence partielle*

**2.2 - Température****Expérience**

*Refaire le premier mélange de l'expérience précédente mais le placer dans un bain thermostaté (ou bouilloire) à  $60^\circ$ .*

*pas de référence*

Dire qu'il existe d'autres facteurs cinétiques (présence d'autres espèces, lumière, solvant).

## 3 - Suivi temporel d'une réaction

### 3.1 - Méthode chimique

Expliquer la méthode de dosage par trempe et donner ses désavantages.

### 3.2 - Méthodes physiques

Expliquer les méthodes de suivi par pH-métrie, conductimétrie ou spectrophotométrie et leur intérêts (non destructif).

#### Expérience

*Suivi par spectrophotométrie de KI et H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.*

### 3.3 - Vitesses et temps de réactions

#### Illustration

*Tableau d'avancement*

#### Calcul

*Prendre la courbe obtenue par spectro : définir, illustrer et calculer les valeurs suivantes (en postulant un ordre 1 sans le dire) :*

- vitesse moyenne de réaction,
- vitesse instantanée de réaction,
- temps de demi-réaction.

## 3 - Etude microscopique des facteurs cinétiques

### 3.1 - Modèle : chocs moléculaires

#### Expérience

*Logiciel simulation Microméga. Notion de choc efficace. Réaction = Collision \* Efficacité.*

*pas de référence*

### 3.2 - Influence des différents facteurs

#### Expérience

*Logiciel simulation Microméga. Relier les facteurs aux chocs. Attention, ne tient pas compte de la loi de Van't Hoff (donc que ok au lycée).*

*pas de référence*

Concentration → densité → probabilité de collision augmente.

Température → vitesse → probabilité d'efficacité augmente.

## Conclusion

Ouverture sur la catalyse.

#### Avis

*Attention à ne pas sortir du cadre du programme de lycée STL (profil réactionnel, énergie d'activation, mécanismes réactionnels, intermédiaires de réaction, étape cinétiquement déterminante. Préciser qu'on se limite à la cinétique homogène (pas de mécanismes réactionnels poussés). Fil rouge = oxydation des ions iodure.*

#### Remarques

*La température ne joue pas sur l'état final seulement pour des réactions totales (et encore...). Le temps de demi-réaction est la seule grandeur quantitative qui doit être abordée. Séparer les approches macroscopiques et microscopiques est indispensable en connaissant les passerelles. Discuter la méthode de suivi, réaliser une trempe. Attention, les considérations présentées dans cette leçon ne sont valables que pour des actes élémentaires. Ne pas le dire, mais l'avoir à l'esprit pour les questions. Il faut que tout soit à T lorsqu'on mélange et qu'on veut thermostat. Nombre d'oxydation = charge formelle de l'élément en attribuant les doublets des liaisons à l'atome le plus électronégatif. En solution, pas diiode mais ion triiodure.*

**Ce que dit le jury...**

La catalyse enzymatique n'est généralement traitée que très superficiellement. Il est regrettable que l'étude de la catalyse se limite souvent à la catalyse rédox, et à la dismutation de  $H_2O_2$ . Il ne faut pas confondre une suite de réactions avec un bilan oxydo-réducteur, ou un mécanisme réactionnel. Il ne faut pas confondre intermédiaire réactionnel et espèce intermédiaire. Une espèce dont on peut percevoir la couleur pendant plusieurs minutes n'est certainement pas un intermédiaire réactionnel. La catalyse acido-basique n'est que rarement présentée.

**Bibliographie**

*Durupthy, Physique-chimie Tle S : Pour la formule développée des ions tartrates et le fond de la leçon, pot catalytique, applications, sélectivité.*  
*Mesplède, Chimie Tle S : Pour la sélectivité, les enzymes, les applications.*  
*JFLM, Physique-chimie Tle S : Pour la simulation de catalyse acide (CD Microméga).*  
*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour la catalyse par les ions tartrates, le mode d'action.*  
*Mesplède, 100 manipulations de chimie (générale) : Pour les valeurs des potentiels Redox, la catalyse homogène (Landolt, théorie).*  
*Shakhashiri, Chemical Demonstration vol.2 : Pour la lampe à cétène.*  
*Voflousky, Notion de catalyse - BUP 589 : Pour le protocole de la catalyse homogène (Landolt).*  
*Lévy, Expériences de catalyse pour les classes de terminales - BUP 635 : Pour la théorie claire de Landolt.*  
*Hunt, La chimie de A à Z : Pour l'hydrogénation catalytique, des applications survolées, un historique.*

**Introduction**

On a vu deux facteurs cinétiques (concentration, température). On va voir maintenant un autre, la catalyse. Historique.

**1 - Le phénomène de catalyse****1.1 - Mise en évidence et définition****Expérience**

Dismutation de l'eau oxygénée en eau et dioxygène. Donner les potentiels standards et écrire la réaction avec la règle du gamma. *pas de référence*  
 Rétroprojecteur.

**Expérience**

Donner la formule brute et semi-développée des ions tartriques. Placer les couples sur l'axe des potentiels ( $E=0,2V/ENH$  pour les ions tartrates). Ecrire la réaction. Mélanger, chauffer, il ne se passe rien. Ajouter dans cristallisoir et grande éprouvette le cobalt. Il s'agit de catalyse homogène. On observe un changement de couleur rose  $\rightarrow$  vert  $\rightarrow$  rose. On retrouve donc l'état initial du catalyseur. Attention, mettre 3,5g d'ions tartrique pour être en excès.

Rose= Co(II) hydraté ; Vert = Co(III) complexés avec les ions tartriques.

Donner la définition du catalyseur et le marquer au dessus de la double flèche de réaction.

**1.2 - Mode d'action d'un catalyseur**

Comment expliquer l'accélération des réactions ?

Placer le couple cobalt(III)/cobalt(II) au centre de l'axe, et faire apparaître les deux sous-réactions.

**Illustration**

Faire un diagramme d'énergie.

Le catalyseur a permis de remplacer une étape réactionnelle lente par deux étapes réactionnelles rapides.

## 1.3 - Rôle purement cinétique de la catalyse

### Expérience

*Estérification avec/sans proton (simulation CD).*

*référence partielle*

## 1.4 - Spécificité et sélectivité de la catalyse

Catalyseur est spécifique à une réaction et sélectionne un produit.

### Illustration

*On ne fait pas d'expérience, mais on dit que :*

- *éthanol + chauffage + (alubine)cat = éthène + eau,*
- *éthanol + chauffage + (cuivre)cat = éthanal + dihydrogène.*

On a mis en évidence, on va maintenant voir les trois grands type de catalyse.

## 2 - La catalyse homogène

### 2.1 - Définition

Donner simplement la définition et faire le lien avec les expériences précédentes.

### 2.2 - Influence de la concentration de catalyseur

#### Expérience

*Réaction de Landolt. Horloge chimique, 4 couples à placer sur l'axe des potentiels pour bien expliquer.*

*référence partielle*

*(A) Trois tubes à essais contenant chacun le mélange suivant :*

*10mL de KI à 0,2mol/L, 3mL de thiosulfate à 0,1mol/L à 5% + empois d'amidons/iotec.*

*(B) : Trois tubes à essais contenant chacun 10mL de persulfate à 0,1mol/L.*

*(C) : Deux tubes à essais contenant chacun 2mL et 3mL de solution de Fe(II) à 0,1mol/L.*

*Verser (C) dans (A) puis (B) donne le départ. Chronométrer et conclure.*

(Si on panique, remplacer par la manip simple de livre de terminale.)

### 2.3 - Applications

#### Illustration

*Catalyse acide des réactions d'estérification.*

#### Illustration

*Synthèse de l'acide éthanoïque.*

#### Illustration

*Oxydation de l'éthylène.*

## 3 - La catalyse hétérogène

### 3.1 - Définition

Donner la définition et faire le lien avec les expériences de la première partie.

#### Expérience

*Expérience de la lampe à cétène. Se placer sous hotte, toxique. On verse un fond d'acétone dans un erlenmeyer, et on y suspend (à 4-5cm au dessus de l'acétone) un morceau de cuivre chaud (rougeoyant). On remarque que le cuivre continue de rougeoyer : il catalyse la réaction de dismutation de l'acétone, une réaction exothermique.*

### 3.2 - Influence de la surface

#### Expérience

*Comparer dans l'eau oxygénée une électrode de platine et le disque catalytique.*

*pas de référence*

### 3.3 - Applications

#### Illustration

*Mécanisme de l'hydrogénation catalytique. Hydrogénation des doubles liaisons est utilisée pour rendre solide des matières grasses originellement liquide, c'est le cas de la margarine.*



## Illustration

Synthèse de l'ammoniac.

## 4 - La catalyse enzymatique

### 4.1 - Mise en évidence, définition

#### Illustration

Système clé-serrure. Protéines, sites actifs.

#### Expérience

Expérience de la dismutation de l'eau oxygénée par de la levure de boulanger. Ca marche, on caractérise à la buchette. *pas de référence*

### 4.2 - Propriétés des catalyseurs enzymatiques

Super-sélectivité, mais sensible au milieu, difficilement transposable dans l'industrie, domaine biologique.

#### Expérience

Puis on dénature l'enzyme, ça ne marche plus. *pas de référence*

### 4.3 - Applications

#### Illustration

Digestion : amylase transforme amidon en maltose.

## Conclusion

#### Illustration

Catalyse	Applications	Avantages	Inconvénients
Homogène	industrie	action maximale	séparation difficile
Hétérogène	vie courante	séparation simple	faible action et coût élevé
Enzymatique	biochimie	spécifique et efficace	sensible au milieu

Importance industrielle pour le rendement horaire des réactions.

#### Avis

Leçon présentée par mon binôme, et qui a reçu un bon accueil de la part du jury. Malgré tout leçon trop chargée, trop longue, et avec trop de biblio en plus parfois partielle. Mis à part les protocoles, fouiller dans les livres de terminale il y a presque tout. Relire attentivement le polycopié de Sergueï pour avoir la leçon en tête et espérer pouvoir la refaire dans les temps impartis.

#### Remarques

Demander de l'eau oxygénée concentrée, et la réchauffer un peu si besoin. Acide tartrique = chiralité historique par Pasteur. Catalyseur = espèce chimiques qui augmente la vitesse d'une réaction chimique sans être elle-même transformée de façon définitive. Ainsi on tient compte du cas de l'auto-catalyse. Mieux vaut éviter d'annoncer avant l'expérience ce qui va être observé. Un transparent projeté pendant l'expérience permet d'éviter les oublis de présentation d'expérience. Le pot catalytique est connu du lycéen, il semble indispensable de détailler son fonctionnement : réactions, conditions de température. Son but n'est pas d'éliminer les gaz à effet de serre. Il est utile de distinguer moteur essence/moteur diesel. On peut évoquer les particules fines, l'inefficacité de la catalyse sur un trajet de quelques km, le recyclage. Levure = champignon. Bactérie = plus large. pour l'eau oxygénée, on désigne par solution à x volume une solution qui produira x volume de gaz pour un volume de la solution. Les catalyseurs solides ont une surface caractéristique qui est typiquement de l'ordre de  $10\text{m}^2/\text{g}$ .



\*\* Page bonus - mettre le polycopié de la leçon \*\*

**Ce que dit le jury...**

Le dosage de l'acide restant après estérification est souvent mal maîtrisé. Si on évoque ou si on utilise un montage Dean-Stark, il faut en connaître le principe. Des exemples concrets sont attendus. Les conditions opératoires sont couramment mal maîtrisées. L'exposé des facteurs cinétiques et thermodynamiques permettant de contrôler la réaction d'estérification (ou en sens inverse d'hydrolyse des esters) est attendu, en plus de la mise en évidence expérimentale d'un état d'équilibre. L'estérification ne doit pas être seulement illustrée par les résultats de M. Berthelot. Il faut réaliser au moins une synthèse d'ester.

**Bibliographie**

JFLM, *La chimie expérimentale (organique)* : Pour les exemples et les spectres IR, l'expérience en tube à essai, l'estérification sous hotte et dosage associé, le mécanisme, pour Dean-Stark.

Durupthy, *Physique-chimie Tle S* : Pour la nomenclature.

Arnaud, *Chimie organique* : Pour spectre RMN, optimisation alcool, exemple aspirine, mécanisme aussi.

Tommasino, *Chimie Tle S (Nathan)* : Pour les propriétés des esters, l'optimisation de la réaction.

Hunt, *La chimie de A à Z* : Pour des idées d'applications.

Durupthy, *H-prépa* : Pour l'optimisation de la réaction aussi, le mécanisme aussi, le spectre RMN aussi.

**Introduction**

Application des notions connues (cinétique, équilibre) à l'étude d'une réaction industrielle.

**1 - Présentation des esters****1.1 - Groupe fonctionnel et nomenclature****Illustration**

Définition, groupe fonctionnel, nomenclature (exemple simple puis ester de poire/lavande).

**1.2 - Caractérisation par spectroscopie****Illustration**

Montrer et commenter spectre IR.

Dire que les chaînes alkyles sont caractérisées par RMN. Montrer un exemple simple.

**1.3 - Propriétés des esters**

Très peu solubles dans l'eau, plus faible température d'ébullition que les alcools ou acides à nombre égal de carbone (car moins polaires), légère polarité et électrophilie, liquides relativement volatiles et odorants.

**Expérience**

Synthèse de l'ester de poire en tube à essai.

*référence partielle*

**2 - Equilibre estérification/hydrolyse de l'ester****2.1 - Estérification : synthèse de l'éthanoate d'éthyle****Expérience**

Synthèse de l'éthanoate d'éthyle. Suivre le JFLM mais multiplier les quantités de réactifs par 1,5 pour comparer avec l'hydrolyse directement avec les volumes équivalents. Titrer à la soude et phénolphaléine à froid (pour éviter la saponification). Soustraire la quantité de catalyseur dosée préalablement.

*référence partielle*

**Illustration**

Equation bilan et tableau d'avancement. Attention ici pas de solvant en excès.

**Calcul**

En déduire le rendement.

## 2.2 - Hydrolyse de l'éthanoate d'éthyle

### Expérience

Hydrolyse de l'éthanoate d'éthyle. Suivre le JFLM. Titrer à la soude et phénolphthaléine à froid (pour éviter la saponification). Soustraire la quantité de catalyseur. *référence partielle*

### Illustration

Equation bilan et tableau d'avancement. Attention ici pas de solvant en excès.

### Calcul

En déduire le rendement. Constaté l'équilibre. Estimer K.

## 2.3 - Bilan et mécanisme réactionnel

A partir de nos informations (réaction équilibrée, réversible, lente, athermique, en milieu acide...), on postule un mécanisme.

### Illustration

Mécanisme de l'hydrolyse, en 3 étapes.

Pour JFLM, étape I = 1 ; étape II = 2 -> 4 par prototropie ; étape III = 5 -> 6.

## 3 - Optimisation de la réaction

### 3.1 - Augmentation de la vitesse de réaction

On va tenter d'améliorer le rendement de l'estérification, ce qui est industriellement intéressant puisqu'on a vu que ce type de réaction conduisait à des nombreux produits de la vie courante.

Chauffage ici inefficace (athermique) mais acide sert de catalyseur.

### 3.2 - Choix des réactifs

Choisir l'alcool comme il faut : rendements (pour mélange stoechio) selon la classe d'alcool varient beaucoup. Problème : l'ester impose l'alcool.

Choisir l'acide comme il faut : rendements selon le type d'acide varie peu, et chlorure d'acyle ou anhydride plus réactifs car carbone fonctionnel plus électrophile. Mais, plus chers aussi.

### Illustration

Exemple de l'aspirine.

### 3.3 - Déplacement de l'équilibre

#### Expérience

Elimination d'un réactif (l'eau) par Dean-Stark. Utile si les réactifs chers. Pas purifier.

#### Calcul

Mesurer rendement expérimental. Si supérieur à 100%, discuter la présence d'eau.

## Conclusion

Saponification, pour rendre rapide et totale l'hydrolyse.

### Avis

Lancer les expériences rapidement.

### Remarques

Rendement valables pour mélange stoechiométrique. Proton = Catalyseur (régénéré). Vapeur = eau et solvant, mais eau plus dense que solvant s'accumule au fond. Ester = les triglycérides (graisses animales ou végétales), les parfums, les arômes de fruit, les médicaments (aspirine...), les cosmétiques. Leçon à la croisée entre cinétique et thermodynamique. Réaction de condensation = addition avec élimination d'eau. Ca peut sentir mauvais (sueur). La couleur de la phénolphthaléine disparaît à cause du dioxyde de carbone qui se dissout. On peut diminuer la solubilité par relargage à l'eau salée. Pour ce dosage l'acide sulfurique est un diacide. Le réactif est le composé minéral, ou si les deux sont organiques, c'est le composé qui attaque par un hétéroatome lors de l'ECD (étape 2 ici). Zhéolite H = tamis moléculaire (absorbe l'eau dans des pores) et catalyseur (contient des H acides à sa surface). Dean-Stark : parler plutôt de conversion que de rendement.

**Ce que dit le jury...**

Les *applications* de la saponification des esters ne se limitent pas à la fabrication des savons. Des exemples concrets sont attendus. Les *conditions opératoires* sont couramment mal maîtrisées. Le *rôle de la base* dans le *déplacement d'équilibre* doit impérativement être dégagé. D'autre part, la saponification d'un ester benzoïque n'a de valeur que si elle s'accompagne d'un *calcul de rendement*. La saponification doit être comparée à l'hydrolyse.

**Bibliographie**

*JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour la poivre, l'eau dure, les expériences sur les propriétés, l'historique, spectre IR, dosage de l'aspirine.*

*Durupthy, Physique-chimie Tle S : Pour la saponification du benzoate d'éthyle.*

*Tommasino, Chimie Tle S (Nathan) : Pour les propriétés des esters.*

*Hunt, La chimie de A à Z : Pour des idées d'applications.*

*Durupthy, H-prépa : Pour le spectre RMN, le mécanisme, au delà du savon, verni (polymères).*

*Arnaud, Chimie organique : Pour savon, acide gras, lavage, margarine.*

**Introduction**

Hydrolyse acide = lente + non totale. Est-ce qu'on peut faire mieux ?

**1 - Saponification des esters****1.1 - Bilan de réaction**

Rappeler les groupes fonctionnels, les caractéristiques spectroscopiques, définir la saponification comme l'hydrolyse basique d'un ester, écrire le bilan de la saponification du benzoate d'éthyle.

On sait que l'hydrolyse acide d'un ester est lente et limitée, qu'en est-il de l'hydrolyse basique ?

**1.2 - Etude expérimentale : saponification du benzoate d'éthyle****Expérience**

*Saponification du benzoate d'éthyle. Verser le milieu réactionnel dans un bécher dans l'eau glacée et ajoute de l'HCl. Par réaction acido-basique, on a précipitation de l'acide benzoïque. Filtrer sur Büchner et laver, sécher, peser et caractériser banc Köfler (122°C). Lancer en double pour illustrer les deux étapes devant le jury.* *référence partielle*

**1.3 - Conclusion expérimentale et comparaison à l'hydrolyse acide****Illustration**

*Mécanisme réactionnel. Caractère total de la réaction.*

**Calcul**

*Calcul du rendement (M=122g/mol).*

*pas de référence*

**2 - Application à la saponification des savons : les corps gras****2.1 - Fabrication des savons**

Définir acide gras, corps gras, savon. Faire le lien avec l'expérience précédente pour la fabrication d'un savon.

**2.2 - Lien entre structure et propriétés d'un savon****Expérience**

*Expérience du poivre et interprétation.*

**Expérience**

*Solubilité d'un savon dans l'eau distillée ; constater l'apparition de mousse quand on secoue ;*

### Expérience

*Propriétés détergentes : ajout de quelques gouttes d'huiles.*

### Illustration

*Expliquer le principe du lavage par le savon. Notion de Liposome.*

### Expérience

*Savon et Contrex. Explication du problème de l'eau dure.*

Dire qu'il y a aussi de l'intérêt à l'hydrogénation des corps gras pour faire de la margarine (différence saturé/insaturé. Notion d'oméga 3/6/9.

### 2.3 - Au delà du savon, le glycérol

Récupérer le glycérol est aussi intéressant, utilisé en pharmacie, cosmétiques.

### Illustration

*Exemple du verni. Réaction de polymérisation par étape entre l'acide ortho-phthalique et le glycérol.*

## 3 - Dosage du principe actif contenu dans l'aspirine

### 3.1 - Principe du dosage

#### Expérience

*Peser le sachet et comparer à la boîte (différence = excipients).*

*pas de référence*

#### Illustration

*Dosage indirect d'un cachet d'aspirine, car c'est un ester et le dosage utilise une réaction de saponification. Indirect car on a ainsi réaction entre acide fort et base forte.*

### 3.2 - Réalisation expérimentale et exploitation

#### Expérience

*Réaliser le dosage (seulement la réaction 2) et calculer la masse de produit. Discuter incertitudes et comparer à la valeur attendue.*

## Conclusion

Ouverture sur l'importance industrielle et l'utilité de la saponification dans certains extincteurs (feux de classe F, huiles de cuisson, réaction violente si ajout d'eau, auto-inflammation, on utilise du carbonate de potassium pour éteindre le feu.).

#### Avis

*Une leçon à faire proprement... et finalement pas trop compliquée. Conclusion originale à savoir.*

#### Remarques

*Enlever le tuyau avant de couper l'eau pour la fiole à vide. L'acide benzoïque se sublime vers 100°C. Tension superficielle = énergie d'interface. Rendement = qté de matière obtenue / attendue. bicouches = vecteurs en médecine et esthétique. Production de savon, de glycérol pour faire des polymères. Le précipité n'est pas le même selon que l'eau est acide, dure ou salée. Halte à la chimie désincarnée. On recristallise l'acide benzoïque dans l'eau. Glycérol = propan-1,2,3-triol. Quand on lave sur Büchner, on enlève le vide quand on lave. EDTA = ion éthylène-diamine-tétra-acétate. Connaître la structure de son complexe. Etat initial = état fictif. Les phénols sont plus acides que les alcools. Un ion phénolate, base conjuguée d'un phénol, est stabilisé par résonance et est plus stable qu'un ion alcoolate. Tester au papier pH pour savoir si la réaction est totale. On sépare le savon du solvant en ajoutant NaCl, il est donc difficile de se laver dans l'eau de mer. Ne pas confondre carbonate de potassium (saponification) et bicarbonate de potassium (étouffement par mousse et dioxyde de carbone) pour la conclusion sur les extincteurs.*

Prérequis : Techniques expérimentales, Estérification et saponification, Dosage indirect.

### Ce que dit le jury...

*Le candidat se limite souvent à l'étude de l'aspirine, qui n'est pas le seul médicament étudié en lycée. Les conditions opératoires sont couramment mal maîtrisées. La caractérisation et l'analyse de la pureté des produits formés lors d'une synthèse chimique sont indispensables. La préparation de l'aspirine est à effectuer durant la leçon, la caractérisation pouvant être faite sur le produit synthétisé en préparation. Un calcul de rendement est souhaitable. La formulation n'est pas à négliger lors de l'exposé et doit être présentée sous un angle chimique. Il est souhaitable de terminer la synthèse en cours de leçon, afin de pouvoir présenter le produit obtenu.*

### Bibliographie

*JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour la synthèse de l'aspirine, et plein d'infos, la formulation, le mode d'action.*  
*Mesplède, 100 manipulations de chimie (organique) : Pour la CCM (bon éluant).*  
*Durupthy, Physique-Chimie Tle S Spécifique : Pour s'inspirer du vocabulaire de lycée.*  
*Quentin, L'acide acétylsalicylique, l'aspirine - BUP 776 : Pour l'historique et des infos chimiques, et le test avec Fe.*  
*Geneviève, Dosage de l'acide acétylsalicylique contenu dans un cachet d'aspirine - BUP 684 : Pour un autre, le vitascorbol.*  
*Hunt, La chimie de A à Z : Pour une touche d'info sur l'aspirine.*

## Introduction

Le chimiste peut choisir et contrôler les conditions expérimentales pour orienter une synthèse. Illustration du processus industriel : synthèse, formulation, contrôle de qualité. Donner des chiffres sur la production et consommation de médicaments. Présenter les étapes du processus industriel. Choix de la leçon : l'aspirine.

## 1 - Historique, Mode d'action, Formulation

Donner des chiffres sur ce médicament et l'historique de sa synthèse ainsi que son importance.

Au tableau, indiquer la voie de synthèse industrielle.

Discuter les groupes fonctionnels présents ainsi que le mode d'action dans l'organisme et la formulation.

## 2 - Hémissynthèse

### 2.1 - Réaction de synthèse

#### Expérience

*Synthèse (chauffage à reflux) selon JFLM. Prendre son temps, laisser la réaction se terminer. Justifier toutes les étapes. Lancer l'expérience dès le début de la leçon. Reconnaître une estérification. Penser à garder un peu de produit impure pour la CCM et pour les tests. Justifier le choix d'un anhydride comme solvant, la catalyse acide, le chauffage.*

#### Illustration

*Recopier les étapes sur transparent pour commenter.*

### 2.2 - Purification

#### Expérience

*Purification (recristallisation) selon le JFLM. Attention le schéma est faux. Il faut chauffer plus pour dissoudre, et également refroidir tout doucement en posant en l'air, puis sur la table, puis sur une couche de glace. Expliquer et justifier si l'on fait ou pas une filtration à chaud.*



## 2.3 - Caractérisation du produit

### Expérience

Faire la CCM selon le Mesplède qui a un meilleur éluant avec aussi produit commercial.

### Expérience

Comparer les points de fusion.

### Expérience

Test avec le fer sur la fonction phénol. On montre qu'on la retrouve en faisant la réaction inverse (bonus).

## 3 - Dosage

### Expérience

Peser le sachet et comparer à la boîte.

*pas de référence*

### Expérience

Faire le dosage direct par la soude proposé par le JFLM :

- sur notre produit pour calculer le rendement,
  - sur un comprimé commercial pour l'aspect contrôle de qualité.
- Savoir que le dosage indirect est meilleur, mais un peu plus long.

A chaque fois, déduire la masse et comparer sans oublier les incertitudes.

## Conclusion

Citer autres médicaments (préparer leurs formules).

### Avis

Bien manipuler. Lancer la réaction 15 minutes avant l'arrivée du jury pour directement pouvoir exploiter après. En fait la partie 1 est à faire pour combler les vides pendant la réalisation des expériences.

### Remarques

L'aspirine liquéfie le sang. Ne pas confondre alcool et phénol. Aux dires d'étudiants de médecine, comme il est très délicat de mélanger des poudres les cachets sont en fait calibrés à 10 % près. Il faut être capable d'en citer d'autres (structure et intérêt) si on a choisit l'acide acétylsalicylique. Il est donc conseillé de lancer la synthèse dès le tout début de la leçon. En préparation, on peut doubler les quantités, mener la synthèse jusqu'au bout sur la moitié du produit obtenu, l'autre moitié pouvant servir à illustrer la recristallisation, par exemple. Enlever le réfrigérant en premier. Le coût et la sécurité sont deux contraintes fortes en industrie. Ainsi dire tranquillement que la réaction de par  $\text{LiAlH}_4$  est une réduction classique n'est pas heureux, une hydrogénation catalytique qui réduit efficacement le groupe nitro en groupe amino est la méthode industrielle. Formulation : elle vise à améliorer l'efficacité du médicament mais aussi à faciliter sa mise en comprimé. L'aspirine simple contient des gros cristaux, elle se dissout mal et provoque des brûlures d'estomac. La Catalgine contient la forme basique de l'aspirine, plus soluble et moins douloureuse. L'aspirine effervescente contient de l'hydrogénocarbonate de sodium et sa dissolution est plus rapide. Sa dissolution s'accompagne d'une réaction acido-basique. L'aspirine 500 contient de l'amidon et du gel de silice comme excipients ; on peut aussi enrober l'aspirine pour obtenir un effet retard : l'absorption, plus lente et plus étalée est effectuée dans l'intestin (l'enrobage est gastro-résistant : l'aspirine arrive sans dommage dans l'intestin). Ne surtout pas doser de l'aspirine effervescente par une méthode acido-basique ! On casse toujours le vide avant de fermer le robinet d'une trompe à eau. On peut faire la même chose pour doser l'acide ascorbique du "Vitascorbol 500". La banc Köfler s'étalonne juste avant le mesure et se nettoie de façon orthogonale au gradient. Utiliser ballon tricol. Distillation pétrole C8-12 puis craquage C2-4. Difficile de réduire les cycles aromatiques, en industrie on utilise du fer en milieu acide. Bien sécher avant les opérations de caractérisation. Attention au bain d'huile.

**Ce que dit le jury...**

Les expériences sont peu exploitées, les concepts de thermodynamique et de cinétique mal compris. Les applications industrielles et de vie courante manquent. Les phénomènes électriques (nature des porteurs de charge, tension en conductimétrie...) sont souvent mal compris. Mettre en évidence la formation d'ions Zinc(II) sur la pile Daniell. Piles au repos et piles en utilisation à distinguer. Mesure de la force électromotrice. Détermination de la résistance interne d'un système électrochimique et la réalisation expérimentale de piles usuelles présentent des intérêts pédagogiques. Mettre en évidence le sens de circulation du courant. Etude sommaire de la caractéristique U-I. Le rôle du générateur n'est souvent pas mentionné. Ecrire les échanges électroniques aux électrodes.

**Bibliographie**

Cachau-Herreillat, Des expériences de la famille Réd-Ox : Pour tous les rappels utiles, l'étude de la pile Daniell, les schéma, l'introduction historique, schéma conventionnel.  
 JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour le transfert direct, la résistance de la pile Daniell, la pile Leclanché et durée de vie, pile bouton.  
 Durupthy, Physique-chimie 1ère S : Pour l'historique.  
 Duboc, Une pile, qu'y a-t-il à l'intérieur d'une pile, qu'est-ce que l'on y voit quand elle est ouverte? - BUP 633 : Pour les piles salines, alcalines, bouton, au lithium.  
 Hunt, La chimie de A à Z : Pour la pile à combustible, le test des ions.

**Introduction**

Défi énergétique. Courant électrique = déplacement d'électrons. Or redox = échange d'électrons. On va essayer de récupérer ces électrons pour les faire passer dans un circuit. Ce qui permet ça : les piles. Historique et lien à la vie courante.

**1 - Construction d'une pile électrochimique****1.1 - Transfert direct d'électrons****Expérience**

Redox directe entre Cu et Zn. Rappeler le critère d'évolution spontanée. Insister sur le fait que *référence partielle* c'est le cas ici. On peut comparer avec un bécher où on tente la réaction inverse pour s'en convaincre.

**1.2 - Transfert indirect d'électrons : la pile**

On veut récupérer sous forme électrique une partie de l'énergie libérée lors de la réaction chimique. Ça nécessite que les deux couples ne soient plus en contact physique, pour qu'on force les électrons à passer dans un circuit. Bref historique de la pile.

**Illustration**

Sur l'exemple de la pile Daniell : demi-pile, pont salin, un couple par demi pile.

**1.3 - Etude expérimentale****Expérience**

Pile Daniell. On a un générateur électrochimique. Le faire débiter dans une ampoule (ou mieux DEL). Obtenir la polarité de la pile Daniell avec un voltmètre. En déduire le mouvement des électrons. Tester les ions Zinc(II). *référence partielle*

**Illustration**

Réactions aux électrodes, anode, cathode, fem, lien avec les potentiels.

**1.5 - Schéma conventionnel****Illustration**

Sur l'exemple de la pile Daniell.

## 2 - Pile en fonctionnement

### 2.1 - Caractéristique

#### Expérience

Mesure point par point de  $U$  et  $I$  avec boîte de résistances. On obtient par fit de la résistance interne ( $U=ErI$ ).

### 2.2 - Énergie stockée et durée de vie

Refaire le lien pile usée et équilibre chimique atteint.

#### Calcul

Bilan de matière et de charge délivrée au circuit extérieur  $Q$ . Puis énergie stockée= $Q \cdot fem$ . *pas de référence*  
Discuter la durée de vie, même si ça peut dépendre de  $I$  (échauffement...).

## 3 - Piles usuelles

#### Illustration

Présenter chaque pile sur transparent, avec un schéma légendé et schéma conventionnel, polarité, demi-réactions et réaction globale, avantages, inconvénients, applications, pollution.

### 3.1 - Pile saline

Pile Leclanché, pas cher et fragile car l'anode en zinc qui fait l'emballage se détériore.

#### Expérience

Montrer l'intérieur de la pile.

### 3.2 - Pile alcaline

#### Expérience

Tracer la caractéristique courant-tension d'une pile alcaline commerciale. Commenter la constance et le danger de court-circuit. *pas de référence*

Les plus répandues.

### 3.3 - Pile bouton

Similaires à pile Volta, aspect historique du mot.

### 3.4 - Pile au lithium

### 3.5 - Pile à combustible

Utilisé en haute technologie.

## Conclusion

Indiquer le caractère non rechargeable d'une pile. Annoncer la leçon sur les accumulateurs et les batteries. Problème environnemental du retraitement.

#### Avis

Agir = recherche doc + rencontre pro + interdisciplinarité.

#### Remarques

Pas de réactif limitant dans une pile de concentration. Corrosion = pile à 1 électrode. On peut sortir de l'approximation linéaire de la loi de Fick au voisinage des électrodes. Ampère-heure = quantité de charge. Tension à vide plutôt que force électromotrice. Le pont salin empêche le transfert direct d'électrons entre l'oxydant d'un couple et le réducteur de l'autre. Les demis équations sont de vraies réactions aux électrodes. Ne pas citer d'accumulateurs ou de batteries. Piles salines et alcalines :  $MnO_2 / MnO(OH)$  et  $Zn(II) / Zn$ . Piles alcalines : la précipitation de l'hydroxyde de zinc permet de fixer la concentration en  $Zn^{2+}$  et de maintenir une fem constante. Piles au lithium :  $MnO_2 / MnO(OH)$  et  $Li^+ / Li$ . Li peu dense et très réducteur, forte capacité massique et une fem élevé (3,5V). Piles bouton :  $Ag_2O / Ag$ ,  $ZnO / Zn$  ou  $FeO_x / Fe$ . Piles à combustibles : systèmes ouverts, peuvent fournir une puissance et un courant élevés,  $H_2 / O_2$  générateur électrique en aérospatiale. Faire les caractéristiques en entier en préparation. Différence des courbes  $i(E)$  forcée et spontanée (rapide/lent). Amalgame = solution dans le mercure (piles alcalines). Electrode d'accumulateur se déforme avec le nombre de cycles.

## Ce que dit le jury...

*Le rôle du générateur n'est souvent pas mentionné. L'écriture de réaction bilan d'électrolyse tend à créer la confusion avec le fonctionnement d'une pile. Il est préférable d'écrire les échanges électroniques aux électrodes. L'accumulateur au plomb est souvent mal maîtrisé. Le mot surtension doit être employé à bon escient. On essaiera de bien comparer les avantages et inconvénients des piles (salines/alcalines) et des accumulateurs (plomb, nickel-cadmium). Mieux connaître les courbes intensité-potentiel.*

## Bibliographie

*Cachau-Hereillat, Des expériences de la famille Rédox : Pour l'électrolyse du bromure de cuivre, plein de théorie, bilan électrochimique.*

*Hunt, La chimie de A à Z : Pour la définition de l'électrolyse, les piles et accumulateurs, l'électrolyse des saumures aussi, les piles rechargeables, la photosynthèse.*

*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour l'électrolyse de l'eau acide, l'accumulateur au plomb, l'électrolyse du chlorure de sodium, tableau comparatif.*

*Durupthy, Chimie PC/PC\* : Pour le potentiel du couple plomb manquant.*

*Defranceschi, La chimie au quotidien : Pour les autres accumulateurs.*

## Introduction

Piles jetables, peut-on faire mieux ?

### 1 - Electrolyse : Présentation et définition

#### 1.1 - Expériences

##### Expérience

*Dans un tube à essai on introduit un fond (environ 2cm) d'eau de brome et une tournure de cuivre (le cuivre est alors en large excès). On bouche le tube et on agite vigoureusement. La solution passe de l'orangé au vert. On forme de façon spontanée la solution de bromure de cuivre.* *pas de référence*

Constater la stabilité d'une solution de bromure de cuivre (irréversibilité de la réaction).

##### Expérience

*Electrolyse de la solution de bromure de cuivre dans le tube en U sur électrode de graphite. On ajoute un peu de cyclohexane de chaque côté (pour extraire le dibrome formé). On obtient un dépôt de cuivre sur l'une des électrodes, une coloration orangée à l'autre. Ajouter un ampèremètre.* *référence partielle*

#### 1.2 - Interprétations

Le cuivre et le dibrome ont réagi pour former du bromure de cuivre (vert). La réaction est presque totale.

##### Illustration

*Echelle de potentiels, réactions aux électrodes, circulation des porteurs de charge, anode et cathode.*

#### Bilan : Généralisation

Définition de l'électrolyse, différences avec la pile. Anode, Cathode. Système chimique = récepteur d'énergie électrique ici.

### 2 - Aspects quantitatifs

#### 2.1 - Electrolyse de l'eau

##### Expérience

*Electrolyse de l'eau acidifiée à 1M. (dilution de l'acide sous hotte). Electrodes de platine dans l'électrolyseur. On récupère les gaz formés dans deux éprouvettes graduées.*

## Illustration

Schéma, demi-réactions et bilan, tableau d'avancement.

## Attention

Imprécision dans le JFLM : écrire la réaction à la cathode plutôt avec les protons, on est en milieu acide. Aboutir à un bilan avec 4 électrons échangés :  $2\text{H}_2\text{O} = \text{O}_2 + 2\text{H}_2$ .

## 2.2 - Bilan électrochimique

### Calcul

Faire le lien entre courant et quantité de gaz (plutôt dihydrogène) puis volume mesuré.

*référence partielle*

### Expérience

On vérifie qu'on produit à 1A, 4mL en 35 secondes.

## 2.3 - Aspects énergétiques

Notions de contre-fem/seuil de l'électrolyseur, qui dépend des couples redox, des électrodes, de T et P. Résistance interne qui dépend de l'éloignement des électrodes, de l'électrolyte, et des électrodes. Dipôle du type  $U = U_s + RI$ .

### Calcul

Estimer l'énergie qu'on a dépensée. Si le kWh coûte 10 centimes, estimer le prix de production d'un litre. En baissant le courant, la tension aurait été moindre et on aurait dépensé moins d'énergie mais on aurait dû attendre plus longtemps. L'industriel devra donc trouver un compromis coût/rendement horaire.

*pas de référence*

## 3 - Applications

### 3.1 - Accumulateurs

#### Expérience

Batterie au plomb. On mesure la tension sur synchronie. Première charge / Décharge / Charge. Batterie = 6 accumulateurs de 2V. Interrupteur va et vient entre générateur et lampe.

#### Illustration

Expliquer avec les 4 couples Redox du plomb chaque étape.  
Parler des piles rechargeables (NiCd), remplacées par NiMH, "piles" au lithium.  
Tableau comparatif (durée de vie, recharges, coût à convertir en euros...)

### 3.2 - Réductions de cations métalliques

#### Expérience

Electrozingage d'un clou en fer dans une solution d'acide sulfurique. Permet de protéger contre la corrosion.

*pas de référence*

### 3.3 - Production de produits chimiques

#### Illustration

Production de dichlore à partir de l'hydrolyse des saumures.

## Conclusion

Photosynthèse = réaction forcée qui produit du glucose, inverse de la respiration. Energie = lumière.

### Avis

Presque plus simple que les piles.

### Remarques

Aspect énergétique. Recharger pile = dangereux ( $\text{H}_2$ ). Energie sous forme mobile (portables).. LiPo = lithium polymère (solvant). ATP -> ADP = réaction forcée. Mesure électrolyse à faire sur  $\text{H}_2$ . Eviter le graphite à cause de l'adsorption. Electrolyse de l'eau pas rentable. Dioxygène extrait de l'air par liquéfaction et dihydrogène provient de combustibles fossiles (mais moins purs). Ne pas parler de Q et K. Après réaction, hors équilibre.



Prérequis : Dosages colorimétrique, pH-métrie, conductimétrie.

## Ce que dit le jury...

*Contrôle qualité ne se réduit pas à dosage. Caractériser les espèces sans se limiter au pH.  
Différents types de titrages.  
Introduire les polyacides dans un fil conducteur en lien avec la vie quotidienne.  
Penser au quantitatif mais aussi au qualitatif.*

## Bibliographie

*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour le vinaigre, le coca.  
Cachau-Herreillat, Des expériences de la famille acide-base :  
Pour les test qualitatifs et pour le destop. Contient aussi le vinaigre et le coca si besoin.  
Shakhashiri, Chemical Demonstrations vol.3 : Pour indicateur coloré.*

## Introduction

Acides et bases au labo et à la maison. Où, et quels risques ?

### Expérience

*Echelle de pH avec plein de produits de la maison. Utiliser du papier pH. Mettre en scène.*

Alimentation plutôt acides (estomac  $\text{pH} < 2$ ). Produits ménagers = acides et bases.

### Illustration

*Mettre l'échelle de pH sur transparent et laisser comme fil conducteur.*

## 1 - Liquides alimentaires

### 1.1 - Indicateurs colorés

Quels sont les acides alimentaires ? Certains sont comme ceux du labo !

#### Expérience

*Le jus de raisin change de couleur selon le pH. Utiliser tubes à essai,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaOH}$ .*

### 1.2 - Vinaigre

Le jus de raisin donne du vin qui après fermentation donne du vinaigre. Gout acide = Brønsted. Danger ?

#### Expérience

*Craie ( $\text{CaCO}_3$ ) dans vinaigre. Pouvoir corrosif. Ecrire les couples, déduire  $\text{CO}_2$ .  
Acide odeur caractéristique => acétique. Ecrire la réaction.*

Quelle concentration pour le goût ?

#### Illustration

*Projeter schéma, réaction et encadrer la fonction acide.*

#### Expérience

*Dosage colorimétrique de 1 mL de vinaigre blanc par la soude à 0,1 M avec la phénolphthaléine à la goutte près.  
Traiter les incertitudes.*

### 1.3 - Badoit, Soda

Boissons gazeuses très acides, pourquoi ? Gaz ?

#### Expérience

*Tableau mesure de pH Badoit/Cola avant et après décarbonation. Faire dégazer dans eau de chaux ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) avec plaque chauffante, secouer si besoin. Déduire  $\text{CO}_2$  (pH). pH augmente, déduire acide. Redonner le couple. Sans bulle (à préparer avant), badoit neutre mais pas Coca, donc c'est ou ce n'est pas le seul acide.*



## Illustration

Schéma expérience suivante avec équation. Attention deux équivalents.

## Expérience

Dosage pH-métrique de l'acide phosphorique du coca. Tracer la dérivée. Deux sauts équidistants => polyacide. Etiquette =>  $H_3PO_4$ . Comparer au seuil légal de 0,8g/L. Utilité des normes pour la santé. Coca sucré mais aussi acide.

## Expérience

Pouvoir décapant du coca car acide : test des pièces de cuivre (à plonger en préparation) avec un témoin eau distillée. Aspect terne =  $Cu(OH)_2$ . Ecrire équation.

## 2 - Liquides ménagers

### 2.1 - Détartrant (Harpic 100 pourcents)

Pour faire le ménage, produits plus adaptés, cahier des charges. Montrer pH aussi acide sur l'échelle. Elimine les dépôts calcaires.

#### Expérience

Refaire le test de la craie avec le détartrant.

#### Expérience

Quel acide ? Former précipité de  $AgCl$  avec  $AgNO_3$ . Déduire  $HCl$ . Ecrire les équations. Dire qu'on peut le doser avec la même méthode que le vinaigre et qu'on trouve 2M.

### 2.2 - Destop

Les canalisations peuvent se boucher, on utilise un produit basique qui dissout les matières organiques. Destop = Soude à 20% en masse. Vérifions cette indication.

#### Illustration

Projeter schéma et équation de l'expérience.

#### Expérience

Dosage conductimétrique de la soude du destop par l'acide chlorhydrique à 0,1M. Attention à l'effet de dilution. Partir de 3g dans 100mL. Gants.

On a vu qu'il y a à la maison des acides et des bases. Leur mise en contact peut se révéler dangereuse.

#### Expérience

Dans tube à essai bouché, mélanger détartrant et destop. Deviens rouge, danger ! Parler des accidents avec l'eau de javel ( $HClO^-$  et  $Cl^-$ ) qui libère du dichlore en présence d'acide. Gants.

## Conclusion

Acides et bases dans notre quotidien. On a caractérisé les acides, pouvoir décapant, danger pour les dents. Nettoyant acides ou basiques stockés avec précaution ( $Cl_2$ ). Nécessité des normes et des contrôles.

#### Avis

Leçon ayant reçu un bon accueil lors de la présentation en classe. Il faut aller vite. Elle est axée sur le thème des dangers des produits rencontrés à la maison.

#### Remarques

Craies souvent en plâtre, ne marche alors pas. Si on a oublié de plonger les pièces, l'action du vinaigre est plus rapide. Jus de fruits -> acide citrique. Jus de raisin -> acide tartrique et malique. Les vinaigres bas de gamme sont coupés avec  $HCl$ . Odeur Destop =  $NH_3$ . Si trop de  $CO_2$ , l'eau de chaux redevient limpide par réaction acide base. Conductimètre = tension alternative de 0,5V. Première acidité de  $H_3PO_4$  presque forte. Matière organique = ester, d'où action du destop par saponification.

Prérequis : Tests caractéristiques, A/B, Redox, Dosages, Saponification.

### Ce que dit le jury...

*Un contrôle de qualité n'est pas qu'un dosage.*

*Il ne s'agit pas de faire un TP, mais une leçon ou les choix sont justifiés et faire ressortir une **progression**.*

*Dans la mesure du possible il est attendu des méthodes modernes de dosage.*

*L'interprétation des différents dosages se fera en lien avec les **normes** en vigueur pour le contrôle qualité des boissons considérées.*

***Précision** des méthodes développées et calculs d'erreur sur les dosages effectués présentent également un grand intérêt.*

*Ces leçons doivent être l'occasion d'illustrer la **variété** des méthodes de dosage et les réactions de titrage.*

### Bibliographie

*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour les nitrates, l'acidité du coca-cola, la norme du sérum physiologique.*

*JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour l'aspirine.*

*Cachau-Herreillat, Des expériences de la famille Acide-Base : Pour des rappels.*

*Cachau-Herreillat, Des expériences de la famille Red-Ox : Pour des rappels.*

*Durupthy, Chimie PC/PC\* : Pour le tableau périodique en 4ème de couverture.*

*Daumarie, Florilège de chimie pratique : Pour se rappeler de la loi de Kohlraush.*

## Introduction

Contrôle de qualité = espèces présentes et leurs quantités (pas que dosage).

La chimie s'applique au quotidien, pour notre sécurité, respect de normes.

## 1 - Notion de contrôle qualité

### 1.1 - La raison du contrôle

Contrôles car normes car protection (santé, environnement, commerce, arnaques...).

### 1.2 - Les méthodes de contrôle

#### Illustration

*Méthode physique contre méthodes chimiques. Mesure directe ou par étalonnage.*

Choix selon coût, précision, système.

## 2 - Limite des nitrates dans l'eau

Ici on veut seulement vérifier qu'on ne dépasse pas un seuil.

On peut le faire de façon qualitative.

Nitrate et agriculture, risque pour la santé.

Réaction rédox catalysée.

#### Expérience

*Avec le test du JFLM, comparer la réaction avec l'eau ou avec une solution étalon comme **référence partielle** (Prendre solution de  $\text{NaNO}_3$  à  $10^{-4}\text{M}$  dilué par 3) qui correspond à la limite légale.*

*Constater qu'on est bien en dessous de la limite légale de 50mg/L de  $\text{NaNO}_3$ .*

#### Attention

*Seuil limite à connaître, et protocole modifié aussi.*

## 3 - Acide phosphorique du coca-cola

Là encore on va vérifier qu'on ne dépasse pas un seuil, norme commerciale et risque pour la santé.

On utilise ici un titrage acido-basique.

## Expérience

Décarbonation et mise en évidence du dioxyde de carbone, puis dosage du diacide (première acidité forte). Comparer à la norme en vigueur. On est à la limite.

## 4 - Ions chlore dans le sérum physiologique

Problème plus délicat car on est dans le milieu médical.

On doit être dans un intervalle de valeur pour ne pas poser de problème d'osmose.

La valeur est de 254mmol/L. On tolère un écart (à savoir) de 2,5 mmol/L.

## Expérience

Faire une droite d'étalonnage avec des solutions de NaCl entre 0 et 0,24 mol/L à préparer par pesée et fiole de 100mL. Mesurer la conductance du sérum physiologique. Retrouver la loi de Kohlraush. On obtient la valeur à 0,1mmol/L près. Interpréter. *référence partielle*

## Attention

Tolérance à savoir, et protocole aussi.

## 5 - Principe actif d'un cachet d'aspirine

Toujours importance car milieu médical. On va utiliser cette fois une réaction de saponification.

## Illustration

Bref rappel de saponification.

## Expérience

Dosage indirect et comparaison au poids indiqué sur la boîte. Marge de 10%.

## Attention

Marge à savoir.

## Conclusion

Ouverture sur d'autres types de test (spectro IR ou RMN), d'autres applications (contrôle anti-dopage).

## Avis

Une leçon-TP vraiment intéressante et ancrée dans le réel sans problème.

Agir devient logique.

Savoir les normes par contre.

## Remarques

Justifier pour chaque exemple l'utilité et le choix de la méthode du contrôle de qualité.

Ne pas laisser longtemps dans l'air les électrodes.

1 goutte = 0,05mL.

Pression osmotique liée à l'égalité des potentiels chimiques.

Pas besoin d'étalonner le conductimètre si on fait une courbe d'étalonnage.

Bien évaluer les incertitudes.

Winkler à justifier avec diagramme E-pH si on le fait.

**Ce que dit le jury...**

Les intitulés de ces leçons sont clairs, les différentes parties doivent être abordées et reliées entre elles. Les molécules utilisées dans les expérimentations sont souvent inconnues des candidats. L'origine de la couleur d'une solution, qu'elle contienne un complexe ou une substance organique reste incomprise de la majorité des candidats. Des exemples concrets sont attendus. Les conditions opératoires sont couramment mal maîtrisées. Hydrodistillation et entraînement à la vapeur sont souvent confondus. Les principes liés à la révélation des plaques de chromatographie sont fréquemment méconnus. Si le caractère expérimental de ces leçons est indéniable, il n'en reste pas moins que la présentation doit faire apparaître un fil conducteur et un exposé structuré. Les protocoles expérimentaux doivent être analysés et compris.

**Bibliographie**

*Durupthy, Physique Chimie 1ère S : Pour l'historique, le fond de la leçon, les définitions.*  
*JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour le jus de tomates, des généralités, l'indigo, la phénolphtaléine.*  
*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour.*  
*Mesplède, 100 manipulations de chimie (générale) : Pour le sirop de menthe (mélange de colorants) en spectro et en CCM.*  
*Hunt, La chimie de A à Z : Pour l'introduction et de bonnes généralités, colorants diazoïques.*  
*Daumarie, Florilège de chimie pratique : Pour faire la colonne.*

**Introduction**

Omniprésence des colorants et pigments. Colorants alimentaires en E1xx.

**L'origine de la couleur****1.1 - Couleur et absorption**

Lien avec le spectre lumineux, couleurs complémentaires. Notion de synthèse soustractive.

**1.2 - Les molécules à l'origine de la couleur**

Liaisons conjuguées, groupes chromophores et auxochromes.

**Illustration**

Exemples.

**1.3 - Colorants et pigments**

Définitions.

**2 - Étude de substances colorées****2.1 - Colorants dans le sirop de menthe****Expérience**

Identifier les colorants par spectroscopie (diluer 10 fois) et comparer aux produits commerciaux (bleu patenté et tartrazine).

**Illustration**

Expliquer sur les molécules l'origine de la couleur. Repérer les groupes di-azote et parler de colorants di-azoïques.

**Expérience**

CCM du sirop de menthe et des colorants commerciaux. Interpréter la synthèse soustractive à la révélation.

**Illustration**

Interpréter sur les schéma des molécules en fonctions des liaisons H avec la plaque.

## 2.2 - Extraction et identification des colorants dans le jus de tomate

### Expérience

*Extraction, chromatographie sur colonne (A faire en préparation), CCM à la fin avec les trois.*

### Illustration

*Schéma explicatif (montage et molécules).*

## 3 - Utilisation des molécules colorées

### 3.1 - Synthèse d'une teinture pour textiles

#### Expérience

*Synthèse de l'indigo. S'en servir pour teinter un bout de tissu blanc en coton.*

#### Illustration

*Schéma explicatif (montage et molécules).*

### 3.2 - Synthèse d'un indicateur coloré

#### Expérience

*Synthèse de la phénolphtaléine.*

#### Illustration

*Schéma explicatif (montage et molécules).*

## Conclusion

Enjeu industriel et utilisations.

### Avis

*Une leçon haute en couleurs.*

### Remarques

*Réexpliquer le principe des expériences et les précautions à prendre.*

*Origine de la couleur : transition entre niveaux électroniques (délocalisation électronique qui rapproche HO et BV) ou complexe (modèle du champ cristallin).*

*Doubles liaisons cumulées orthogonales donc pas de conjugaison.*

*Plaque de CCM : la phase stationnaire réémet dans le vert et alors que un produit absorbe d'où une tache violette.*

*Si la fréquence d'absorption est diminuée, l'effet est dit bathochrome et l'absorption se déplace alors vers les grandes longueurs d'onde, vers l'infrarouge.*

*Si la fréquence d'absorption est augmentée, l'effet est dit hypsochrome et l'absorption se déplace vers les petites longueurs d'onde, vers l'ultraviolet.*

*Le dichlorométhane est polaire.*

*Le terme soustractif vient du fait qu'un objet coloré soustrait (absorbe) une partie de la lumière incidente.*

*De fait, une couleur obtenue par synthèse soustractive de plusieurs autres sera nécessairement plus sombre qu'elles.*

*Selon qu'on est en phase organique ou aqueuse, une molécule peut-être colorant ou pigment.*

*La distance de migration des produits dépend de leur affinité avec la phase stationnaire et la phase mobile.*

Prérequis : Esters, Titrages , A/B, Redox, CCM, Chimie organique expérimentale.

### Ce que dit le jury...

*Des exemples concrets sont attendus. Les conditions opératoires sont couramment mal maîtrisées. Hydrodistillation et entraînement à la vapeur sont souvent confondus. Les principes liés à la révélation des plaques de chromatographie sont fréquemment méconnus. Si le caractère expérimental de ces leçons est indéniable, il n'en reste pas moins que la présentation doit faire apparaître un fil conducteur et un exposé structuré. Les protocoles expérimentaux doivent être analysés et compris.*

### Bibliographie

*JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour des généralités, l'ester de poire.*  
*Mesplèdes, 100 manipulations de chimie (organique) : Pour la synthèse de l'acide benzoïque, le limonène.*  
*Mesplèdes, 100 manipulations de chimie (générale) : Pour le dosage de l'acide ascorbique (vit C).*  
*Hunt, La chimie de A à Z : Pour les additifs alimentaires.*  
*Durupthy, Physique-chimie 1ère S : Pour des généralités, la synthèse de l'acide benzoïque aussi.*

## Introduction

Les espèces chimiques font partie de notre quotidien. Additifs alimentaires.

## 1 - Conservateurs

### 1.1 - Présentation

Donner la définition d'un conservateur (anti-bactérien E2xx ou anti-oxydant E3xx), prolongent la durée de vie du produit. Les additifs sont utilisés dans les cosmétiques et les médicaments, mais on se limitera aux produits alimentaires.

#### Expérience

*Mise en évidence du rôle conservateur du jus de citron (vitamine C, anti-oxydant), de l'acide benzoïque, et de rien, sur trois quartiers de pomme exposés à l'air. A mettre en route lors de la préparation et à montrer au jury.* *pas de référence*

### 1.2 - Synthèse de l'acide benzoïque

Pour commercialiser un produit, il faut qu'il se conserve assez longtemps.

#### Expérience

*Synthèse de l'acide benzoïque par oxydation de l'alcool avec le permanganate. Présent à l'état naturel dans certains fruits et synthétisé dans l'industrie. Utilisé pour ses propriétés de conservation dans les sodas.*  
*En préparation : faire le chauffage à reflux, la première filtration, verser dans une ampoule à décanter, agiter et dégazer l'ampoule à décanter, laisser reposer.*  
*Devant le jury : faire la cristallisation dans l'eau puis la deuxième filtration. Utiliser les cristaux fait en préparation séchés à l'étuve pour calculer le rendement avec incertitudes.*  
*Caractériser sur banc Köffler. Attention mélanger deux protocoles.*

#### Illustration

*Expliquer ce qu'on a fait en préparation, avec les équations en regard et justifier le protocole (milieu basique car acide benzoïque peu soluble dans l'eau par rapport à sa base).*

### 1.3 - Dosage de l'acide ascorbique

Mais il doit aussi respecter certaines normes.

#### Expérience

*Dosage indirect de la vitamine C dans un jus de citron (On peut aussi doser la vitamine C d'un comprimé vitascorbole.)*

#### Illustration

*Écrire les demi-équations Red-Ox avec diagrammes de prédominance : la réaction d'oxydation, la réaction de dosage.*



## 2 - Arômes

### 2.1 - présentation

Maintenant qu'on conserve l'aliment, donnons lui du goût.

Arôme naturel d'origine végétale ou animale, se synthétise également (reproduit des arômes naturels ou en crée de nouveaux). Intérêt économique d'une extraction ou d'une synthèse : on extrait le limonène mais on synthétise la vanilline (car extrait la vanilline de la vanille coûte très cher). Les deux sont parfois possibles : on extrait l'essence de lavande en parfumerie mais on synthétise un arôme lavande pour les lessives, beaucoup moins cher.

### 2.2 - Extraction du limonène

Dans la peau des oranges, il y a une huile essentielle composée à 95% de limonène.

#### Expérience

*Extraire le limonène de la peau d'orange via un montage par hydrodistillation.*

*En préparation : utiliser uniquement la partie colorée du zeste (prévoir deux oranges), faire l'extraction. Devant le jury : récupérer le distillat presque pur avec une pipette pasteur, introduire phase aqueuse dans une ampoule à décanter, extraire plusieurs fois comme indiqué, sécher avec sulfate de sodium, filtrer. En préparation : évaporer le solvant, CCM (garder les différentes étapes).*

Pas toujours possible d'extraire un arôme (difficulté technique ou coût). Souvent, on le synthétise.

### 2.3 - Synthèse de l'ester de poire

#### Expérience

*Synthèse de l'ester de poire. Qualitatif, synthèse rapide (estérification), identifier la phase aqueuse. Sentir l'odeur de poire/banane (bonus).*

## Conclusion

Importances de la chimie au quotidien, dans l'industrie, mais aussi pour le contrôle des normes.

#### Avis

*Une leçon qui a du goût. Comme souvent si possible lancer les synthèses en double pour montrer une étape en jury et caractériser le produit. L'enrobage de la leçon est à savoir.*

#### Remarques

*Nomenclature (L) et (D), (+) et (-), (R) et (S) n'ont pas de lien si ce n'est la chiralité de la molécule. Attention à la longueur d'onde sur la lampe à UV. Paraben = ester d'acide benzoïques récemment interdits (interfère avec oestrogènes). Pas de gants pour chauffer. Colorants = E1xx. Conservateurs = E2xx (antibactériens) et E3xx (antioxydants). On peut montrer l'évolution d'une tranche de pomme, arrosée ou non de jus de citron. Selon le prix on préfère l'extraction ou la synthèse. Ne pas confondre l'empois d'amidon avec les indicateurs modernes qu'on utilise (iotec par exemple). Il faut extraction, synthèse et dosage. Dans un montage d'hydrodistillation, l'eau et les écorces sont mélangées dans le ballon, le distillat contient alors le produit et de l'eau (diagrammes binaires). Dans un montage d'entraînement à la vapeur d'eau, de l'eau distillée seule est mise dans le premier ballon de gauche, elle s'évapore ensuite pour aller dans le ballon central, où les écorces sont mélangées avec un solvant organique ; On a donc un mélange à trois phases dans le second ballon. Si le solvant organique est convenablement choisi, le distillat ne contient que le produit (le limonène) et de l'eau. Le résultat est donc le même dans les deux cas. Les composés organiques sont donc moins chauffés, et donc moins susceptibles d'être dégradés thermiquement. Seules les vitamines B et C sont solubles. A haute dose, la vitamine C est mauvaise. DJA = dose journalière admissible.*

**Ce que dit le jury...**

*Il ne s'agit pas de faire un TP, mais une leçon où les choix sont justifiés, et faire ressortir une progression. Dans la mesure du possible il est attendu des méthodes modernes de dosage.*

**Bibliographie**

*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour le vinaigre, le sérum physiologique (Mohr), eau de Javel.*

*JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour l'aspirine.*

*Cachau-Herreillat, Des expériences de la famille Acide-Base : Pour la soude, l'aspirine aussi.*

**Introduction**

Intérêt des contrôle des normes, de déterminer la quantité ou la concentration.

**1 - Différents types de Dosage**

Dosage direct : l'espèce A à doser réagit directement avec l'espèce titrante B et le point équivalent est repéré par un indicateur, un saut de pH, un changement de pente en conductimétrie... Les volumes des solutions de A et de B sont les seuls qu'il faut connaître précisément. Un dosage direct doit mettre en jeu une réaction quantitative, rapide, unique et le volume équivalent doit être repérable. Si une de ces conditions n'est pas réalisée, on utilise une méthode indirecte de dosage.

Dosages indirect par production : L'espèce A à doser (pipette) réagit sur B en excès (éprouvette) pour former C et on détermine la quantité de C formé par titrage par une espèce D (burette). Seuls les volumes des solutions de A et de D sont à connaître avec précision. Il sera prudent de vérifier, après exploitation du dosage, que l'espèce B a bien été utilisée en excès.

Dosage indirect par différence : On verse un excès de B (pipette) sur l'espèce A à doser (pipette) et on dose l'excès de B par C (burette) ; dans un tel dosage, on a trois quantités (ou volumes) à connaître précisément (A, B et C).

On va les illustrer sur des exemples concrets, avec des méthodes différentes pour repérer l'équivalence.

**Illustration**

*Transparent récapitulatif / explicatif.*

**2 - Titrage direct par IC : acidité d'un vinaigre****Illustration**

*Présenter le dosage*

**Expérience**

*Dosage colorimétrique de 1mL de vinaigre blanc par la soude à 0,1M avec la phénolphtaléine à la goutte près. Ajouter suivi pH-métrie pour discuter de l'indicateur coloré. Eventuellement suivi pH-métrie en plus.*

**Illustration**

*Discuter précision, choix de l'indicateur coloré. Exploiter le dosage, traiter les incertitudes.*

**3 - Titrage direct par conductimétrie : Soude dans le Destop****Illustration**

*Présenter le dosage*

**Expérience**

*Dosage de la soude dans le Destop par conductimétrie.*

### Illustration

*Interpréter la courbe (ammoniac). Exploiter l'expérience et vérifier la valeur.*

## 4 - Titrage direct par précipitation et IC : sérum physiologique (Mohr)

### Illustration

*Présenter le dosage*

### Expérience

*Dosage de Mohr colorimétrique par précipitation.*

### Illustration

*Vérifier qu'on a la bonne valeur. Evoquer le contrôle qualité et les normes (rappel).*

## 5 - Titrage indirect par production : Eau de Javel par iodométrie

### Illustration

*Présenter le dosage. Justifier pourquoi indirect.*

### Expérience

*Effectuer le dosage iodométrique de l'eau de Javel (chlore).*

### Illustration

*Exploiter le dosage, vérifier le titre.*

## 6 - Titrage indirect par différence : Principe actif d'un cachet d'aspirine par pH-métrie après hydrolyse

### Illustration

*Présenter le dosage. Justifier pourquoi indirect.*

### Expérience

*Effectuer le dosage.*

### Illustration

*Exploiter le dosage.*

## Conclusion

Diversité des méthodes, ouverture sur la spectroscopie.

### Avis

*Bien savoir expliquer les trois types. Un dosage par différence est a priori moins précis qu'un dosage direct ou un dosage par production. Donner le résultat sous forme d'intervalle. Il y a trop, on peut enlever un dosage direct.*

### Remarques

*Le vinaigre d'alcool est obtenu à partir de l'éthanol du vin par oxydation. La partie plate de la courbe de dosage d'un acide faible est caractérisée par le pouvoir tampon. L'idée est d'élaborer le protocole. Justifier l'emploi d'un dosage non-direct. Leçon de synthèse. Le dosage de l'aspirine est intéressant. Formellement, l'acide acétylsalicylique réagit rapidement sur un équivalent de soude par réaction acido-basique et sur un autre équivalent par saponification plus lente. Après refroidissement, on dose la soude en excès au virage de la phénol phtaléine ou du BBT. Directe pas possible car peu soluble. On peut présenter Mohr mais pas Winkler. Un dosage est une détermination d'une quantité de matière ou une concentration par une technique quelconque alors qu'un titrage est une détermination d'une quantité de matière ou une concentration en mettant en jeu une réaction. La mode est à la propagation quadratique des erreurs. Il faut fournir une liste avec le matériel et les produits demandés en début d'épreuve.*

## Ce que dit le jury...

*De la cohérence, du lien. Lier micro et macro sans les identifier. Penser aux interactions inter et intramoléculaires. Evolution dans les colonnes et dans les lignes. Leçon à caractère essentiellement expérimental. Il ne faut pas refaire la structure électronique mais traiter l'évolution des propriétés : analogies et différences. Logiciel possible.*

## Bibliographie

*Gréacias, Chimie PCSI : Pour toute la théorie, le caractère acido-basique des oxydes, et même les expériences de combustion.*

*Durupthy, H-prépa PCSI : En complément du Gréacias.*

*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour le sodium, les AgX.*

*JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour les dihalogènes, les caractères acido-basiques et oxydant-réducteur, un complément sur l'eau de chaux.*

*Cachau-Herreillat, Des expériences de la famille Réd-Ox : Pour les halogènes sur les halogénures, les combustion de Mg/C.*

## Introduction

Historique sur la construction de la classification par Mendeleïev où les éléments sont rangés par masse molaire, en regroupant en colonnes les éléments ayant des propriétés similaires, et surtout en laissant des cases vides pour des éléments non encore découverts mais dont il prédisait l'existence et certaines des propriétés.

## 1 - La classification périodique moderne

### 1.1 - Règle de construction

Expliquer les grandes lignes de la construction.

#### Illustration

*Montrer la classification*

### 1.2 - Périodicité

Expliquer les lignes, les colonnes, les blocs...

#### Illustration

*Préparer un transparent avec la classification en couleurs.*

## 2 - Evolution des propriétés physiques

### 2.1 - Etat physique des dihalogènes

#### Expérience

*Montrer les dihalogènes (évolution colonne).*

Interprétation en termes de polarisabilité, liée à la taille de l'atome, donc au n de la couche externe.

### 2.2 - Energie de première ionisation et affinité électronique

Donner la définition et expliquer l'évolution.

#### Expérience

*Notion de famille : Précipitation des AgX.*

#### Expérience

*Notion de ligne : Na et Mg dans l'eau.*

*référence partielle*

### 2.3 - Electronegativité

Donner les définitions (Mulliken, Pauling). Dire que les deux échelles sont cohérentes.

## Expérience

*Solubilité comparée des AgX (évolution colonne).*

### 3 - Evolution des propriétés chimiques

#### 3.1 - Propriétés acido-basiques

On raisonne sur les oxydes (= métal + oxygène). Faire le lien avec l'électronégativité.

## Expérience

*Evolution ligne (1/2) : Combustion de Mg.*

## Expérience

*Evolution ligne (2/2) : Souffler dans de l'eau de chaux.*

Interpréter avec l'électronégativité.

#### 3.2 - Propriétés oxydo-réductrices

Faire le lien entre électronégativité et pouvoir oxydant.

## Expérience

*Evolution ligne (1/2) : Na dans eau (référence = solubilité des dihalogènes).*

## Expérience

*Evolution ligne (2/2) : Dichlore sur fer (référence = solubilité des dihalogènes).*

## Expérience

*Evolution colonne : Halogénures sur dihalogènes.*

Interpréter avec l'électronégativité.

### Conclusion

Ouvrir à la règle de l'octet, sur le fait qu'ici on a étudié des éléments, mais qu'en pratique on a plutôt des molécules en interactions et que c'est beaucoup plus compliqué.

## Avis

*Les expériences sont particulièrement dangereuses.*

## Remarques

*Il est indispensable lors de cette leçon de parler de configuration électronique pour en arriver à constater que "les propriétés chimiques concernent les électrons de valence". Définir impérativement l'énergie d'ionisation et l'affinité électronique. Présenter des diagrammes en fonction de Z en soulignant la périodicité. L'électronégativité est une notion (ou une grandeur) qui résume les propriétés d'un élément. Règle de l'octet en conclusion. Corps simples à gauche sont réducteurs, à droite sont oxydants.*

*L'évolution des propriétés sur une période : on peut étudier l'évolution de  $Z^*$  perçu par les électrons externes et constater qu'il augmente de 0,65 quand on passe d'un élément au suivant : les électrons externes sont donc de plus en plus fortement liés au reste de l'atome, le rayon atomique diminue et le potentiel de première ionisation augmente.*

*L'évolution dans une famille : quand on descend dans la classification,  $Z^*$  augmente, mais il augmente peu car on compare des éléments de mêmes configurations électroniques externes ; en conséquence, c'est l'augmentation du n externe qui explique l'évolution des propriétés.*

*Savoir justifier par Hund l'évolution anormale de l'énergie de première ionisation de Be à B ou de N à O. Présenter que la classification à 18 colonnes. Les expériences n'illustrent pas seulement des propriétés atomiques mais aussi les associations entre atomes, etc. On peut établir des corrélations entre les échelles micro et macro, mais pas des identifications. Il faut faire arriver les expériences le plus tôt possible. Règles de Slater hors-programme, donc pour les questions. Bien sécuriser les manip comme il faut, tant du point de vue des explosions que des dégagements gazeux toxiques. Plus électronégatif => moins polarisable => moins d'interactions entre molécules. Un oxyde est un composé d'un élément avec l'oxygène. Un oxyde acide/basique est un accepteur/donneur de doublet électronique. Il réagit souvent avec l'eau pour donner un acide/une base de Bronsted.*

*Eau de chaux = ions calcium et hydroxyde, donne du carbonate de calcium en présence de dioxyde de carbone.*

**Ce que dit le jury...**

*Les expériences permettent d'appréhender, de valider ou démontrer les limites de certains modèles, et non pas les illustrer, en s'appuyant sur des exemples concrets rencontrés au laboratoire ou dans l'industrie. L'expérience ne doit pas vérifier des résultats annoncés. Soigner la progression logique. Penser aux interactions inter et intramoléculaires (effets thermiques...). Insister sur l'expérimental. Il faut présenter VSEPR, et Lewis n'est pas exclu. Parler de site réactif, de mésoisomérisation, de charge formelle.*

**Bibliographie**

*Duruthy, H-prépa PCSI : Pour les rappels, historiques et exemples. Pour les OM. En soutien général.*  
*JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour la loi de Biot, acides maléique et fumarique, et liaisons faibles, la carvone, le savon et le poivre.*  
*Mesplède, 100 manipulations de chimie (organique) : Pour eau de brome.*  
*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour les solubilités et l'eau oxygénée.*

**Introduction**

Grande diversité de propriétés des corps. Constituants élémentaires de la matière : une centaine d'atomes. Ne suffit pas à comprendre. Importance de l'agencement dans l'espace : c'est la structure géométrique ; et de leurs interactions : c'est la structure électronique. Il y a une relation microscopique-macroscopique.

**1 - Structure électronique****1.1 - Modèle de Lewis**

Bref rappel et historique, donner quelques exemples dont le monoxyde d'azote et le cyclohexène.

**Expérience**

*Cyclohexane et eau de brome / Cyclohexène et eau de brome*  
*Se placer sous hotte.*

Comme l'eau reste dans une phase à part on peut montrer que ce n'est pas elle qui réagit. Il faut bien secouer pour que le dibrome initialement en phase aqueuse parte en phase organique ou il est bien plus soluble. On déduit le lien réactivité et double liaison. Expliquer avec schéma réactionnel en terme de nucléophilie. Caser ici le maximum de termes chimiques.

**1.2 - Orbitales moléculaires**

On va voir que le modèle de Lewis n'explique pas tout.

**Expérience**

*Diamagnétisme de N<sub>2</sub> et paramagnétisme de O<sub>2</sub>. Refroidir l'aimant aussi.*

*pas de référence*

Montrer qu'il n'y a pas d'électron célibataire d'après Lewis. On explique alors par les orbitales moléculaires.

**Illustration**

*Schéma des OM des deux molécules. Plus électronégatif = plus bas.*

Mais parfois on a besoin de plus que la structure électronique.

**Expérience**

*Déviations par un gradient de champ électrique d'un filet d'eau.*

*pas de référence***2 - Structure géométrique****2.1 - VSEPR**

Bref historique et rappel. Exemples.

Expliquer l'expérience de l'eau à l'aide de l'électronégativité et de la géométrie, qui nous prévoit donc un moment dipolaire pour la molécule d'eau (ne pas faire le calcul).

Discuter la solubilité dans l'eau de CO<sub>2</sub> (rectiligne) et SO<sub>2</sub> (coudée). Loi empirique de like likes like.



## 2.2 - Enantiométrie

Rappel sur la chiralité.

### Expérience

Odeur de la (+) ou (-) Carvone. Utiliser deux tiges de verre et du papier filtre. Analogie avec les chaussures. Illustrer avec des modèles moléculaires.

## 2.3 - Loi de Biot

### Expérience

Vérifier cette loi avec la (+) et (-) carvone pure (petite cuve car c'est cher).

Il faut aller au delà de la géométrie d'une seule molécule et considérer leurs interactions.

## 3 - Interactions intra et inter-moléculaires

Rappeler ODG des énergies des différentes liaisons.

### 3.1 - Liaisons H intramoléculaires

Différence d'acidité. Discuter fonctions et mésomérie.

### Expérience

Dosage des deux acides par la soude.

### 3.2 - Liaisons H intermoléculaires

Différence de température de fusion.

### Expérience

Acide fumarique et maléique sur banc Köfler. Allumer et étalonner en avance. Nettoyer de façon transverse.

### Expérience

CCM avec le nitrobenzène.

### 3.4 - Spécifiques

### Expérience

Molécules amphiphiles, savon et poivre.

### Expérience

Levure de boulanger dismute eau oxygénée. (voir leçon sur les catalyseurs)

*référence partielle*

## Conclusion

Résumer et ouvrir sur l'analyse RMN et le vivant avec les enzymes (clé-serrure).

### Avis

Bien faire ressortir la chimie. Ne pas prévoir les résultats, toujours faire l'expérience en premier !! Cette leçon est longue. Prendre le temps de relire le début du JFLM.

### Remarques

Distinguer charge formelle, charge partielle et degré d'oxydation. Préciser que l'on considère des isomères de configuration lorsque l'on parle d'énantiomères ou de diastéréoisomères. Coeur de la leçon = constater que la représentation que l'on fait d'une espèce chimique permet (parfois mais pas, toujours) de prévoir ses propriétés. On ne déshydrate pas un alcool en milieu basique.

Acide fumarique, acide maléique : Il y a plein de choses à dire ! On peut justifier par la mésomérie à la fois l'acidité et la propension à établir de fortes liaisons hydrogènes. On peut ensuite ajouter l'influence de la forme pour justifier les températures de fusion selon que les liaisons H sont inter ou intra. On peut comparer les constantes d'acidité en considérant l'espèce ampholyte qui, dans le cas de l'acide maléique, est stabilisée par une forte liaison hydrogène intramoléculaire : elle est plus facile à former (premier pKa plus faible) et plus difficile à déprotonner (deuxième pKa plus élevé). On peut effectuer les dosages ou projeter les courbes simulées de dosage pH-métrique.

**Ce que dit le jury...**

On attend des *illustrations*. Ajout de "du modèle à la réalité" dans le titre.

**Bibliographie**

*Gréicias, Chimie PC/PC\** : Pour les calculs des différents types de structures et tout le reste. Pour l'iodure d'argent.

*Duruthy, Chimie PC/PC\** : Pour le modèle et les structures.

*Arnaud, Chimie Générale* : Pour les différents types de structures.

*JFLM, La chimie expérimentale (générale)* : Pour le sel, le refroidissement, les défauts.

*JFLM, La chimie expérimentale (organique)* : Pour la solubilité comparée.

*Taillet, Dictionnaire de physique* : Pour les défauts.

*Duruthy, Chimie des matériaux inorganiques* : Pour les défauts et des ODG.

*Atkins, Chimie Physique* : Pour la constante de Madelung si besoin et du bonus sur les défauts.

**Introduction**

On a vu les cristaux métalliques, on va voir un autre type de solide.

**1 - Le solide ionique****1.1 - Des ions à l'état solide****Expérience**

Conduction quand on met du sel dans l'eau (fondre serait trop long). La vraie démo consiste à le faire fondre, on peut le tenter.

On peut par diffraction de rayons X mettre en évidence des cartes d'isodensité électronique et l'existence d'ions à l'état solide.

**Illustration**

Montrer carte isodensité.

**1.2 - La liaison et le cristal ionique**

Définir la liaison ionique, ionicité et rayon ionique en lien avec l'électronégativité. Présenter les hypothèses du modèle du cristal ionique parfait. Justifier la stabilité (énergie réticulaire). A la limite, contact entre anions et cations dans les sites interstitiels.

**Expérience**

Illustrer énergie réticulaire par refroidissement lors de la dissolution d'une pastille de chlorure d'ammonium. Qualitatif ou quantitatif si possible.

**1.3 - Propriétés des cristaux ioniques**

Donner les propriétés de tels cristaux.

**2 - Différentes structures****Illustration**

A chaque fois : Donner le schéma, montrer modèle, donner coordinance, type de réseau, décrire le contact et les sites interstitiels des cations. Utiliser logiciel VESTA.

**Calcul**

A chaque fois : calculer paramètre de maille et compacité dans le cas du remplissage limite, différence avec l'expérience. Déduire stabilité du réseau selon le paramètre cristallographique.

**2.1 - Type CsCl (8,8)**

## 2.2 - Type NaCl (6,6)

### Expérience

*Pycnométrie. La première étape sert à déterminer le volume du pycnomètre supposant la masse volumique de l'eau connue (tables). La deuxième étape permet de calculer la masse volumique du cyclohexane à cette température. La troisième étape sert à déterminer la masse volumique du sel.* *pas de référence*

## 2.3 - Type ZnS (blende) (4,4)

## 2.4 - Type CaF<sub>2</sub> (fluorine) (8,4)

## 2.5 - Bilan : conditions de cristallisation

### Illustration

*Tableau récapitulatif sur transparent.*

Le cristal choisi la structure la plus compacte car son énergie potentielle est alors la plus faible (Justification par la constante de Madelung non faite).

## 3 - Limites du modèle

### 3.1 - Caractère iono-covalent

On observe un écart aux rayons ioniques, on est pas au remplissage limite. Exemple de CsCl.

### 3.2 - Présence de défauts

#### Expérience

*Billes et défauts.*

Effets de bord. Périodicité brisée. Conséquences possibles sur la conduction et la couleur.

### 3.3 - Solubilité comparée

#### Expérience

*Solubilité des AgX : si la liaison était purement ionique, l'interaction serait d'autant plus forte que X est petit, ce n'est pas le cas. Interpréter en terme de l'ionicité de la liaison et des électronégativités.*

### 3.4 - Cas de l'iodure d'argent alpha

Ne cristallise pas dans la bonne maille.

## Conclusion

Ouvrir sur les cristaux covalents et moléculaires.

### Avis

*Leçon longue, ne pas tomber dans la suite de calculs sans fin qui endort le jury.*

### Remarques

*Répulsion électronique lié au principe de Pauli. Coordinance et stochioemétrie sont inversement proportionnels. Le cristal réel est plus stable car son entropie est plus grande. La solubilité est liée à la polarité des liaisons. La température de fusion indique la stabilité. Le pycnomètre est une très bonne idée. Les défauts métalliques donnent les propriétés (ductilité...). On peut illustrer les 4 types de solides (ionique, métallique, covalent, moléculaire). Idée forte : importance de la taille des ions. Deux cubiques ne font pas un cubique centré. Montrer que la dissolution de certains cristaux dans une solution aqueuse augmente la conductivité de cette dernière est une bonne idée. Ne pas confondre masse volumique et densité. On suppose tout le long un contact anionique. Un objectif important de cette leçon est de mettre en place une relation entre le rapport des rayons ioniques et le type de structure adopté par les cristaux de stochiométrie 1-1. Le cas d'une coordinance 6-6 ou de CaF<sub>2</sub> peut montrer qu'il y a plusieurs façons de décrire un réseau. Condition de cristallisation incontournable. Passage au réel avec les limites du modèle. Utiliser le terme de iono-covalent. Utiliser logiciel et modèles moléculaires. il faut traiter les types CsCl, NaCl, blende et CaF<sub>2</sub>. La neutralité électrique interdit une coordinance de 12.*

**Ce que dit le jury...**

Présenter les *propriétés* des métaux. Illustrer avec des *modèles* moléculaires.

**Bibliographie**

*Gréacias, Chimie PC/PC\** : Pour les propriétés, les définitions. Pour tout.

*Duruthy, Chimie PC/PC\** : Pour les alliages. Pour un peu tout.

*Arnaud, Chimie Générale* : Pour le tableau des réseaux de bravais et celui des sites interstitiels.

*JFLM, La chimie expérimentale (organique)* : Pour l'empilement et l'allotropie du fer.

*Rédoglia, Les mille et une questions de la chimie en prépa PC/PC\** : Pour les exemples d'alliages, le stockage du dihydrogène et pour les ODG.

*Martin-Christol, BUP 623 - Présentation de structures compactes des métaux* : Pour l'intro, la liaison, et surtout les alliages.

*Taillet, Dictionnaire de physique* : Pour les alliages.

**Introduction**

Importance historique (noms de certains âges) et industrielle. Opposer état amorphe et état cristallin. Métaux = 80% des éléments du tableau périodique.

**1 - Cohésion métallique****1.1 - Propriétés des métaux**

Lister les propriétés physiques (mécaniques, optiques, électriques) et chimiques (réducteurs, ionisables). Donner des ODG.

**1.2 - Liaison métallique**

Expliquer la délocalisation des électrons de conduction. Donner ODG.

**2 - Structure des métaux****2.1 - Modèle du cristal parfait**

Donner les hypothèses du modèle.

Définir le rayon métallique. Définir maille, motif, réseau, compacité, masse volumique coordinance, paramètre de maille, multiplicité.

**Illustration**

Projeter le tableau des 7 systèmes et des 14 réseaux de bravais.

Ne pas oublier le schéma qui donne les axes.

Evoquer les indices de Miller pour définir un plan et la DRX.

**2.2 - Structures compactes****Calcul**

Exposer en détail les structures CFC et HC. En faire une sur transparent.

**Illustration**

Schéma sur transparents des réseaux et des coupes utiles. Utiliser logiciel VESTA.

**Expérience**

Modèles moléculaires en polystyrène à empiler. Logiciel en parallèle si possible.

**2.3 - Structures pseudo-compactes****Calcul**

Exposer CC sur transparent.

## Illustration

*Schéma sur transparents des réseaux et des coupes utiles. Utiliser logiciel VESTA.*

## 2.4 - Variétés allotropiques

Présenter la notion d'allotropie.

## Expérience

*Expérience de recalescence fer  $\alpha$  et fer  $\gamma$ .*

## Calcul

*Explication rapide par le calcul.*

## 3 - Alliages

### 3.1 - Intérêt des alliages

Donner des exemples (aéronautique).

### 3.2 - Sites interstitiels

## Calcul

*Calcul des sites interstitiels pour le CFC. Transparent pour HC et CC.*

## Illustration

*Tableau récapitulatif des sites interstitiels.*

### 3.3 - Solutions solides d'insertion

Donner des exemples et leurs intérêts.

### 3.4 - Stockage de dihydrogène.

## Calcul

*Application faite en exercice.*

Illustrer l'intérêt pratique. Flatter le chimiste.

## Conclusion

Ouvrir sur les autres types de défauts, limites du modèle du cristal parfait.

## Avis

*Leçon peu originale, longue, et donc assez difficile.*

*Les ODG ne sont pas simples à trouver.*

*Si besoin prendre handbook.*

## Remarques

*Considérer comme une première leçon de cristallographie.*

*Expliquer la cohésion et la liaison métallique.*

*On peut définir le motif comme le plus petit ensemble matériel dont la répétition engendre le cristal.*

*Il n'existe pas de réseau HC. Fer  $\alpha$  en CC et fer  $\gamma$  en CFC.*

*Distinguer les solutions solides de substitution et d'insertion.*

*Il faut faire le calcul de la compacité d'un réseau HC. Les autres calculs peuvent être plus rapides.*

*On trouve la séquence ABAC dans le lanthane par exemple et la séquence ABACACBCB dans le samarium.*

*C'est l'enthalpie standard de sublimation qui rend le mieux compte de la cohésion dans les cristaux métalliques.*

*Progression 1D/2D/3D possible.*

*Evoquer le dopage (ppm).*

*L'environnement des atomes n'est pas sphérique, d'où une limite du modèle.*

*On peut expliquer les propriétés mécaniques en terme de déplacement de plans réticulaires.*

*Faire un tableau récapitulatif est une idée.*

**Ce que dit le jury...**

*Illustrations expérimentales possibles. Attention aux confusions entre les différentes grandeurs. Une mesure calorimétrique et un bilan enthalpique soignés sont attendus. La détermination d'une température de flamme est à considérer. Il faut de la rigueur. Articulé autour de la mesure et des applications. Ne pas confondre chaleur et chaleur de réaction.*

**Bibliographie**

*Durupthy, H-prépa PCSI : Pour les notations, la calorimétrie, la fusée (cours + exo).*

*Gréacias, Chimie PCSI : Pour le rappel des notation (formulaire).*

*Atkin, Chimie physique : Pour l'ATP et la photosynthèse.*

*Rédoglia, Les mille et une questions de la chimie en prépa PCSI : Pour la température de flamme d'un chalumeau.*

*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour les expériences.*

**Introduction**

On a déjà remarqué que certaines réactions étaient exo ou endothermiques. On va utiliser les concepts développés en thermochimie pour étudier l'enthalpie de réaction qui est liée à la chaleur dissipée, et en voir différentes applications. Utiliser l'énergie des réactions chimiques.

**Expérience**

*Dissolution d'une pastille de soude ou de chlorure d'ammonium.*

Donner des ODG.

**1 - Bilan enthalpique****1.1 - Rappel théoriques**

Rappeler les notations pour ne pas avoir une super mauvaise note. Interpréter les terme de variation d'énergie. Se placer dans l'approximation d'Ellingham, et considérer les états standard. Rappeler aussi l'évolution de l'enthalpie d'un système (fonction d'état, chemin fictif et réel) ainsi que la loi de Hess.

**1.2 - Vase Dewar**

Présenter et expliquer son intérêt en terme de lutte contre les trois types de transfert thermiques.

**Calcul**

*Aboutir au fait que la variation d'enthalpie est nulle car c'est un réacteur monobare.*

**Expérience**

*Mesurer la masse équivalente en eau (en préparation) et donner ici le résultat après avoir expliqué la démarche.*

**2 - Mesure calorimétrique****2.1 - Enthalpie de changement d'état****Expérience**

*Mesurer l'enthalpie de fusion de l'eau et du cyclohexane. Interpréter en terme de liaison H.*

**Calcul**

*Exploiter l'expérience.*

Dire un mot sur la transpiration.

**2.2 - Chaleur de réaction****Expérience**

*Mesurer l'enthalpie de réaction d'une réaction acido-basique.*



## Calcul

*Exploiter l'expérience.*

### 3 - Applications

#### 3.1 - Dosage calorimétrique

## Calcul

*Exploiter l'expérience précédente en terme de dosage.*

#### 3.2 - Rendement d'une pile

## Expérience

*Mesure pour une réaction redox. La pile s'échauffe par effet joule et aussi par augmentation d'entropie.*

## Calcul

*Exploiter l'expérience. Interpréter les différent termes (G, H, TS).*

#### 3.3 - Température de flamme

La définir et présenter son intérêt pour une fusée. Importance technologique. Permet de prévoir les risques. Calculer en tenant compte de la loi de Kirchhoff.

En récupérant cette énergie, on peut se chauffer par exemple. On peut convertir l'énergie chimique en d'autres forme : cinétique, thermique, électrique...

## Calcul

*Exercice du chalumeau et exercice de la fusée.*

#### 3.4 - Biochimie

Exemple de l'ATP.

#### 3.5 - Photosynthèse

Energie des plantes.

### Conclusion

Aspect très transversal de la notion d'enthalpie de réaction qui a de nombreuses applications allant de l'industrie à la biologie.

## Avis

*Leçon difficile de par les notations à ne pas confondre. Prendre le temps de les relire avant la leçon. A mon avis trop longue pour tout faire en direct.*

## Remarques

*Ne pas écrire que la somme des chaleurs est nulle, préférer un bilan sur U ou H fonction d'état. L'enthalpie standard de réaction dépend de la température. Utiliser la loi de Kirchhoff. Présenter un bilan calorimétrique correct dans lequel l'avancement et le signe sont interprétés. Ne pas confondre le bilan enthalpique de la transformation et la relation de Kirschhoff. Mesurer les deux températures initiales et s'arranger pour qu'elles soient égales à la température ambiante. On utilise un chemin fictif correspondant à la transformation chimique effectuée à la température initiale suivie d'une élévation de température du système après réaction. C'est donc la capacité thermique du système après réaction qui est utilisée et c'est l'enthalpie de réaction à la température initiale qui est déterminée. S'intéresser aux incertitudes et comparer à la valeur tabulée. La différence constatée s'explique par des incertitudes expérimentales mais pas seulement. On détermine les valeurs des enthalpies de réaction à température ambiante alors qu'elles sont données à 298 K (on peut utiliser Kirschhoff pour une comparaison plus adaptée). De plus, on travaille souvent avec des solutions concentrées : ce n'est pas l'enthalpie de réaction standard. Il faut impérativement mentionner la production d'électricité par des centrales thermique brûlant du gaz, du pétrole ou du charbon, comme le chauffage domestique, la cuisson des aliments, les moteurs thermiques, le moteur  $H_2/O_2$  de la fusée Ariane, les chalumeaux (la température atteinte étant proche de la température de flamme adiabatique). Dans le fonctionnement réversible d'un générateur,  $\Delta G$  est le travail électrique récupérable,  $\Delta H$  est l'énergie libérable par le système, et  $T\Delta S$  correspond au transfert thermique. Ne pas oublier le cycle photosynthèse-combustion..*

Prérequis : Dosages, A/B, Redox, Equilibres en solution aqueuses, Complexes (théorie).

## Ce que dit le jury...

*Aspects expérimentaux variés, tant qualitatifs que quantitatifs, avec une cohérence. Ne pas faire trop de calculs. Bien comprendre ce qu'on fait (ex : dureté de l'eau). Mieux faire ressortir le lien entre les constantes thermodynamiques relatives aux espèces et les applications les mettant en jeu. Evoquer les diagrammes de prédominance. Ne pas s'éterniser sur les définitions.*

## Bibliographie

*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour la méthode de Job expérience, les complexes du nickel, la dureté de l'eau, le testeur d'humidité.*

*Mesplède, 100 manipulations de chimie (générale) : Pour un autre vision de la stoechiométrie, l'ajout de l'EDTA, la norme de dureté de l'eau.*

*Daumarie, Florilège de chimie pratique : Pour la méthode de Job (théorie plus détaillée).*

*Vignes, BUP 867 - Danger : monoxyde de carbone : Pour la partie biologie.*

*Gréacias, Chimie PCSI : Pour l'influence sur d'autres réactions.*

*Rédoglia, Les mille et une questions de la chimie en prépa PCSI : Pour la séparation de l'or, et un complément sur la dureté de l'eau.*

*Hunt, La chimie de A à Z : Pour un mot sur l'hémoglobine.*

## Introduction

On a déjà vu rédox et acide-base. Complexation : met en jeu un autre type de particules échangées.

## 1 - Caractérisation des réactions de complexation

### 1.1 - Stoechiométrie d'un complexe - Méthode de Job

#### Expérience

*Mettre en évidence le complexe dans un tube à essai. Couleur rouge caractéristique.*

*Déterminer sa stoechiométrie par la méthode de Job. Donner une estimation de la constante de réaction.*

#### Illustration

*Toujours présenter un transparent avec le schéma de l'expérience.*

Conclure avec le diagramme de prédominance en pFe et en pSCN.

### 1.2 - Complexations successives

#### Expérience

*Complexes successives du nickel.*

#### Illustration

*Donner diagramme de prédominance en pNH<sub>3</sub>.*

### 1.3 - Complexations compétitives

On peut détruire le complexe par l'ajout d'un meilleur ligand.

#### Expérience

*Ajout de l'EDTA pour détruire le complexe.*

#### Illustration

*Diagramme de prédominance en pFe pour expliquer la réaction avec les domaines disjoints (des cases au dessus, des cases en dessous).*

### 1.4 - Influence sur d'autres réactions

Remarquer que l'on peut ainsi déplacer des équilibres acido-basiques ou redox par la complexation. C'est un cas de compétition plus large. Exemple à recopier.

## 2 - Dosage par complexation : Dureté de l'eau

### 2.1 - Principe

#### Illustration

*Présenter le schéma de l'expérience.*

Expliquer le principe du dosage. Notion de contrôle qualité, donner la norme. Bien expliquer tout.

### 2.2 - Dosage des ions magnésium et calcium

#### Expérience

*Effectuer le titrage. Discuter la dureté de l'eau.*

### 2.3 - Dosage des ions calcium seuls

#### Expérience

*Effectuer le titrage.*

#### Illustration

*Diagramme de prédominance en  $pFe$  pour expliquer la réaction avec les domaines disjoints (des cases au dessus, des cases en dessous).*

## 3 - Applications

### 3.1 - Testeur d'humidité

#### Expérience

*Testeur d'humidité.*

#### Illustration

*Expliquer sur transparent.*

### 3.2 - Séparation de métaux

Extraction de l'or (exo corrigé). Expliquer l'intérêt pour le passage d'une phase à l'autre. A faire sur transparent si manque de temps.

### 3.3 - Biologie

Expliquer le problème du monoxyde de carbone. Essayer de détailler : cause, conséquences, remèdes...

#### Illustration

*Schéma sur transparents.*

## Conclusion

Importance pour le traitement des déchets nucléaire, possibilité de séparer les métaux radioactifs. Ouvrir sur les catalyseurs.

#### Avis

*Leçon reprise en grande partie sur Etienne, et qui a l'air vraiment bonne.*

#### Remarques

*EDTA = ion éthylène diamine tétra-acétate, à utiliser en milieu tampon ammoniacal pour un  $pH > 9$ , forme de ligand hexadentate  $Y^{4-}$ . Il est dangereux, porter des gants. Un complexe n'est pas nécessairement en solution aqueuse. Raisonner sur des diagrammes en  $pL$  ou  $pM$ . Déterminer la stoechiométrie et la constante de stabilité d'un complexe est bien. On néglige certaines espèces et l'on confond concentration et activité, ne pas oublier, être modeste. Historiquement, le terme complexe provient du fait que les composés concernés semblaient défier les règles habituelles de valence. La définition de complexe peut ne pas se limiter à un cation métallique central. Une des applications importantes est la séparation de cations métalliques. On peut la citer et indiquer son utilisation dans le traitement de certains déchets radioactifs. Le rôle des complexes en biologie ne doit pas être oublié. Attention, pour le dosage des ions calcium seul, il faut utiliser le Patton-Reeder comme indicateur coloré et plus le NET dilué dans NaCl. Ne pas confondre  $K_{fn}$  et  $\beta_n$ . Une eau dure cause du tartre et rince mal le savon.*

## Ce que dit le jury...

Les expériences doivent s'articuler dans une *progression de savoirs et de savoir-faire à acquérir à un niveau donné. Aspects expérimentaux variés, tant qualitatifs que quantitatifs, tout en conservant une cohérence d'ensemble.*

## Bibliographie

*Gréacias, Chimie PCSI : Pour les rappels des définitions, la précipitation de AgCl, l'exploitation du suivi potentiométrique de la méthode de Mohr.*

*Durupthy, H-prépa PCSI : Pour un complément sur le dosage de Mohr.*

*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour la pluie d'or avec complément sur la recristallisation, le dosage de Mohr, de l'eau minérale.*

*JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour la solubilité des AgX.*

*Rédoglia, Les mille et une questions de la chimie en prépa PCSI : Pour la chimie dentaire.*

*Mesplède, 100 manipulations de chimie (générale) : Pour la séparation de Fe et Mg.*

*Cachau-Herreillat, Des expériences de la famille Red-Ox : Pour les tests d'ions.*

*Hunt, La chimie de A à Z : Pour les tests d'ions.*

## Introduction

Il y a une limite à la mise en solution d'un solide, c'est la solubilité.

## 1 - Caractérisation des réactions de précipitation

### 1.1 - Définitions

Rappeler ce qu'est la solubilité.

Définir solution saturée et non saturée. Produit de solubilité.

Exemple sur un diagramme d'existence de AgCl.

#### Expérience

*Précipitation de AgCl.*

### 1.2 - Facteurs influençant la solubilité

Exposer les différents facteurs : température, effet d'ion commun, compétition.

#### Illustration

*Faire un transparents pour les expériences.*

#### Expérience

*Effet de la température : pluie d'or (= recristallisation, mais place dans cette leçon sujet à débat. Préparer réponses au cas où).*

#### Expérience

*Effet d'ion commun : Ajout de HCl dans NaCl saturé.*

*pas de référence*

#### Expérience

*Effet de la compétition : Reprendre l'expérience de la solubilité comparée des AgX sous un autre angle (compétition avec complexation).*

## 2 - Dosage par précipitation

### 2.1 - Dosage des ions chlorure dans le sérum physiologique (Mohr)

#### Expérience

*Effectuer le dosage de Mohr. Attention explication non triviale. Ajouter suivi potentiométrique.*

*référence partielle*

## Illustration

*Expliquer sur transparent (5 gouttes de chromate = 0,2 mL d'erreur).*

## Calcul

*Remonter à une estimation de  $K_s$ .*

## 2.2 - Dosage sélectif

### Expérience

*Dosage des seuls ions calcium d'une eau minérale. [Pas indispensable si manque de temps]*

Bien expliqué pourquoi il n'y a plus d'ions magnésium en solution.

## 3 - Applications

### 3.1 - Tests caractéristiques d'ions

#### Expérience

*Montrer quelques tests en tube à essai et évoquer ceux effectués avant.*

### 3.2 - Recristallisation

En parler rapidement à partir de la pluie d'or.

### 3.3 - Chimie dentaire

#### Illustration

*Illustration de l'intérêt du fluor dans les dentifrices.*

### 3.4 - Séparation de métaux

#### Expérience

*Séparation et caractérisation des ions Fe et Mn. Toujours avec diagramme d'existence.*

## Conclusion

L'équilibre hétérogène permet de séparer efficacement des constituants. Importance dans l'industrie des métaux (lixiviation de l'hydrométallurgie du zinc).

#### Avis

*Leçon reprise en grande partie sur Etienne, et qui a l'air vraiment bonne, mais sûrement trop longue.*

#### Remarques

*On ne compare pas les  $K$  en général mais la solubilité, on fait un diagramme de prédominance en  $pX$  ou  $pK_s$  (variables à concentration fixée). Précipitation = autre phase solide. On peut parler de recristallisation. Si c'est trouble, ce n'est pas homogène. Éviter la chimie formelle. Effet d'ions commun à illustrer. Applications : traitement de l'eau, protection d'objets d'art. La spectrophotométrie est évidemment à exclure, le reste est ok. Définir solubilité, solution saturée.. Influence de la température. Ne pas oublier les incertitudes.*

*Dosage DIRECT : une réaction.*

*Dosage INDIRECT (p73 JFLM1) : le titrant consommé est titré par un nouveau titrant. Il reste dans le bécher : l'excès de titrant initial, le produit du titré (indirectement) et le produit du titrant titré. L'excès est inconnu. La quantité de titré est reliée par les coefficients stchiométriques des réactions et les concentrations à la quantité de produit titrant titré.*

*Dosage EN RETOUR ou PAR EXCÈS (p81 JFLM1) : l'excès de titrant est titré par un nouveau titrant. Il reste ainsi dans le bécher : le produit du titré, le produit du titrant (incluant l'excès), et le produit du second titrant. Tout est connu. La quantité de titré est reliée par les coefficients stchiométriques des réactions et les concentrations à la quantité de réactif titrant introduit otée de la quantité de réactif titrant excédentaire titré.*

**Ce que dit le jury...**

*Courbes intensité-potentiel. Aspects expérimentaux les plus variés, tant qualitatifs que quantitatifs, tout en conservant une cohérence d'ensemble. Réfléchir à la limite de validité et la précision des méthodes utilisées. Bien distinguer la  $ddp$  mesurée et le potentiel de la solution.*

**Bibliographie**

*Durupthy, H-prépa PCSI : Pour toute la théorie, y compris dosage général.*

*Gréacias, Chimie PCSI : Pour les électrodes, dosage cérimétrique.*

*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour le dosage argentimétrique, avec bonus sur l'ECS.*

*JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour le dosage cérimétrique.*

**Introduction**

Parfois on n'a pas de bon indicateur coloré pour déterminer l'équivalence.

On connaît le pH, qui n'est qu'un cas particulier de ce qui va suivre.

**1 - Principe des dosages potentiométriques****1.1 - Choix de la réaction de dosage**

Rappeler les caractéristiques d'une réaction de dosage. On a vu qu'on pouvait doser par suivi de pH, ici on va généraliser : on peut suivre par potentiométrie.

**1.2 - Relation de Nernst****Calcul**

*Démontrer la relation de Nernst à partir de la variation de G.*

**1.3 - Mesure d'une différence de potentiel**

Présenter le principe : électrode de référence + électrode de mesure du potentiel de la solution.

Interpréter en terme de demi-pile, pile et tension à vide.

**Illustration**

*Présenter les trois types d'électrodes ainsi que les références primaire (ESH) et secondaire (ECS).*

Evoquer le problème des ions argents avec l'ECS et la solution.

**2 - Dosage cérimétrique (Fe, Sel de Mohr)****2.1 - Principe**

Présenter le dosage. Milieu acide pour éviter les précipitations.

**2.2 - Mesure de la concentration****Expérience**

*Faire le dosage.*

**Calcul**

*Déduire concentration.*

**2.3 - Mesure de potentiel standard****Calcul**

*Déduire potentiel standard. Attention résultat décalé à cause de la complexation.*



## 3 - Dosage argentimétrique (Cl, Sérum physiologique)

### 3.1 - Principe

Contrôle qualité.

### 3.2 - Respect de la norme.

#### Expérience

*Faire le dosage.*

#### Calcul

*Déduire concentration.*

Comparer à la valeur attendue (0,154 M)

### 3.3 - Constantes thermodynamiques

#### Calcul

*Déduire le potentiel standard et le produit de solubilité.*

## Conclusion

On peut mesurer des grandeurs thermodynamiques.

#### Avis

*Je n'aime pas trop cette leçon. Elle n'est pas très simple, les dosages ont beaucoup de subtilités.*

#### Remarques

*Tous les couples Redox sont en équilibre au même potentiel.*

*Bien connaître les électrodes et les courbes I-E.*

*Un complexe de sulfate de fer peut se former pendant la cériométrie.*

*On doit voir la réalisation et l'exploitation complète d'un dosage potentiométrique d'oxydoréduction (ces deux termes étant à définir) et d'un autre dosage potentiométrique mettant en jeu une réaction de précipitation ou une réaction de complexation.*

*On fabrique une pile qui ne débite presque pas pendant le dosage.*

*Analyser la courbe et l'exploiter à fond après le dosage.*

*On mesure le potentiel commun des deux couples, imposé par celui qui est majoritaire.*

*L'ordonnée de l'équivalence n'est pas une mesure précise, donc à ne pas utiliser.*

*Dosage de  $Fe^{3+}$  par l'EDTA difficile à comprendre, attention.*

*Le platine est en général rapide (sauf manganimétrie) et inattaquable.*

*A  $V=0$ , on a un couple mixte.*

*Le potentiel à l'équivalence n'est pas stable si le fer en solution est oxydé par l'air.*

*Pour avoir unicité de la RP, on place toujours le permanganate dans la burette.*

*Le pH n'est qu'un potentiel d'un couple particulier. Ne pas oublier les incertitudes, on peut être précis sur un dosage.*

*Pour être valable, la relation de Nernst ne s'applique qu'à des systèmes en équilibre chimique, c'est-à-dire des systèmes où oxydation et réduction se produisent simultanément à la même vitesse.*

*ESH impossible car état standard d'un ion = fictif. le potentiel au proche voisinage de l'équivalence n'est pas défini si les deux systèmes sont rapides, ce potentiel est imposé par les impuretés présentes dans le milieu. KI et  $AgNO_3$  sont très chers (0.01M max).*

*On mesure la fem à vide de la pile. Argent car conducteur.*

*Ecrire les demi-équations.*

*Pont salin : même mobilité, minimisation du potentiel de jonction, inerte chimiquement.*

*Sel de Mohr =  $FeSO_4 + MnSO_4$ .*

*Cation métallique en solution aqueuse => pH acide. Point anguleux = apparition d'un précipité. Ne pas s'attarder sur les électrodes. Electrode = demi-pile.*

*Attention, ajouter une allonge en nitrate de potassium à l'ECS si la solution contient des ions argent, afin d'éviter de former  $AgCl$  et casser l'électrode.*

*Potentiel standard = état fictif à 1M et dilution infinie.*

**Ce que dit le jury...**

*Les exemples doivent être probants. Le lien entre l'étude expérimentale des facteurs cinétiques et les mécanismes réactionnels doit être clair, au moins pour une expérience.*

**Bibliographie**

*GréCIAS, Chimie PCSI : Pour les rappels, les méthodes, les exploitations.*

*Daumarie, Florilège de chimie pratique : Pour l'hydrolyse du chlorure de tertiobutyle.*

*Mesplède, 100 manipulations de chimie (générale) : Pour le diiode et les ions peroxodisulfate, la catalyse, l'hydrolyse du chlorure de tertiobutyle.*

*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour la catalyse en détails.*

*Durupthy, H-prépa PCSI : Pour les rappels.*

**Introduction**

On a déjà vu cinétique qualitative et formelle.

Suivi expérimental quantitatif?

**1 - Suivi cinétique****1.1 - Rappels**

Préciser les hypothèses d'étude.

Rappeler les définitions (Vitesse, ordres, Loi d'Arrhénius, facteurs influents).

**1.2 - Méthodes de suivi****Illustration**

*Méthodes chimiques (trempage, destructif, ponctuel...) et physiques (spectrométrie, non destructif, en direct) : exemples, avantages, inconvénients.*

**2 - Etude expérimentale****2.1 - Suivi cinétique**

On choisit la spectrophotométrie.

**Expérience**

*Réaction entre le diiode et les ions peroxodisulfate.*

**2.2 - Détermination d'une loi de vitesse**

Expliquer les différentes méthodes possibles.

Expliquer la dégénérescence de l'ordre sur l'expérience précédente.

**Illustration**

*Montrer exploitation avec méthode différentielle et intégrale (marche/ne marche pas).*

*Simplement mentionner les autres.*

**Calcul**

*En déduire l'ordre partiel par rapport aux ions peroxodisulfate.*

**Expérience**

*Même expérience en proportions stoechiométriques.*

*pas de référence*

**Calcul**

*En déduire l'ordre global.*

On a la loi de vitesse complète.

## 3 - Influence de la température

### 3.1 - Présentation de l'expérience

#### Expérience

*Hydrolyse du chlorure de tertiobutyle, attention au calibre du voltmètre.*

*Utiliser bain thermostaté.*

*Faire quatre températures. Inutile de mettre deux solvants.*

#### Illustration

*Schéma de l'expérience.*

### 3.2 - Energie d'activation

#### Calcul

*Remonter en plusieurs étapes à l'énergie d'activation en exploitant l'expérience.*

## 4 - Catalyse

#### Expérience

*Ions tartrates (excès) et eau oxygénée.*

*Temps d'activation au chrono.*

*Possibilité d'illustrer une trempe.*

#### Illustration

*Schéma expérience + explication des couleurs.*

#### Calcul

*Essayer de retrouver la dépendance annoncé dans le livre, sinon discuter.*

## Conclusion

Dire que le solvant a aussi une influence.

Ouvrir sur les mécanismes réactionnels et le rendement horaire.

#### Avis

*Il faut penser à lancer les expériences dès le début de la leçon.*

*Attention au calibre du conductimètre.*

*Faire les expériences thermostatées en parallèle pour optimiser le temps.*

*Ne reprendre qu'un point à chaque fois bien sûr.*

#### Remarques

*Conductimètre à environ 1kHz.*

*Coordonnées réactionnelles = pour une molécule = abscisse curviligne des distances et angles intermoléculaires.*

*Parler de l'influence de la température avant de donner la loi d'Arrénus.*

*Dire que  $V=Cte$ .*

*Il faut présenter trois manipulations quantitatives.*

*La spectrophotométrie est incontournable dans cette leçon car il s'agit de la méthode la plus utilisée, et de loin, par les cinéticiens professionnels.*

*Les notions de mécanisme, de réactions élémentaires, AEQS, AECD n'ont pas encore été vues et sont hors sujet.*

*Il faut contrôler la température.*

*Le coefficient de corrélation est un critère moins fiable que la méthode graphique.*

*Ostwald est systématiquement utilisée.*

*On peut aborder la catalyse.*

*Attention, seule une réaction possédant un ordre peut se voir définir une énergie d'activation.*

Prérequis : Cinétique. Conductimétrie. Bases de chimie organique.

### Ce que dit le jury...

*Précision du vocabulaire. Les logiciels de simulation sont trop peu utilisés. Connecter à la réalité les expériences et les calculs. Mettre du lien.*

### Bibliographie

*Durupthy, H-prépa PCSI : Pour les définitions, la démarche générale, les approximations, l'oxydation de NO (chapitre complet avec le même titre).*

*Gréacias, Chimie PCSI - Méthodes et Annales : Pour compléter le H-prépa, pour NO et l'ozone.*

*Gréacias, Chimie PCSI : Pour compléter le H-prépa si besoin.*

*Daumarie, Florilège de chimie pratique : Pour l'hydrolyse de tBuCl avec mécanisme.*

*Blanchard, chimie organique expérimentale : Pour le mécanisme de 3 étapes de tBuCl.*

*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour le sel de Seignette.*

## Introduction

L'objectif du chimiste est de connaître le déroulement microscopique d'une réaction notamment dans le but de savoir la reproduire sur des espèces voisines et dans le but de choisir des conditions expérimentales optimales pour cette réaction. Il doit donc comprendre le déroulement microscopique de la réaction.

### Expérience

*Expérience sel de Seignette*

Ecrire la réaction et dire que ça ne modélise pas la réalité.

## 1 - Acte élémentaire

### 1.1 - Définition

Donner la définition, dire que ça modélise ce qui se passe en vrai.

Préciser les hypothèses.

### 1.2 - Théorie des collisions

Donner la loi de Vant' Hoff.

Expliquer par la théorie des chocs efficaces (fréquence, géométrie, énergie).

### 1.3 - Un mot sur la théorie du complexe activé

Surface de réaction.

Chemin réactionnel, coordonnée de réaction, profil réactionnel.

État de transition, énergie d'activation.

Lien avec la loi d'Arrhénius.

### Illustration

*Illustrer sur un exemple le profil d'énergie.*

*Préciser que c'est microscopique.*

## 2 - Modélisation d'un mécanisme réactionnel

### 2.1 - Problématique

Expliquer la démarche expérimentale générale.

### 2.2 - Proposition d'un mécanisme

### Expérience

*Logiciel CINEWIN.*

*Définir les approximations : AECD et AEQS selon les valeurs de  $k_1$  et  $k_2$  dans un cas simple.*

Dire qu'avec d'autres indices, on suppose le mécanisme.

## Illustration

Mécanisme (attention référence différente pour les 3 étapes).  
Diagramme énergétique.

## Calcul

Discuter les approximations dans notre cas : AECD et AEQS.  
En déduire la loi de vitesse.

*référence partielle*

## 2.3 - Vérification expérimentale

On va vérifier expérimentalement la loi de vitesse obtenue.

## Expérience

Hydrolyse de tBuCl.

## Calcul

Remonter à l'ordre et à la constante de vitesse.

# 3 - Différents types de mécanismes réactionnels

## 3.1 - Mécanisme par stade

Définition et exemple l'oxydation de NO (exo) en plus de la réaction avec tBuCl.

## 3.2 - Mécanisme en chaîne

Exemple CFC et Ozone.

## 3.3 - Action d'un catalyseur

Revenir sur l'expérience d'introduction et définir proprement un catalyseur.

Ecrire les deux équations mécanistiques.

# Conclusion

Ouvrir sur la rationalisation de la chimie organique.

## Avis

*Pas de grande difficultés si ce n'est de bien gérer la biblio, ainsi que la longueur de la leçon.*

## Remarques

*Il serait cependant dommage de limiter cette leçon à son seul aspect cinétique. Les informations sont d'ordre cinétique, spectroscopique, ou stéréochimique, elles sont relatives à la nature des intermédiaires (radicaux, carbocations...), à d'éventuels effets isotopiques, à l'influence du solvant, à l'influence des substituants via leurs effets électroniques ou leur encombrement, à la nature d'un éventuel catalyseur. Bref, de longues années de travail.*

*Le chemin suivi est le plus probable (Boltzmann). On peut distinguer l'activation thermique et l'activation photochimique. Intermédiaire réactionnel (vie plus ou moins courte) et état de transition (hypothétique) sont différents. Chemin réactionnel, énergie d'activation, CR, ET, IR, ECD, acte élémentaire... sont des notions à définir. Donner AEQS et AECD avec les profils adaptés. Les approximations sont nécessaires pour avoir accès à la loi de vitesse à partir du mécanisme.*

*Deux grands types de réactions complexes : les réactions par stade (séquence ouverte) et les réactions en chaîne (séquence fermée). Le choix d'un mécanisme se fait en accord avec le principe de microréversibilité macroscopique et le principe de moindre changement de structure. Décrire un mécanisme à l'aide des flèches mécanistiques courbes indiquant le mouvement des électrons (parler de site nucléophile ou électrophile), mentionner la racémisation (ou l'obtention de diastéréoisomères) lors d'une SN1, évoquer la stéréospécificité d'une E2, mentionner que l'initiation d'une réaction par des peroxydes indique l'intervention probable de radicaux dans le mécanisme, radicaux par ailleurs détectables en RPE.*

*Un catalyseur permet le passage par un autre chemin réactionnel plus probable et plus rapide. Ne pas dire qu'un catalyseur est régénéré à la fin. Distinguer micro et macro. Couche d'ozone = 3mm. Il y a 3 choses dans la constante de vitesse (énergie, efficacité, probabilité).  $k$  est microscopique. Mécanisme = suite ordonnée de réactions. Notion de boucle de propagation. On doit citer le modèle des collisions et le modèle du complexe activé. Les notions de contrôles cinétique et thermodynamique, et le postulat de Hammond ne sont pas indispensables dans cette leçon, et nécessitent une réaction renversible.*

**Ce que dit le jury...**

*On constate souvent un manque d'applications concrètes.*

*Lien avec la réalité.*

*Aspects expérimentaux les plus variés, tant qualitatifs que quantitatifs, tout en conservant une cohérence d'ensemble.*

*Ne pas faire trop de calculs.*

**Bibliographie**

*Durupthy, H-prépa PCSI : Pour la loi de Van't Hoff.*

*Grécias, Chimie PCSI : Pour rupture d'équilibre et variance, pour corriger à V constant.*

*Jézéquel, Etude de l'équilibre entre  $\text{NO}_2$  et  $\text{N}_2\text{O}_4$ . BUP 879 : Pour  $\text{NO}_2$  et  $\text{N}_2\text{O}_4$ .*

*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour  $\text{KNO}_3$ , la pluie d'or, solubilité des AgX.*

*JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour le Dean-Stark.*

*Mesplède, 100 manipulations de chimie (générale) : Pour la séparation des ions Fe et Mg.*

**Introduction**

L'équilibre est défini par une constante.

Comment déplacer cet équilibre à notre avantage ?

**1 - Influence des paramètres extérieurs****1.1 - Influence de la température**

Donner la loi de modération : "Une augmentation de la température favorise un déplacement d'équilibre dans le sens endothermique".

Ecrire la dépendance de K avec la température (Loi de Van't Hoff où on suppose l'enthalpie de réaction indépendante de T).

**Expérience**

*Exemple de l'équilibre  $\text{NO}_2$  et  $\text{N}_2\text{O}_4$ .*

*Attention, P n'est pas fixé.*

*Montrer que c'est renversable (sinon peut-être cinétique).*

*Attention : hotte + gants néoprène.*

**Expérience**

*Solubilité de  $\text{KNO}_3$ .*

**1.2 - Application à la recristallisation****Expérience**

*Expérience de la pluie d'or.*

*Montrer que c'est renversable.*

**1.3 - Influence de la pression**

Donner la loi de modération : une augmentation de pression favorise une consommation des espèces gazeuses, écrire la constante de réaction en fonction des pressions partielles, traduire en fonction des  $x_i$  et P.

**Expérience**

*$\text{NO}_2$  et  $\text{N}_2\text{O}_4$  dans la seringue. Ne pas compresser rapidement sinon c'est adiabatique et non pas isotherme.*

**Expérience**

*Ouverture d'une bouteille d'eau gazeuse.*

*Attention, on change P mais on perd aussi un constituant.*

*pas de référence*



## 1.4 - Application à l'évaporateur rotatif

On garde le système hors d'équilibre à basse pression.

Expliquer avec les binaires.

Attention, pas vraiment de référence.

## 2 - Influence de la composition du système

### 2.1 - Ajout d'un constituant

#### Expérience

*Variation sur NaCl : solution saturée de NaCl dans des tubes à essais.*

*pas de référence*

*Ajout de HCl concentré : précipité.*

*Chauffage au bec bunsen : dissolution.*

*Ajout d'eau : dissolution.*

*Attention on peut alors rompre l'équilibre et non pas le déplacer.*

### 2.2 - Application à l'estérification

#### Expérience

*Estérification, extraction de l'eau à l'aide d'un Dean-Stark.*

#### Calcul

*Calculer le rendement.*

### 2.3 - Équilibres compétitifs

#### Expérience

*Solubilité des AgX.*

### 2.4 - Application à la séparation de métaux

#### Expérience

*Séparation des ions Fe et Mg.*

## Conclusion

Ouverture sur l'utilisation de la variance pour prédire combien de paramètres intensifs vont être pertinents pour caractériser un état d'équilibre.

#### Avis

*Leçon à laquelle j'ai du mal à donner une cohérence. Bof...*

#### Remarques

*Pas de démonstration.*

*Lois de modération.*

*Applications industrielles nombreuses (Synthèse de l'ammoniac, estérification, vapocraquage, saponification).*

*On peut aborder les binaires.*

*Appareil de Dean Stark : on enlève l'eau du milieu réactionnel par hydrodistillation (production d'une vapeur d'eau et toluène). Le toluène est ensuite recyclé après condensation.*

*En général en changeant les conditions dans le milieu on change de réaction prépondérante.*

*Déplacer notablement un équilibre, c'est souvent en pratique remplacer la RP initiale par une autre RP.*

*Dit autrement, à part en jouant sur T on ne peut pas modifier K.*

*Donc forcer un système à évoluer dans le sens direct, c'est s'arranger pour maintenir  $Q < K$ .*

*Bien différencier déplacement et rupture d'équilibre (quand le solide est entièrement dissout).*

Prérequis : Thermochimie, variance.

## Ce que dit le jury...

La partie sur les *applications* est souvent écourtée et n'aborde pas toujours les différents domaines de la chimie. Les calculs formels ou les modèles théoriques sont trop souvent déconnectés de la *réalité*. Des *illustrations* sont attendues. Lorsque introduits, les calculs de *variance* sont souvent mal conduits. Cette leçon ne doit pas se résumer à une présentation qualitative du comportement des mélanges binaires.

## Bibliographie

*Durupthy, Chimie PC/PC\* : Pour l'analyse thermique, la variance, les théorèmes de l'horizontale et des moments, les courbes ébullition et rosée, Raoult, eau-éthanol à fond dans les exos.*

*Grécias, Chimie PC/PC\* : Pour compléter si besoin.*

*Galiléo, Chimie 1ère S : Pour l'application aux pétroles.*

*Durupthy, Chimie 1ère S : Pour la distillation expérimentale.*

*Hunt, La chimie de A à Z : Pour la définition d'un mélange idéal.*

*Perrin, chimie industrielle : Pour la distillation du pétrole, et la bio, les polymères, la métallurgie, tout ce qui est applications, une mine même un peu ancienne (autres leçons), y penser.*

## Introduction

Que se passe-t-il lorsqu'on mélange des liquides ?

### Expérience

Mesurer la température d'ébullition de l'eau, de l'éthanol, et d'un mélange 20-80. Constater de plus que le distillat n'est pas pur (noter température de chauffage). Déduire que ça ne bout pas l'un après l'autre mais "ensemble". On va préciser cette notion. *pas de référence*

## 1 - Diagrammes binaires : Construction et lecture

### 1.1 - Analyse thermique et construction des diagrammes

On se place à P fixée pour faire un diagramme isobare.

#### Illustration

Analyse thermique (interpréter palier et pentes) dans le cas d'un corps pur puis d'un mélange. Construction du diagramme. Courbes de rosée, d'ébullition (CQFR).

Dire que c'est pareil pour les diagrammes isothermes.

### 1.2 - Interprétation avec la variance

Interpréter chaque partie des courbes et des diagrammes (ne pas oublier les lignes et points) avec la variances. Justifier le 2 par PVT (3-1).

### 1.3 - Quantité de matière dans chaque phase

#### Calcul

Démontrer et énoncer le théorème des moments chimiques.

### 1.4 - Composition dans chaque phase

#### Calcul

Démontrer et énoncer le théorème de l'horizontale.

Expliquer ce qu'il se passe quand on chauffe, et constater que la composition de la vapeur n'est pas la même que celle de la phase liquide.

### 1.5 - Modélisation de la solution idéale

Définir ce qu'est un mélange idéal.

#### Calcul

Etablir la loi de Raoult. Déduire l'équation des courbes d'ébullition et de rosée (voir exo eau-éthanol).

Tenter un lien avec l'expérience d'introduction.

## 2 - Ecart à l'idéalité

### 2.1 - Ecart faible

#### Illustration

Montrer la déformation des fuseau sur un exemple (ammoniac-eau).

### 2.2 - Azéotropie

#### Illustration

Montrer l'apparition d'un azéotrope avec la cas eau-éthanol et revenir sur l'interprétation de l'expérience d'introduction. En déduire qu'on est environ à 50%.

## 3 - Applications

### 3.1 - Distillation

But = séparer les constituants.

#### Illustration

Montrer montage et évolution sur la courbe. Conclure que c'est peu efficace et que ça dépend en plus du chauffage.

### 3.2 - Distillation fractionnée

#### Illustration

Montrer montage et évolution sur le diagramme. Notion de plateau. Regarder ce que devient la vapeur et le mélange dans le ballon. Conclure que c'est bien plus efficace.

#### Expérience

Effectuer une distillation fractionnée pentane-heptane. Caractériser les produits obtenus au réfractomètre. Comparer à l'expérience d'introduction : ça marche pas à cause de l'azéotrope (négatif).

### 3.3 - Application aux pétroles

Parler un peu de la distillation du pétrole. Distillation atmosphérique et distillation sous vide.

#### Illustration

Montrer l'illustration tirée du livre de lycée.

## Conclusion

Résumer la leçon, parler des effets de volumes.

#### Avis

Toujours de l'expérimental vers la théorique. Dans les livres il suffit parfois d'inverser T et P. Tout est dans la H-prépa mais à trois chapitres différents, essayer de diversifier un peu avec le Grécias le jour de l'oral.

#### Remarques

Pour démontrer la loi de Raoult, écrire l'égalité des potentiels des phase vapeur et liquide dans le cas d'une solution avec plusieurs soluté, un seul soluté, et faire la différence. Deux constituants dans une seule phase correspondent à une variance générale de 3 (à P fixée, on peut choisir indépendamment la température et la composition de cette phase). Deux constituants simultanément présents dans deux phases correspondent à une variance générale de 2. Donc, à P fixée, le choix de T impose les compositions de deux phases, se lisant sur les courbes de rosée et d'ébullition (théorème de l'horizontale). Il est indispensable de réaliser une distillation fractionnée (pentane heptane par exemple). Mentionner la séparation des constituants du pétrole comme exemple industriel. On peut déterminer les équations des courbes isothermes dans le cas d'un mélange idéal (Raoult). Azéotrope si pas idéal. La courbe d'analyse thermique de l'azéotrope a un seul palier comme le corps pur. Idéal si interactions intermoléculaires identiques. Pour le calcul des courbes : isoT -> Henry, Raoult, potentiels : isoP -> Van't Hoff et équilibre.

**Ce que dit le jury...**

*Il ne s'agit pas de construire le diagramme d'Ellingham. Lecture soignée. Ne pas oublier les applications industrielles. Des exemples variés en lien avec l'industrie et la vie courante sont attendus. Les généralisations abusives de systèmes ne comportant que le dioxygène sous forme gazeuse conduisent à des erreurs. Les diagrammes d'Ellingham, potentiel-pH, et les courbes  $i=f(E)$  sont supposées connus. Bien justifier les domaines d'existence ou de prédominance, ce qui permettra ensuite de rendre compte du caractère quantitatif, favorisé ou impossible d'une réaction.*

**Bibliographie**

*Durupthy, Chimie PC/PC\* : Pour l'approximation, les propriétés, les zinc, le carbone, tous les diagrammes avec  $P(O_2)$ , choix du réducteur, la pyrométallurgie du zinc.*

*Gréacias, Chimie PC/PC\* : Pour les cas des diagrammes avec la variance.*

*JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour l'oxydation du fer par l'air, l'aluminothermie, les réductions de  $CuO$ .*

*Sarrazine, L'oxydoréduction : Pour les piles usuelles (autres leçons).*

**Introduction**

La thermodynamique chimique permet de prévoir si une réaction est possible ou non, nous avons déjà construit les diagrammes d'Ellingham dans le cas des métaux et des oxydes, nous allons maintenant les utiliser pour prédire les réactions favorisées et l'appliquer à la pyrométallurgie car On trouve les métaux sous forme oxydée et il faut réduire les oxydes.

**1 - Droite d'Ellingham d'un couple métal/oxyde****1.1 - Rappel : Approximation d'Ellingham**

Définir le problème sur l'exemple de  $Zn/ZnO$  : équation d'oxydation avec nombre stoechiométrique de 1 pour le dioxygène. Rappeler l'approximation. Bien expliquer qu'on superpose deux choses et préciser ce qu'on sait contrôler.

**1.2 - Propriétés des diagrammes**

Continuité lors des changements d'état, rupture et signe de la pente. Commenter avec des exemples.

**2 - Lecture des diagrammes d'Ellingham****2.1 - Métal et oxyde à l'état condensé**

Cas où métal et oxyde sont en phase condensée : calculer la variance, calculer l'affinité. Domaines d'existence. Pression de corrosion, température limite de corrosion. Exemple du Zinc.

**2.2 - Métal ou oxyde à l'état gazeux**

Cas d'éléments sous forme gazeuse : idem (rapide sur transparent). Domaines de prédominance cette fois. Exemple de  $CO_2$ ,  $CO$  (dismutation) et  $C$ .

**2.3 - Stabilité d'un métal à l'air**

Exemple du fer à pression atmosphérique de dioxygène. Montrer que l'oxydation est thermodynamiquement favorable.

**Expérience**

*Oxydation du fer par le dioxygène. Montrer que le chauffage est purement cinétique.*

**3 - Pyrométallurgie****3.1 - Principe et intérêt**

On trouve les métaux sous forme oxydée. On les veut pures.

### Illustration

Recouvrir les diagrammes de Al et Fe. Interpréter la stabilité en termes de domaines disjoints pour aluminium et oxyde de fer.

### Expérience

Aluminothermie. Allumer la mèche avec un truc puissant. Se protéger les yeux. Interpréter en donnant la règle de réduction des diagrammes d'Ellingham si ce n'est pas déjà fait. Caractériser en mettant dans l'acide puis en ajoutant du thiocyanate. référence partielle

## 3.2 - Choix du réducteur

Discuter selon la température (C, CO, dihydrogène).

### Expérience

Réduction du CuO par C en tube à essai.

### Expérience

Réduction du CuO par H<sub>2</sub>. Attention sécurité.

## 3.3 - Pyrométallurgie du zinc

Justifier l'intérêt du zinc. Détailler les étapes et le choix du réducteur.

### Illustration

Haut-fourneau.

## Conclusion

Autre voie = hydrométallurgie (rédox en solution), mais qui commence aussi par de la pyrométallurgie.

### Avis

Le début des leçons de métallurgie. Attention à la sécurité. Toujours projeté les diagrammes.

### Remarques

Ne surtout pas revenir sur la construction du diagramme. Pour l'attribution de domaines, il est indispensable de porter en ordonnée y, avec la même échelle et la même origine. La pression partielle de dioxygène à l'équilibre se nomme pression de corrosion. Mettre en relation avec les phénomènes de corrosion sèche des métaux. Une oxydation d'un métal par le dioxygène et incontournable il en est de même de la réduction d'un oxyde métallique par un métal. Il faut mettre en évidence la nature d'au moins un produit formé par la réaction. L'objectif des diagrammes d'Ellingham est d'indiquer quel métal peut ou non réduire quel oxyde dans des conditions standard). Il est indispensable de montrer plusieurs diagrammes d'Ellingham dans un même système d'axe. Il existe des variantes aux diagrammes d'Ellingham pour des couples sulfure/métal ou chlorure/métal). Si gaz, en dehors de la droite, l'équilibre peut être établi, mais l'un des gaz prédomine. Le carbone a un pouvoir réducteur croissant avec la température.

Lorsqu'il faut attribuer les différents domaines du graphe

a- uniquement des phases condensées : parler de rupture d'équilibre si on est hors de la droite ; domaine d'existence.

b- cas d'une phase gaz : on a alors des domaines de prédominance.

Lorsqu'on veut savoir s'il y a réaction entre un oxyde et un métal (règle du gamma) :

a- cas des phases condensées.

b- cas d'une phase gaz en présence (pyrométallurgie du zinc : on travaille à  $T < T_i$  mais ce on déplace l'équilibre) (Ref=Bottin : excès de CO, Zn s'échappe).

Enfoncer la mèche jusqu'au bout dans le creuset. Caractériser l'oxyde avec de l'acide ou du thiocyanate. CuO est noir, Cu<sub>2</sub>O est rougeâtre.

Manip CuO et dihydrogène : vérifier pas de pop avant d'allumer (pas d'air), attendre le refroidissement pour éteindre la bouteille.  $\Delta_r G = \frac{\partial G}{\partial \xi}$ . On impose pression de dioxygène et température.  $\Delta_r G^0$  n'a rien d'un équilibre. Enfoncer la mèche jusqu'au bout. Ne pas mettre de BaO<sub>2</sub>. Dans les haut-fournaux, on est pas dans un état standard. Oxydes et sulfures. Liaisons ioniques plus fortes que métalliques. Ellingham → corrosion sèche. I-E → corrosion humide.

**Ce que dit le jury...**

*Les illustrations expérimentales doivent être replacées dans une démarche scientifique. Les courbes intensité-potentiel sont souvent mal maîtrisées. Le jury invite les candidats à approfondir leurs connaissances dans ce domaine, qui ne s'improvise pas. Des exemples plus variés en lien avec l'industrie et la vie courante sont attendus. Les diagrammes potentiel-pH et les courbes intensité-potentiel sont insuffisamment exploités pour justifier les protocoles opératoires des différentes étapes qui conduisent à la préparation du zinc. Une caractérisation à chaque étape des espèces présentes en solution est souhaitable. Cette leçon doit s'appuyer sur les diagrammes potentiel-pH et les courbes intensité-potentiel.*

**Bibliographie**

*Durupthy, Chimie PC/PC\* : Pour les diagrammes et les étapes.  
Vignes, Une vie de Zinc - BUP 770 : Pour le protocole des expériences.  
Vignes, L'hydrométallurgie - BUP 857 : Pour des détails en plus.*

**Introduction**

On a vu la pyrométallurgie. L'essentiel de la production de zinc se fait par hydrométallurgie.

**1 - Du minerai à la solution aqueuse****1.1 - En amont de l'hydrométallurgie : flottation et grillage****Illustration**

*Schéma général.*

Broyage. Flottation. Grillage. On obtient la calcine.

**1.2 - Mise en solution : lixiviation**

Tout au long de la leçon :

- faire le suivi des ions présents,
- les caractériser,
- expliquer avec des diagrammes E-pH et des courbes i-E.

**Expérience**

*Partir de la calcine toute faite.*

**2 - Purification****2.1 - Par précipitation d'hydroxydes****Illustration**

*Interpréter avec les diagrammes E-pH. Lixiviation neutre et acide. Choix du pH pour ne pas faire précipiter Zn, les ions Fe(II) doivent être oxydés en ions Fe(III), et seuls les éléments dont le pH de précipitation est plus faible que celui de Zn sont éliminés.*

**Expérience**

*Procédé à la jarosite pour le cas particulier du Fe(III). Montrer le principe, puis reprendre le résultat de la préparation.*

**2.2 - Cémentation****Illustration**

*Expliquer avec les courbes iE. Elimination des autres ions métalliques en solution par ajout d'un réducteur : Zn lui-même.*



## Expérience

*Cémentation puis filtration.*

### 3 - Réduction par électrolyse

#### 3.1 - Choix des électrodes

Nécessité de la cémentation préalable.

Choix de la cathode (Aluminium).

Choix de l'anode (Plomb).

#### Illustration

*Explication des trois types de tensions.*

#### 3.2 - Réalisation

#### Expérience

*Faire l'électrolyse. Prévoir une solution directement électrolysable si les manip précédentes ratent.*

#### 3.3 - Rendement

#### Calcul

*Rendement faradique (bonus) et prix à la tonne (1kWh = 0,10 euros, 1t = 1500 euros).*

*pas de référence*

### 4 - Hydrométallurgie secondaire

Parler un peu des autres métaux si on a le temps et dire qu'en gros c'est le même principe (Cas de l'or par exemple).

### Conclusion

Schéma récapitulatif, ouvrir à d'autres types de métallurgie.

Le choix des électrodes ne se fait pas au hasard.

#### Avis

*Une des rares occasions de manier les courbes i-E. La bilio est simple et on peut se laisser guider.*

#### Remarques

*On réduit  $H^+$  en  $H_2$  et pas  $Zn^{2+}$  en  $Zn$ .*

*La formation de  $CuI$  déplace l'équilibre et la constante de réaction est multipliée par l'inverse du produit de solubilité.*

*La surtension à l'électrode de plomb est positive, due à la difficulté de transfert des électrons à l'interface.*

*Utiliser les courbes i-E et les diagrammes E-pH à fond.*

*Les hydroxydes sont généralement moins stables que les oxydes correspondants mais ils sont plus rapidement formés.*

*Dans la tension à appliquer, bien distinguer les trois composantes : thermodynamique, cinétique et chute ohmique.*

*Utile dans le recyclage.*

Prérequis : Redox, Dosages, Piles.

### Ce que dit le jury...

Il faut bien lire le titre : il ne s'agit pas de construire un diagramme E-pH mais d'en faire une lecture précise et d'exploiter ces diagrammes dans des domaines différents. Les applications des diagrammes potentiel-pH ne se limitent pas à la métallurgie. Les diagrammes d'Ellingham et potentiel-pH, les courbes  $i=f(E)$  sont supposées connus. Les différentes étapes de l'hydrométallurgie du zinc doivent être justifiées à partir de l'étude de diagrammes potentiel-pH déjà tracés. On peut faire constater, si l'occasion se présente, leurs insuffisances pour l'interprétation de certaines réactions. Rappelons enfin que l'hydrométallurgie est l'ensemble des opérations conduisant du minerai au métal.

### Bibliographie

Vignes, Une vie de Zinc - BUP 770 : Pour l'hydrométallurgie.  
 Mesplède, 100 manipulations de chimie (organique) : Pour beaucoup de diagrammes.  
 Grécias, Chimie PC/PC\* : Pour le E-pH du cuivre et l'expérience, l'eau de Javel (chlore), la corrosion, les diagrammes Cu/Fel/Zn à base concentration, E-pH de l'iode.  
 JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour la pile Daniell (redox), Winkler, et dosage de la Javel.  
 Durupthy, Chimie PC/PC\* : Pour des diagrammes et des compléments.

## Introduction

On sait construire les diagrammes, voyons les applications.

### 1 - Lecture du diagramme (rappels)

#### 1.1 - Exemple du diagramme E-pH du cuivre

##### Illustration

Zones d'existence et de prédominance. Lecture des constantes.

#### 1.2 - Illustration expérimentale sur le cuivre

##### Expérience

Dismutation du cuivre(I) en milieu basique. Mettre Cu et  $\text{Cu}^{2+}$  dans un bécher, passer en milieu basique, chauffer, la solution se décolore et on forme  $\text{Cu}_2\text{O}$ , laisser refroidir, repasser en milieu acide, on reforme  $\text{Cu}^{2+}$  et Cu.

#### 1.3 - Cas de l'eau de Javel

##### Illustration

$\text{ClO}^-$  et  $\text{Cl}^-$  se dismutent en  $\text{Cl}_2$  en milieu acide. Attention danger à la maison.

## 2 - Préviation de réactions : superposition de deux diagrammes

### 2.1 - Corrosion uniforme

##### Illustration

Superposition d'un diagramme E-pH d'un métal (Comparaison Fe et Zn) avec celui de l'eau. Expliquer les trois domaines (passivation, corrosion, immunité). Expliquer en deux mot la protection par le zinc et par un générateur de tension.

### 2.2 - Pile Daniell

##### Illustration

Superposition des diagrammes du cuivre et du zinc, préviation de la réaction à l'origine du fonctionnement de la pile Daniell.

##### Expérience

Mise en évidence de l'énergie de la réaction dans un bécher et caractérisation des ions (avant et après) en tube à essai. référence partielle

## 3 - Utilisation pour le dosage ou la récupération d'espèces

### 3.1 - Dioxygène dans l'eau

#### Expérience

*Dosage du dioxygène dissout dans de l'eau par la méthode de Winkler. Bien expliquer ce que l'on fait, c'est subtil : on passe en milieu basique, puis on revient ensuite en milieu acide.*

### 3.2 - Dosage de l'eau de Javel

#### Expérience

*Expliquer le principe du dosage de l'eau de Javel par iodométrie. On forme d'abord  $\text{IO}_3^-$ , puis on acidifie pour former le diiode qu'on dose par le thiosulfate. (bonus)*

### 3.3 - Hydrométallurgie du Zinc

#### Illustration

*Principe de l'hydrométallurgie. Expliquer les étapes avec les diagrammes.*

#### Expérience

*Illustrer si possible les étapes correspondantes (lixiviation, cémentation).*

## Conclusion

Ouvrir sur les effets cinétiques et la nécessité des courbes i-E.

#### Avis

*Bien expliquer, gérer le temps. Toujours revenir aux diagrammes pour justifier le protocole.*

#### Remarques

*La seule corrosion dont on peut parler dans cette leçon est la corrosion uniforme : la corrosion différentielle ne peut pas s'interpréter que par la thermodynamique.*

*Applications théoriques, analytiques et industrielles.*

*Dans Winkler, après retour en milieu acide,  $\text{Mn}^{3+}$  devrait oxyder l'eau et donner  $\text{O}_2$  mais cinétique ou présence de sulfates.*

*Fe et Zn à la rigueur en ouverture sur la cinétique.*

*Si on place le permanganate dans le becher et le fer (II) dans la burette, il se forme des ions  $\text{Mn}^{2+}$  comme produit de la réaction, qui peuvent réagir avec  $\text{MnO}_4^-$  par médiamutation pour donner  $\text{MnO}_2$ . L'ion permanganate et l'eau ont des domaines de prédominance totalement disjoints. Ils ne peuvent donc pas coexister mais la cinétique est très lente.*

*Définition des domaines de corrosion, de passivation et d'immunité.*

*De la rigueur, toujours.*

*On contrôle par le pH des réactions redox.*

*Le dioxygène réduit le thiosulfate.*

*Réaction écrite avec hydroxyde en milieu acide à éviter.*

*Passivation = notion cinétique.*

*Filtrer un hydroxyde est difficile.*

**Ce que dit le jury...**

Les courbes intensité-potentiel sont souvent mal maîtrisées. Le jury invite les candidats à approfondir leurs connaissances dans ce domaine, qui ne s'improvise pas. Les notions de potentiel d'équilibre, de potentiel mixte et de surtension restent trop souvent mal maîtrisées. Les diagrammes d'Ellingham et potentiel-pH, les courbes  $i=f(E)$  sont supposées connus.

**Bibliographie**

Cachau-Herreillat, *Des expériences de la famille Réd-Ox* : Pour des rappels sur les courbes i-E et sur les électrodes, l'électrolyse de l'eau, le tracé des courbes pour l'eau, les tests d'ions (autres leçons), tableau périodique (autres leçon).

Durupthy, *Chimie PC/PC\** : Pour la corrosion d'un métal, le blocage cinétique, HCl et Plomb, les trois termes de tension.

JFLM, *La chimie expérimentale (générale)* : Pour l'expérience de l'accumulateur au plomb.

Sarrazin, *L'oxydoréduction* : Pour l'accumulateur au plomb (tracé des tensions et des courbes).

Durupthy, *Chimie des matériaux inorganiques* : Pour les courbes de l'accumulateur au plomb.

Gréacias, *Chimie PC/PC\** : Pour comparer la lecture des courbes i-E entre pile et électrolyse.

**Introduction**

Importance de la cinétique en redox : la rouille n'est heureusement pas instantanée.

**1 - Réaction spontanée de corrosion d'un métal et blocage cinétique****Illustration**

Rappel théoriques et définitions, conventions. Lecture pile/électrolyse.

**1.1 - Prévisions thermodynamiques****Expérience**

HCl dans un tube à essai avec plomb. Thermodynamiquement la réaction est spontanément possible, mais on observe rien (pas de dégagement gazeux). Ajouter fil de platine, ça marche.

Mise en évidence de la nécessité des courbes  $I=f(E)$  pour interpréter.

**1.2 - Interprétation avec les courbes intensité-potentiel****Illustration**

Présenter les courbes i-E. Système = couple redox + l'électrode. La non existence d'électrons libres dans la solution impose  $I_a=I_c$ , notion de potentiel. Potentiel mixte car il faut prendre en compte les courbes intensité potentiel de deux systèmes électrochimiques pour interpréter les phénomènes.

Interprétation en terme de blocage cinétique.

Surtension cathodique : Attaque lente de Pb par HCl, attaque rapide de Pb par HCl en contact avec Pt. Le système  $H_2/H_3O^+$  sur Platine ne présente pas de surtension contrairement au système  $H_2/H_3O^+$  sur plomb.

Application à la corrosion.

**2 - Électrolyse de l'eau****2.1 - Prévisions thermodynamiques**

Écriture des échelles de potentiel à l'anode et à la cathode : l'eau a un diagramme de prédominance joint, il faudra forcer la réaction donc faire une électrolyse (réaction non spontanée).

La réaction forcée sera thermodynamiquement possible pour une tension  $U_g$  supérieure à la différence de potentiel entre les deux couples (1,23V).

**Expérience**

Montage à 3 électrodes, électrolyseur avec électrodes en platine, solution d'acide sulfurique. Le constater expérimentalement.

## 2.2 - Tracé des courbes intensité-potentiel

### Expérience

Augmenter progressivement la fem du générateur tout en mesurant l'intensité et en observant les électrodes. Prendre des points et tracer sur regressi  $I_a = I = f(U_a)$  et  $I_c = I = f(U_c)$  où  $U_g = U_a + U_c$ . Bien prendre de l'eau distillée.

## 2.3 - Interprétation des courbes intensité-potentiel

Forme de la courbe par rapport aux réactions spontanées (piles).

Constater la présence d'une forte surtension anodique (éventuellement d'une faible surtension cathodique).

### Illustration

Distinguer les différents termes dans la tension à appliquer :

- le terme thermodynamique, différence des potentiels standards ( $E^0$ ),
- le terme cinétique dû aux surtensions mesurées sur la courbe à courant nul ( $\eta$ ),
- le terme de chute ohmique à déterminer par différence ou sur la courbe à courant non nul mais qui n'apparaît pas directement.

Application de cette expérience : production de dioxygène pour la médecine et de dihydrogène pour les piles à combustibles. Cette expérience permet aussi de déterminer la stoechiométrie de l'eau.

Les deux derniers termes traduisent le caractère irréversible de l'électrolyse. Si on veut stocker de l'énergie par électrolyse, puis récupérer le travail électrique par décharge de la pile à combustible ainsi constituée, les termes cinétiques et ohmiques seront perdus.

Et surtout, on explique la notion de métastabilité.

## 3 - Accumulateur au plomb

### 3.1 - Présentation

Définir accumulateur et l'opposer à une pile. Application au démarrage de voiture (1860).

### Illustration

Décrire le mouvement des porteurs de charge à la charge et la décharge avec inversion des rôles des électrodes.

### 3.2 - Charge et décharge

#### Expérience

Modèle de l'accumulateur au plomb : solution d'acide sulfurique et électrodes en Plomb.

Mesurer la tension aux bornes de l'accumulateur lors de la charge et lors de la décharge (dans une lampe pour le côté visuel), pour une même valeur de courant. Constater tension plus faible à la décharge qu'à la charge.

Tracer la courbe  $I = f(E)$ , reprendre un point (ou les prendre dans la référence) et interpréter sur les courbes charge et décharge. En particulier, l'eau n'est pas gênante grâce aux surtensions. Essayer de mettre du quantitatif (rendement en courant par exemple).

Couple de l'eau pas gênant grâce aux surtensions.

## Conclusion

Ouvrir sur la corrosion et la protection du fer par le zinc expliqué aussi seulement par les courbes  $i-E$ .

### Avis

Opposer thermodynamique et cinétique. Pour chaque expérience : liste des couples présents, réaction prévue par la thermodynamique, observation expérimentale, interprétation avec les courbes  $iE$ .

### Remarques

Ce qui est nouveau : prévu mais lent ou pas prévu. La thermodynamique propose des réactions, la cinétique impose celles qui ont effectivement lieu. L'accumulateur au plomb ne pourrait pas fonctionner si le couple  $H^+ / H_2$  était rapide. La lecture des courbes n'est pas la même selon le fonctionnement en pile ou en électrolyse, attention. Courbe  $i-E$  = caractéristique d'un dipôle. Les intensités anodiques et cathodiques sont égaux en valeur absolue. Électrolyse du chlorure de sodium donne production de dichlore (30MMt/an). Pour une pile, on a une transformation spontanée et la courbe de  $i > 0$  (anode) est située à gauche de la courbe de  $i < 0$  (cathode); Pour une électrolyse, on a une transformation forcée donc c'est le contraire.





Prérequis : Redox, courbes i-E, diagrammes E-pH.

### Ce que dit le jury...

Cette leçon est présentée souvent sans recul et de manière trop proche des contenus bibliographiques. On constate des difficultés dans l'exploitation des expériences. Les courbes intensité-potentiel sont souvent mal maîtrisées. Le jury invite les candidats à approfondir leurs connaissances dans ce domaine, qui ne s'improvise pas. Les aspects cinétiques de la corrosion sont souvent négligés. Une mauvaise maîtrise des courbes intensité-potentiel en est en général la cause. Un lien existe entre les conditions de tracé des courbes  $i=f(E)$  et l'utilisation que l'on en fait dans l'application étudiée. La construction des diagrammes n'est pas demandée dans ces deux leçons. En revanche, à chaque fois que c'est possible, il faut utiliser ces diagrammes pour interpréter les réactions. On peut faire constater, si l'occasion se présente, leurs insuffisances pour l'interprétation de certaines réactions. Rappelons enfin que l'hydrométallurgie est l'ensemble des opérations conduisant du minerai au métal.

### Bibliographie

*Durupthy, Chimie PC/PC\** : Pour l'importance économique, la corrosion différentielle, les revêtements.  
*Gréacias, Chimie PC/PC\** : Pour les définitions, la thermodynamique de la corrosion, protection anodique et cathodique, les règles de l'aération différentielle.  
*JFLM, La chimie expérimentale (générale)* : Pour la passivation du fer, l'anode sacrificielle.  
*JFLM, La chimie expérimentale (organique)* : Pour l'anode sacrificielle sur les bateaux, la corrosion différentielle à cause d'hétérogénéités.  
*Sarrazin, L'oxydoréduction* : Pour.  
*Cachau-Herreillat, Des expériences de la famille Red-Ox* : Pour des compléments, idées d'expériences en plus, protection si besoin, interpréter les couleurs des IC de la corrosion différentielle, l'expérience des revêtements.  
*Durupthy, Chimie des matériaux inorganiques* : Pour le vrai (complet) diagramme E-pH du Fer.

## Introduction

La corrosion est un phénomène courant, on a tous déjà vu des objets rouillés (grille, voiture), car restés longtemps dehors, c'est de plus un sujet avec d'énormes enjeux industriels. Nous allons l'étudier d'un point de vue chimique et voir quelles méthodes peuvent être mises en oeuvre pour lutter contre elle. On s'intéressera au fer.

## 1 - La corrosion humide

### 1.1 - Définitions

Définir ce que c'est. Exemples. Expliquer en quoi la corrosion humide est plus problématique que la corrosion sèche (porosité). Corrosion = Oxydation du métal (ronger avec).

### 1.2 - Les différents facteurs de corrosion humide

Lister les différents facteurs (extérieurs et liés au matériau).

### 1.3 - Deux types de corrosion

Corrosion uniforme et corrosion différentielle. Les présenter.

## 2 - Corrosion uniforme et méthodes de protection

### 2.1 - Thermodynamique de la corrosion

#### Illustration

Diagramme E-pH superposé avec celui de l'eau, définition des zones d'immunité, de passivation et de corrosion.

### 2.2 - Exemple de passivation

#### Expérience

Passivation du fer par les ions nitrates (Hotte). Dépasseur en grattant.

Dire que l'aluminium se passive naturellement.

## 2.3 - Protection anodique et cathodique

On impose un courant pour forcer le métal à être dans un domaine d'immunité.

## 2.4 - Cinétique de la corrosion et principe de l'anode sacrificielle

### Expérience

*Anode sacrificielle. Paille de fer et Zinc dans HCl. Attendre un peu, la réaction n'est pas immédiate.*

### Illustration

*Expliquer à l'aide des courbes intensité potentiel.*

### Calcul

*Anode sacrificielle sur les bateaux.*

## 3 - Corrosion différentielle et revêtements de protection

### 3.1 - Corrosion à cause d'inhomogénéités

#### Expérience

*Exemple d'inhomogénéité de concentration et d'inhomogénéité de surface (clous dans les gel d'agar agar en tube à essai, clous dans les gel d'agar agar tordu dans boîte de pétri.). Oxydation où c'est le moins aéré et le plus dilué. En faire plusieurs et montrer le plus beau.*

#### Illustration

*Explication en terme de micropile et porteurs de charges.*

### 3.2 - Principe des revêtements de protection

Revêtement physique (ne doit pas être rayé).

Revêtement chimique, 2 cas : cas d'un métal plus oxydable (Zn) et cas d'un métal moins oxydable (Cr) mais qui va former une couche passivante.

#### Expérience

*Boîte de pétri : comparer anode sacrificielle en zinc et contact avec le cuivre.*

Conséquences sur les rayures.

## Conclusion

Données industrielles (40% de la production de zinc au monde sert à protéger du fer). Comparer les différentes méthodes de protection.

#### Avis

*Sûrement une des leçons les plus difficiles.*

#### Remarques

*Dire pourquoi le fer est oxydé et pas le zinc. L'eau aérée est plus corrosive que l'eau désaérée. Parler des autres modes de protection. Définissant les domaines de passivation, de corrosion et d'immunité. Corrosion différentielle : Toute hétérogénéité accélère la corrosion, endroits différents donc pile. L'hétérogénéité résulte le plus fréquemment soit d'un contact entre deux métaux, eux-mêmes plongés dans la solution oxydante (le plus réducteur est alors oxydé plus vite et le moins réducteur est protégé), soit d'un gradient de la concentration en oxydant (notamment dioxygène dissous). Expliquer mouvement des porteurs de charges. Protection : anode sacrificielle, revêtement non métallique, revêtement métallique (plus réducteurs ok pour fissures ; électrozingage et galvanisation), courant imposé. La passivation du fer, si on la présente, utilise l'acide nitrique qui intervient par le couple  $\text{NO}_3^- / \text{NO}$ . Distinguer la corrosion humide dans l'eau douce, dans l'eau de mer, à l'air. La couche d'oxyde peut être poreuse, plus elle l'est, plus elle doit être épaisse. Inox = couche d'oxyde de chrome. Clou et corrosion différentielle : la corrosion a lieu où le milieu est faible en dioxygène, à priori contre intuitif. Tel quel les courbes  $i$ - $E$  expliquent seulement la corrosion uniforme. Seules les courbes  $i$ - $E$  expliquent la protection par le zinc. Notion de pile de corrosion.*

**Ce que dit le jury...**

Les *conditions opératoires* sont couramment mal maîtrisées. Des *exemples concrets* et bien choisis sont attendus. La chimie est une science ancrée dans le réel.

**Bibliographie**

*Durupthy, Chimie PCSI : Pour les mécanismes et la théorie des réactions.*

*Gréacias, Chimie PCSI : Pour la présentation de la double liaison.*

*JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour l'hydratation expérimentale.*

**Introduction**

On va voir outils de base du raisonnement en chimie organique, notions d'acide/base de Lewis et de nucléophile/électrophile (analogie avec A/B et RedOx). Comment privilégier la formation d'un isomère. Ici double liaison carbone-carbone, composés présents dans la nature et intermédiaires de synthèse de produits à hautes valeurs ajoutés.

**1 - La double liaison C=C****1.1 - Description**

Longueur plus courte, énergie inférieure au double d'une liaison simple. Interprétation comme liaison sigma et pi plus faible. caractère plan de la liaison. Blocage de la rotation admis.

**1.2 - Réactivité**

La double liaison est nucléophile, on va avoir des additions électrophiles à cause de l'insaturation défavorable énergétiquement.

**1.3 - Stabilité**

Règle de Zaitsev : l'alcène le plus stable est le plus substitué (le plus stable en général).

**2 - Hydrohalogénéation****2.1 - Réaction**

Ecrire une réaction exemple

**Expérience**

Si possible illustrer avec des modèles moléculaires, seulement remplacer un H par un groupe R. *pas de référence*

Vitesse différente selon la polarité de HX (lien avec électronégativité).

Régiosélectivité à définir

Donner la règle de Markovnikov (à illustrer sur l'exemple à suivre).

**2.2 - Mécanisme****Illustration**

Montrer sur transparent le mécanisme, avec les profils énergétiques pour les deux voies possibles.

**2.3 - Régiosélectivité**

On généralise la règle de Markovnikov grâce au postulat de Hammond.

**Illustration**

Règle de Markovnikov : Lors de l'addition d'un halogénure d'hydrogène sur un composé asymétrique, le produit majoritaire est celui qui passe par le carbocation le plus stable.

Noter l'absence de stéréosélectivité.

**Illustration**

Attaque par en haut ou par en bas, R ou S, racémique.

### 3 - Hydratation

Donner le mécanisme. Similaire car régiosélectif et non stéréosélectif. On obtient un alcool Markovnikov.

#### Illustration

*Présenter l'expérience.*

#### Expérience

*Réaliser l'hydratation de l'hex-1-ène et caractériser l'alcool au réfractomètre et au banc Köffler. Bien changer de tube quand il faut pour la distillation. Eventuellement lancer l'expérience en double pour montrer une étape intermédiaire.*

### 4 - Dihalogénéation

#### 4.1 - Réaction

#### Expérience

*Décoloration de l'eau de brome avec cyclohexène/cyclohexane.*

*pas de référence*

Expliquer et écrire la réaction.

#### 4.2 - Stéréospécificité

Définir les termes stéréosélectif et stéréospécifique qui concernent cette réaction (car constatations expérimentales empiriques).

#### 4.3 - Mécanisme

Comprenons ceci via le mécanisme qui a été proposé et qui est désormais admis.

#### Illustration

*Mécanisme ion ponté. Composé méso/composés achiraux ou racémique.*

### 5 - Addition électrophile radicalaire

#### Illustration

*Mécanisme pour obtenir anti-Markovnikov.*

### Conclusion

Ouverture sur la polymérisation.

#### Avis

*Bonne leçon d'orga.*

#### Remarques

*L'addition d'halogènes sur les alcènes a une grande importance industrielle dans la fabrication des solvants chlorés. La réaction de chloration de l'éthylène fournit le dichloroéthane; ce dernier subit ensuite une réaction de bêta-élimination, on obtient le chlorure de vinyle qui se polymérise facilement en donnant le polychlorure de vinyle. Caractère nucléophile (assez faible) et insaturé des alcènes. Nommer les molécules. Régiosélectivité, Stéréospécificité, profils énergétiques, Postulat de Hammond. Etat de transition tardif = endothermique. Etat de transition précoce = exothermique. Programme = additions de HX, de X<sub>2</sub> et hydratation. Il est rare que l'on n'obtienne qu'un seul composé. Le réfractomètre d'Abbe ne peut être utilisé que pour des liquides d'indice de réfraction inférieur à celui du verre flint (n = 1,7) après on a réflexion totale. un critère pertinent de pureté d'un solide est sa température fusion. Un critère de pureté d'un liquide est son indice de réfraction. Un électrophile et un nucléophile réagissent ensemble. Ne pas confondre sélective et spécifique. Avec le chlore on a pas toujours un ion ponté et stéréospécificité.*

Prérequis : Représentations, CIP, VdW, Titrages.

### Ce que dit le jury...

L'utilisation des *modèles moléculaires* n'est pas toujours probante, l'illustration expérimentale reste pauvre, les exemples choisis manquent de pertinence. Les *interactions inter et intramoléculaires* sont mal connues et rarement évoquées spontanément pour expliquer certaines observations expérimentales (effets thermiques, valeurs de constantes physiques). Des exemples concrets et bien choisis sont attendus. Le cas du *cyclohexane* mérite quelques égards, notamment sur le plan de sa représentation. Cette leçon est destinée à donner aux élèves les *bases de la représentation spatiale des molécules*. La partie conformation est souvent trop développée au détriment de la partie configuration. Il faut également mieux commenter la présentation des *modèles moléculaires*. Trop souvent, en s'appuyant sur des exemples pris en biologie, les candidats laissent penser que la séparation de deux énantiomères peut se faire simplement à l'aide d'une réaction chimique. Cette leçon ne doit pas être un catalogue sur les différentes isoméries, mais doit être illustrée de quelques exemples et expériences. Les isoméries de constitutions sont hors-sujet. L'exemple des *acides maléique et fumarique* est souvent choisi ; il convient alors de justifier les différences de valeurs des constantes physicochimiques ( $pK_a$ , point de fusion, solubilité... ) évoquées.

### Bibliographie

*JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour acide fumarique et maléique, l'acide tartrique, le pouvoir rotatoire.*

*Durupthy, Chimie PCSI : Pour les conformations, les configurations.*

## Introduction

Une formule brute ne suffit pas à décrire spatialement une molécule.

## 1 - Conformations

### 1.1 - Définition

Pour un molécule, une infinité de conformations possibles. Donner ordre de grandeur.

### 1.2 - Cas simple

#### Expérience

*Modèles moléculaires.*

L'éthane : Discuter, construire le diagramme d'énergie potentielle, définir les éclipsée-décalée syn-anti droite-gauche.

#### Illustration

*Représentations de Cram et Newman.*

### 1.3 - Cas d'une molécule substituée

Cas du butane, à traiter aussi avec diagramme d'énergie potentielle, représentations.

#### Expérience

*Modèles moléculaires.*

#### Illustration

*Diagramme d'énergie.*

#### Calcul

*Comparer l'ODG à  $kT$ , en déduire à température ambiante on ne peut pas les séparer et que c'est donc pour nous la même molécule. Retrouver pourcentages avec Boltzmann.*

## 2 - Notion de configuration d'un centre stéréogène

### 2.1 - Rappel des règles CIP

De façon très rapide.

### 2.2 - Descripteurs stéréochimiques

Descripteurs R/S et Z/E (et cis/trans).

## 3 - Stéréoisomérisation de configuration

### 3.1 - Énantiomérie et diastéréoisomérisation

Définitions. Ne pas encore parler de chiralité. Donner des exemples de plusieurs types : deux carbones asymétriques, double liaison, cycle.

### 3.2 - Propriétés d'un couple de diastéréoisomères

Deux diastéréoisomères ont des propriétés physiques et chimiques différentes.

#### Expérience

*Acides fumariques et maléiques. Point de fusion et dosage + modèles moléculaires. Interpréter les pKa en fonction de Z/E.* *référence partielle*

### 3.3 - Propriétés d'un couple d'énantiomères

Deux énantiomères ont exactement les mêmes propriétés physiques, à part le pouvoir rotatoire spécifique.

#### Expérience

*Températures de fusion de l'acide tartrique (+) et (-) identiques.*

### 3.4 - La chiralité, ou comment distinguer deux énantiomères

Définir la chiralité (propriété structurale) et l'activité optique (propriété physique).

#### Expérience

*Loi de Biot et odeur de la carvone (ou saccharose, ou limonène)*

### 3.5 - Dédoublage de racémique

Principe : pour séparer deux énantiomères, il faut passer par une situation de diastéréoisomérisation.

## Conclusion

#### Avis

*Dire qu'on se limite au programme de PSI (pas de cyclohexane).*

#### Remarques

*Résolution racémique pas au programme. Distinguer propriétés scalaires (identiques pour énantiomères) et vectorielles. Conformations pas séparables, configurations séparables. Cyclohexane pas au programme de PSI. Définitions claires sur transparents : l'énantiomérisation de configuration entre deux molécules différentes, la diastéréoisomérisation de configuration entre deux molécules différentes et l'isomérisation de conformation entre deux conformations d'une même espèce chimique. R/S, Z/E, cis/trans. Attention un cycle n'est pas plan, on parle de plan moyen. Interpréter les différences de propriétés à partir des différences de structure. Il faut introduire la chiralité. Parler de possibilité de rotation plutôt que de rotation libre. Deux énantiomères de configuration ont des propriétés physiques et chimiques identiques, tant que le phénomène mis en jeu ne fait pas intervenir d'espèce chirale. L'intervention d'une espèce ou d'une phase chirale crée une situation de diastéréoisomérisation et provoque des comportements différents pour les deux énantiomères. Deux diastéréoisomères de configuration ont des propriétés physiques différentes et leurs réactivités peuvent différer. Diastéréoisomérisation : relation existant entre deux molécules stéréoisomères mais pas énantiomères.*



**Ce que dit le jury...**

Cette leçon a révélé de grosses lacunes dans ce *domaine* de la chimie.

**Bibliographie**

*Durupthy, Chimie PC/PC\** : Pour toute la théorie, les définitions, le tableau des polymères, les différents type de polymérisation, calcul chaîne longue, états physiques, la conclusion...

*Gréacias, Chimie PC/PC\** : Pour la théorie aussi, la description statistique, les différents types de polymères.

*JFLM, La chimie expérimentale (organique)* : Pour l'intro, le nylon, le polyacrylamide.

**Introduction**

Historique. Polymérisation par réaction ou par changement d'état.

**Expérience**

Polymérisation du soufre

[vérifier référence](#)

**1 - Définitions et description****1.1 - Macromolécules et polymères**

Définitions de macromolécule, motif, solution polymère... parler de la masse molaire + ODG.

**Illustration**

Monomère, structure, motif et propriétés de PE PP et PS.

**1.2 - Description statistique**

Degré de polymérisation en nombre, en masse, indice de polymolécularité (+ODG) selon procédé naturel, anionique ou radicalaire.

**Illustration**

Définitions sur transparent.

**1.3 - Différents types de polymères**

Homopolymères / Copolymères (statistique, alterné, bloc).

Structure spatiale (linéaire, ramiée, réticulée 3D).

Séréorégularité : isotactique, syndiotactique souvent par anionique, atactique souvent par radicalaire.

**2 - Obtention de matériaux polymères****2.1 Synthèse d'un polymère : polycondensation du nylon****Illustration**

Mécanisme réactionnel.

Résistance à traction car liaison H.

**Expérience**

Polycondensation du nylon.

**2.2 - Différents types de réactions de polymérisation**

Par stade (ionique, ex : nylon, anionique) : polyaddition ou polycondensation.

En chaîne (radicalaire, ex : styrène) : initiation, transfert, propagation, terminaison.

**Illustration**

Transparents pour les mécanismes.

## 2.3 - Cinétique

### Calcul

*A préparer sur transparent. AEQS, hypothèse chaînes longues.*

Déplacement possible du centre actif si radicalaire -> branches, réticulations.  
Amorces souvent chères.

## 3 - Propriétés physiques des matériaux polymères

### 3.1 - Etat caoutchoutique

Car vulcanisation et ponts disulfure. Effet entropique donc transition vitreuse à froid.

### Expérience

*Tube caoutchouc dans azote liquide : casse.*

*pas de référence*

### 3.2 - Cristallinité

Si tacticité, organisation en lamelles similaire à un cristal. Existence d'une température de fusion.

### 3.3 - Semi-cristallin

### Illustration

*Module d'Young en fonction de température.*

Il existe  $T_g < T_{fus}$  tel que le module d'Young diminue avant de se stabiliser puis chuter à  $T_{fus}$ .

### 3.4 - Différents types de plastiques

Thermoplastiques (expérience yaourt) et thermodurcissables.

### Illustration

*Tableau des différents types de plastiques.*

### Expérience

*Chauffer yaourt thermoplastique (sans le brûler).*

*pas de référence*

### 3.5 - Influence de la réticulation

### Expérience

*Polyacrylamide à différentes doses.*

Constater la variabilité des propriétés mécaniques et dire qu'on peut adapter le matériau à l'usage recherché.

## Conclusion

Vulcanisation des caoutchouc (= réticulation, spaghetti). Lentilles de contact et d'autres applications.

### Avis

*Leçon de démonstration légèrement modifiée, donc sûrement bonne si bien réalisée.*

### Remarques

*vérifier anecdote*

*AGIR : Manips dangereuses : plutôt dans le cadre de la fête de la science.*

*Fête de la Science : former au travail d'équipe, réalisation de poster pour valoriser l'établissement, concours, productivité.*

*Responsabilisation au recyclage des déchets : chez les élèves, sensibilisation citoyenne.*

*Métiers de la chimie : visites de professionnels, conférences, contact avec le monde du travail.*

*Sensibilisation : différents niveaux de qualification (TPE, TIPE), lien avec l'actualité.*

*Pluridisciplinarité : cours transversaux convenus avec les collègues.*

*Créativité : Envisager et résoudre des problématiques actuelles.*

*Il existe une anecdote sur les chars en Russie. Différence entre micro et macro.*

*Module d'Young  $E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\text{Contrainte}}{\text{Allongement}} = \frac{\frac{\text{Force}}{\text{Surface}}}{\text{Allongement}}$ . Sécurité, voir INRS.*

*Nitrocellulose = premiers films plastiques.*

**Ce que dit le jury...**

*Différencier mécanique du point et mécanique du solide. Les systèmes isolés ou pseudo-isolés ne sont pas les seuls. L'étude quantitative du moment cinétique est souvent négligée : les oscillations pendulaires ouvrent d'intéressantes perspectives. Il n'est pas indifférent de dire système ou solide. L'utilisation de l'ordinateur permet d'éviter des opérations fastidieuses. Les lois phénoménologiques n'ont pas à être évoquées dans ce montage.*

**Bibliographie**

*Pérez, Mécanique : Pour les lois, les moments d'inertie.  
Duffait, Expériences de physique au CAPES : Pour la chute libre (programme), la mesure de g.  
Duffait, Etude expérimentale des oscillateurs mécaniques - BUP 876 : Pour le pendule.  
Fiat, Toute la physique de SUP : Si on a besoin de se remémorer les lois, la constante des aires...*

**Introduction**

Mise en application des différents principes de mécanique, du PFD (qui contient TRC, TMC et TEC).

**1 - Chute libre, mouvement accéléré****1.1 - Mesure de la pesanteur, chute d'une règle****Expérience**

*Dispositif chute libre ENSL avec réglette en plexiglas transparent. Electroaimant 1A (utiliser bille intermédiaire). Utiliser programme du Duffait sur 3 capteurs à 5cm, 30cm et 70 cm. Simplement ajouter ces distances d'offset sur chaque voie pour dn. Incertitudes à rentrer dans la modélisation : sur z par la position, sur t par l'échantillonnage 0,1ms (court devant le temps de passage d'un trait devant le capteur), non-verticalité du dispositif (négligeable). Déduire une valeur de g.*

**1.2 - Etude énergétique****Calcul**

*Montrer que la vitesse est linéaire, regarder la valeur de g que cela donnerai, et faire l'étude énergétique  $E_c, E_p, E_m$  et commenter.*

**2 - Conservation de la quantité de mouvement, mobiles auto-porteurs****2.1 - Mobiles autoporteurs****Expérience**

*Equilibrer la table avec un niveau à bulle et un mobile ou une bille (2 vis d'un côté puis la 3ème). Peser les mobiles. En préparation, estimer l'erreur sur un mouvement normalement rectiligne uniforme dans deux directions orthogonales, mesurer la distance à la règle entre deux points en différents endroits de la trajectoire (faire un moyenne sur plusieurs points locaux pour ça). Dispersion de plus de 10%. Utiliser une feuille de papier par-dessus la feuille de carbone, le tout bien plat et dans le bon sens.*

**Expérience**

*Montrer un choc élastique avec les bagues appropriées et des mobiles de masse différentes (500 et 1500g, bague en métal). Prendre en photo les points. Utiliser le logiciel imageJ en mettant le début de la trajectoire en haut (prendre une photo). Détecter automatiquement les points en sélectionnant chaque trajectoire. Attention aux erreurs de parallaxe pour la prise du cliché.*

Attention le dispositif de marquage ne fonctionne que si les 2 mobiles sont présents sur la feuille mais rien n'interdit d'en éteindre un des deux. La mesure nécessite une troisième main. Lancer le mobile lourd un peu plus vite, et le mobile léger plus doucement pour voir l'effet de transfert d'énergie à l'oeil. Choc à environ 45°.

## 2.2 - Analyse des résultats (p,E)

### Calcul

Exploiter ces données avec ImageJ. Tracer la trajectoire du centre de masse et modéliser par une droite. Tracer aussi la quantité de mouvement et l'énergie cinétique de chaque solide et du total. Interpréter en terme de forces extérieures et de système isolé et du rapport des masses.

## 3 - Mouvement à force centrale

### 3.1 - Mobiles autoporteurs et ressort, présentation

#### Expérience

Utiliser un mobile éteint lesté comme point d'ancrage (attention au fil d'alim) dans un coin. Mettre un ressort qui doit rester tendu, dont on a mesuré les caractéristiques (10,8N et 14,5cm). Lancer le second mobile pour acquérir un arc d'ellipse. Éviter la rotation propre du mobile, lancer de façon tangente à la trajectoire. Comme le mouvement est à force centrale, le moment cinétique se conserve. Faire aussi un point en allumant le second mobile maintenu à sa place pour avoir sa position. référence partielle

### 3.2 - Analyse des résultats (L)

#### Calcul

Tracer le produit masse\*distance\*vitesse\*sin égal à la norme du moment cinétique par rapport au point d'ancrage pour montrer qu'il est constant. A défaut, découper des triangle et peser la masse du papier... Tracer énergie cinétique, potentielle et totale. Commenter. Si on trace  $E_c = f\left(\frac{1}{2}(l - l_0)^2\right)$ , la pente nous donne la valeur de K. Attention, pour cela il faut prendre une règle sur la photo afin d'avoir la correspondance pixel-cm.

## 3 - Moment d'inertie

### 3.1 - Pendule grand angle, présentation

#### Expérience

Vérifier la non-discontinuité du potentiomètre sinon changer de côté. Régler l'offset et la correspondance tension-angle du pendule. Montrer que la tige seule est équilibré ou l'équilibrée si besoin. Placer une masse à une distance du centre de rotation connu. Enregistrer les oscillations et faire la TF en discutant les paramètres d'acquisition. référence partielle

### 3.2 - Analyse des résultats (J,E)

#### Calcul

En déduire le moment d'inertie. Pour l'ordre de grandeur, on suppose que la matière est un cylindre plein d'aluminium. Petits angles ok à moins de 2% en dessous de 20°. Comparer avec la valeur mesurée. Faire également l'étude énergétique complète. On peut le faire sur un temps long en préparation pour discuter des frottements fluide et solide sur une courbe en ouverture. référence partielle

## Conclusion

Immense gamme d'applications (industrie, planètes...). Evoquer la limite relativiste.

#### Avis

Un montage normalement simple. Don't forget the  $2\pi$ . Mettre règle sur photo très lumineuse.

#### Remarques

Soigner la forme et la présentation des manipulations. Chute libre : règle plutôt que bille. On trouve g trop grand, on arrive pas à expliquer. Frottement fluide en  $v$  ou  $v^2$  selon petit ou grand (ici) Reynolds. On peut avoir conversion d'énergie translation/rotation car pas ponctuel. Hypothèses champ de pesanteur est constant, règle est indéformable et ne tourne pas. On peut aussi mesurer g en inclinant la table des mobiles autoporteurs. On suppose que l'éclair se fait au centre d'inertie. L'erreur de 15% se répercute partout, ne pas l'oublier. Pour le frottement, Synchronie modéliser avec expression générale. Utiliser marquage cours.

## Ce que dit le jury...

La *tension superficielle* n'est pas le seul phénomène de surface pouvant être mis en évidence. Ce montage comporte des *mesures délicates* qui, si elles sont bien exécutées avec un protocole précis, peuvent mettre en valeur l'habileté expérimentale du candidat. Les *balances d'arrachement* sont délicates à utiliser, il est nécessaire de bien comprendre leur fonctionnement. Les *ondes capillaires* ne s'observent que pour un certain domaine de longueurs d'onde. Si le candidat souhaite utiliser une balance d'arrachement, il est invité à en choisir une dont il maîtrise le fonctionnement. L'utilisation d'une webcam pour la loi de Jurin donne de meilleurs résultats qu'une projection à l'aide d'une lentille. Les mesures nécessitent de se placer en régime statique. Les modes à la surface libre d'un liquide sont rarement évoqués. La notion de *longueur capillaire* semble inconnue à la plupart des candidats. De simples considérations dimensionnelles permettent d'en retrouver l'expression. Il est dommage de se limiter à des mesures en régime statique. peut élargir l'étude à la propagation des ondes de surface (relation de dispersion, atténuation).

## Bibliographie

*Guyon, Hydrodynamique physique* : Pour la balance d'arrachement, relation de dispersion, Jurin Très complet.  
*Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Mécanique* : Pour la loi du Jurin (capillarité).  
*Perez, Mécanique* : Pour le plan incliné.  
*BRF, Mécanique 2* : Pour le stick-slip.  
*Sanz, Physique PC-PC\** : Pour le stick-slip aussi.  
*Taillet, Dictionnaire de physique expérimentale* : Pour les définitions, la longueur capillaire, la loi de Jurin, la relation de dispersion et les types de vagues.

## Introduction

Evocation des phénomènes de surface dans la vie de tous les jours (armoire plus difficile à pousser au départ ou sur surface sale qu'une fois lancée ou sur surface propre, gouttes sur les nénuphars ou dans la poêle par rapport à eau sur du verre, formation de gouttelettes à partir d'un filet d'eau (Instabilité de Rayleigh-Plateau).

## 1 - Frottements solides

## 1.1 - Mise en évidence

## Expérience

*Blocs sur un plan incliné pour illustrer les lois de Coulomb et mesurer les coefficients de frottement statique et dynamique par aller-retour. Peu précis.* *référence partielle*

## 1.2 - Stick-slip

## Expérience

*Dispositif ENSL. Acquisition sur VidéoCom. Etalonner le ressort.  
 Remonter aux deux coefficients de frottement.  
 Attention à l'incertitude sur le placement initial (longueur à vide).  
 Lester si besoin.* *référence partielle*

## 2 - Tension de surface

## 2.1 - Mise en évidence

## Expérience

*Anneau métallique + fil qui se tend en cercle lorsqu'on crève le film de savon d'un côté, afin de minimiser la surface, donc l'énergie. On peut également montrer les cubes. Interpréter.* *pas de référence*



## 2.2 - Balance d'arrachement

### Expérience

Mesure de la tension de surface pour l'eau et l'éthanol. Etude statistique.

En théorie, 72mN/m pour l'eau distillée, 22mN/m pour l'éthanol. Attention au facteur 2 car deux interfaces.

Montrer l'influence des tensio-actifs. Il existe une concentration miscellaire critique.

## 2.3 - Montée capillaire

### Expérience

loi de Jurin, dispositif ENSL. Utiliser de l'éthanol qui permet d'avoir une interface plus plate. Important de monter le liquide avec une poire puis le laisser redescendre.

Relever la hauteur de montée pour plusieurs tubes, modéliser par une droite pour en déduire la tension de surface. Ne pas rincer à l'acétone car ça mange la colle.

Utiliser webcam ou projection par une lentille. Densité éthanol = 0,789. Approximation angle nul.

## 2.4 - Ondes gravito-capillaires

### Expérience

Cuve à ondes de surface. Déterminer le grandissement du système de projection de la cuve. puis la relation de dispersion. Justifier qu'on est dans l'approximation et remonter à une valeur de tension de surface en mesurant plusieurs fréquence puis régression linéaire. Mesure de la fréquence à l'oscilloscope et de la longueur d'onde en figeant avec un stroboscope. On prend  $hk > 1$  et donc  $th = 1$  environ. La longueur capillaire de l'eau est de 3mm, on sera entre les régimes gravitaire et capillaire, on considère donc les deux termes. On va de 30 à 100 Hz.

## 2.5 - Mouillage d'une surface solide

### Expérience

Projeter des surfaces de verre et téflon (ou plastique et noir de carbone sur bécher), déposer une goutte dessus.

Il existe un hystérésis, mesurer angles d'avancée et de reculée.

## Conclusion

Recherches en tribologie et pour optimiser les surfaces, en particulier hydrophobes.

### Avis

La méca flu est toujours à bien justifier physiquement.

### Remarques

L'hystérésis existe dans l'angle de mouillage, donc pour Jurin : utiliser poire pour faire monter le liquide et le laisser redescendre jusqu'à son équilibre, on obtient alors un angle de reculée qui permet de satisfaire davantage l'approximation  $\cos(\theta) = 1$ .

Ondes gravito-capillaires : il est bon de donner l'expression de la relation de dispersion avec la tangente hyperbolique et d'expliquer que l'on peut la négliger même avec une faible profondeur.

Loi de Tate possible. La tension capillaire permet de flotter (aiguille, insectes).

Ne pas s'affoler si on ne retrouve pas la bonne valeur de tension de surface : comme elle dépend énormément des conditions expérimentales et de la propreté des liquides, c'est pas étonnant. Utiliser des surfaces parfaitement propres, avant chaque mesure rincer avec le liquide qu'on va utiliser, évidemment prévoir un bécher poubelle à part.

Cuve à onde : lumière = bosse des vague car focalise les rayons.

Meilleure méthode = arrachement.

Stick-slip : modèle 1D et expérience 2D.

Tension de surface faible => étalement. Tension de surface élevée : goutte.

Instabilité de Rayleigh-Taylor = ce qu'on voit sur les toiles d'araignées, le fil, robinet.



**Ce que dit le jury...**

Évaluer le *nombre de Reynolds* et bien le discuter. Rendre l'expérience de l'écoulement de Poiseuille quantitative nécessite certaines précautions. Le principe des *anémomètres* utilisés doit être connu. Il serait bon que les candidats recherchent dans un handbook la valeur de la viscosité du corps étudié et sa dépendance en fonction de la température. Statique et diffusion de particules sont donc exclues. L'expression de la *force de Stokes* est connue, mais son origine (calcul, modèle, formule empirique?) et son domaine de validité le sont moins. Avoir à l'esprit les relations ou formules les plus importantes (*Euler, Bernoulli, Navier-Stokes*). Il convient également d'avoir une idée des domaines dans lesquels la résistance à l'avancement d'un fluide peut être représentée par une force d'intensité proportionnelle à la vitesse ou au carré de celle-ci. Il est nécessaire que le tube et le capteur soient fixés pour la mesure et non tenus à la main, comme c'est souvent le cas.

**Bibliographie**

*Guyon, Hydrodynamique physique* : Pour l'influence des parois, pour Poiseuille et la distance d'établissement.

*Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Mécanique* Pour la chute d'une bille (chute ralentie).

*Fiat, Toute la physique de SPE* : Pour noter les lois usuelles.

*Taillet, Dictionnaire de physique* : Pour des définitions des viscosités et leurs liens.

**Introduction**

Variétés de fluides et de régimes d'écoulement à peu près caractérisés par le nombre de Reynolds. Ici on considère des fluides newtoniens et des écoulements incompressibles.

**Expérience**

Mise en évidence de différents régime avec eau colorée dans pipette dans très grande ampoule à décanter de 4 litres (bonus). *pas de référence*

**1 - Viscosimètre à bille****Expérience**

Viscosimètre à bille ENSL avec l'huile de silicone étalonnée Rotitherm.

Vitesse limite donnée par la force de Stokes à justifier par une évaluation du nombre de Reynolds ( $Re < 1$ ).

Mesure pour plusieurs diamètres de billes.

Remonter à la viscosité par régression linéaire.

Comparer à la meilleure valeur trouvable dans le Handbook la cas échéant.

Etude statistique pour chaque diamètre de billes

Vérification des hypothèses : calcul du Reynolds (justifie Stokes), distance d'amortissement du transitoire inférieure au premier trait, influence des parois et du fond en %.

**2 - Ecoulement de Poiseuille****Expérience**

Mesure du débit en fonction de la différence de pression et en fonction de la longueur du tube avec de longs capillaire.

Comparer à la loi de Poiseuille.

En déduire la viscosité de l'eau.

Vérification des hypothèses : calcul du Reynolds ( $v=0.1\text{m/s}$  environ) pour justifier que le profil reste laminaire, la longueur d'établissement du profil non négligeable devant la longueur du tube explique la déviation à la loi de Poiseuille aux faibles longueurs de tube. Déduire la vitesse à partir du débit massique.

Remonter à la viscosité cinématique et comparer.

## Expérience

*Même chose mais avec le dispositif ENSL pour comparer les différents rayons. Problème si on fait ça : l'écoulement n'a pas le temps de s'établir.*

## 3 - Soufflerie

### 3.1 - Tube de Pitot

#### Expérience

*pas de référence*

*Air considéré incompressible car vitesse très inférieure à celle du son.  
Mesure de la vitesse à l'anémomètre à fil chaud, et la pression à la sonde Pitot.  
Vérifier Bernoulli en montrant une loi linéaire entre les deux grandeurs de cette façon.  
Retrouver la densité de l'air.*

### 3.2 - Force de traînée

#### Expérience

*pas de référence*

*Evaluer le nombre de Reynolds.  
Etudier la dépendance de la force avec la vitesse de l'écoulement après avoir préalablement étalonné le dynamomètre.  
Montrer l'évolution avec la carré de la vitesse.  
Montrer la dépendance en la surface de l'obstacle.  
Montrer la dépendance en la forme du profil.  
Bonus : Mesurer un coefficient de frottement  $C_x$ .*

## Conclusion

Profilage des voitures, des avions...

#### Avis

*De la méca flu donc pas mon domaine, mais il faut tout discuter du mieux possible.  
Les deux premières références se complètent très bien.  
Malgré tout c'est un montage normalement assez simple, même pour quelqu'un qui n'est pas fan de méca flu.*

#### Remarques

*La viscosité diminue avec la température comme  $\exp(1/T)$ .  
 $Re < 1$  écoulement rampant.  $Re < 1000$  écoulement laminaire.  $Re > 1000$  écoulement turbulent.  
Ne pas avoir de goutte à goutte sinon la pression n'est pas homogène. Discuter la longueur d'établissement.  
Remplir la sonde de Pitot avec de l'éthanol. Mesurer la vitesse en dessous de l'obstacle.  
Utiliser huile rotitherme car on connaît sa viscosité et ne s'hydrate pas.  
On ne peut pas classer/comparer les manip avec le nombre de Reynolds car la géométrie des expériences n'est pas la même. Point blanc repère sur la grille de la soufflerie.  
Régler le zéro du ressort avec la vis de droite, ne pas se fier aux graduations.  
La force de Stokes se démontre.  
L'anémomètre à fil chaud est basé sur un asservissement par courant et effet Joule.  
Tube de Pitot : En l'absence de pesanteur, la variation de pression est nulle orthogonalement à l'écoulement, fonctionnement basé sur Bernoulli. Il est gradué en mm d'eau.  
Dynamomètre : 1 div = qqz dizaines de mN.*

## Ce que dit le jury...

*Hierarchie des capteurs et notion de point fixe. Echelles secondaires de température (résistance de platine). Les mécanismes physiques mis en jeu dans les différents capteurs utilisés doivent être connus, tout comme leur validité. Faire la différence entre mesure et repérage de température. Ce montage ne peut pas se résumer à une simple comparaison de capteurs. La notion d'échelle de température doit être dégagée. Le jury rappelle le statut particulier des thermomètres de référence (thermomètre à gaz et résistance de platine) et des points fixes. Deux types de thermistances existent, dénommées CTP lorsque la résistance augmente avec la température, et CTN dans le cas contraire. Il convient d'explorer une gamme de températures suffisamment large si l'on veut vérifier une relation sinon on voit toujours une droite. C'est de la métrologie. On doit voir des étalonnages et des mesures.*

## Bibliographie

*Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Thermodynamique : Pour l'introduction et la théorie (échelle thermométrique, effets thermoélectriques), l'expérience sur le thermomètre à gaz où on trace les isothermes (gaz), la loi de Stefan.*

*BFR, Thermodynamique : Pour échelles thermométriques, effets thermoélectriques. A relire absolument, il y a quasiment tout.*

*Pérez, Thermodynamique : Pour la Pt100 et plus de théorie sur Onsager et compagnie.*

*Taillet, Dictionnaire de physique : Pour la loi de Stefan, et puis toujours utile.*

## Introduction

Notion de température par nos sens. Différence entre repérage et mesure. Nécessité des points fixes pour définir une échelle.

## 1 - Echelle thermométrique absolue de température

## 1.1 - Gaz parfait, étalon primaire

On s'intéresse à des gaz, donc P,V,T à N fixé.

## Expérience

*On trace  $PV=f(P)$  pour  $SF_6$  dans le dispositif habituel et l'air dans une seringue dans un thermostat. Tracer à  $20^\circ$  et  $40^\circ$  pour chaque gaz. Extrapoler la courbe à pression nulle. Le rapport des valeurs doit être égal au rapport des températures en kelvin et indépendante du gaz. Choisir la position initiale du piston avant de brancher le baromètre pour aller aussi en sous-pression (tester à vide si on y a arrive). Fixation à tenter.*

Conclure quand au choix de PV pour P tend vers zéro comme grandeur thermométrique de référence.

## 1.2 - Détermination de la température d'ébullition de l'eau

## Expérience

*On utilise notre thermomètre seringue pour déterminer un point fixe. On mesure la pression de la pièce (à faire avant) puis les produits PV dans l'eau glacée et dans l'eau en ébullition (ballon ou plaque chauffante). On extrapole à  $P=0$  puis on fait le rapport. En admettant le point fixe de la glace, on en déduit la température d'ébullition.*

## 2 - Echelle internationale pratique de température (E IPT)

## 2.1 - La Pt100, un étalon secondaire

En pratique on préfère des thermomètre étalonnés d'usage plus simple. Par exemple la Pt100 dont on explique le principe (thermorésistance), qui est le thermomètre légal.

## Expérience

*Etalonnage (en fait on retrouve les coefficients) de la Pt100 avec 3 points fixes : glace fondante, eau bouillante, fusion de l'étain (oscillo en roll pour voir le palier en refroidissant). On effectue une mesure 4 fils avec un courant très faible (appareil spécial possible). On peut illustrer l'auto-échauffement en passant de 1 à 10mA.*

## 2.2 - Comparaison de différents thermomètres

### Expérience

*Eau glacée : on plonge les thermomètres (thermocouple type K, thermistance CTN, thermomètre à alcool, Pt100 pour la température) un par un en mesurant leur temps de réponse et la valeur mesurée.*

*pas de référence*

*Thermostat : On va de  $T_{amb}$  à  $80^{\circ}\text{C}$  en plongeant tous les thermomètre dedans. On fait des mesures tous les  $10^{\circ}\text{C}$ . On trace ensuite tout. Ne pas utiliser de CTP car moins simple.*

*Discuter les différents capteurs (linéarité, sensibilité, fidélité, temps de réponse.*

## 3 - Extension de l'EIPT aux hautes températures

### 3.1 - Principe du pyromètre

Exposer le principe du pyromètre (comparaison au spectre du corps noir).

### 3.2 - Loi de Stefan

On va vérifier cette loi.

#### Expérience

*Loi de Stefan : Avec Wattmètre sur le secteur (variateur) et pyromètre optique en mode 2C (couleurs).*

*- Remonter à l'exposant 4 par un fit en log.*

*- Déduire la valeur de la constante de Stefan si on a le temps.*

*On suppose un rendement de 95% de la lampe et on corrige car c'est un corps gris.*

## Conclusion

Revenir sur la progression :

- thermomètres primaires (Gaz parfait, points fixes)
- thermomètres secondaires (grandeur thermométrique étalonnée)
- extrapolation à hautes températures par le corps noir.

### Avis

*Montage présenté par mon binôme. Les expériences sont longues. Plutôt chauffer que refroidir.*

### Remarques

*Il y a toujours beaucoup de fuites dans le thermomètre à gaz. Le capteur doit avoir une faible capacité calorifique. Les bons thermomètres à alcool ont un trait de jauge. La résistance de la Pt100 varie. La mesure de température par des thermocouples est basée sur l'effet Seebeck.*

*Semi-conducteur : R diminue avec T car le nombre de porteur de charges (le type dépend du semi-conducteur) varie en  $\exp(-E/kT)$  et augmente. Métal : collisions avec phonons, R augmente si T augmente.*

*L'hexafluorure de soufre doit être utilisé en dessous de la température critique de  $45^{\circ}\text{C}$ . La seringue doit être à quantité de matière constante.*

*Pour les thermomètre à résistance, il y a compromis échauffement/signal.*

*Ne pas confondre sensibilité et précision.*

*Pour la loi de Stefan, ne pas oublier l'importance du verre lors de l'utilisation du pyromètre.*

*Si températures de changement d'état, préciser la pression fixe pour variance nulle.*

*Temps de réponse lié à la diffusivité thermique. Une autre limitation vient de la couche limite si écoulement.*

*Avec 3 points on ne vérifie pas la loi de la Pt100. Aux basses températures, la résistance ne diminue plus à cause des impuretés du réseau cristallin. Thermocouples sont sensibles, rapides, différentiels (possible avec Pt100 et pont).*

*Attention, une échelle thermométrique (centigrade, basée sur l'eau, qu'on peut construire, mais obsolète), permet seulement le repérage d'une température et le résultat dépend du thermomètre. L'échelle thermodynamique de température par la mesure de points fixes est liée aux lois physiques universelles.*

*La sensibilité est définie comme  $s = \frac{1}{X} \frac{dX}{dT}$ . Le temps de réponse dépend du conditionnement du thermomètre.*

**Ce que dit le jury...**

Ce montage peut et doit être *quantitatif*. Conditions permettant d'atteindre l'équilibre thermodynamique. Mesures à la volée sont souvent très imprécises. La *chaleur latente* peut provenir de mesures calorimétriques, pas seulement de la courbe  $p(T)$ . La notion de chaleur latente est trop souvent absente. *Anticiper* le démarrage des expériences. Il faut *corriger* les imperfections des calorimètres.

**Bibliographie**

*JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour la recalescence du fer.*

*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour la calorimétrie et la correction des pertes.*

*Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Thermodynamique : Pour la recalescence du fer aussi (transitions de phase), la fusion de l'eau (calorimétrie), SF<sub>6</sub> (vaporisation), opalescence critique (point critique), la supraconductivité (conductivité).*

*Fiat, Toute la physique de SPE : Pour la formule de Clapeyron.*

*Taillet, Dictionnaire de physique : Pour les définitions et classifications.*

*Pérez, Thermodynamique : Pour un mot ou deux sur les transitions cond/supra et ferro/para.*

**Introduction**

Définir une phase, une transition de phase. Classification d'Ehrenfest : ordre  $n$  = discontinuité de la dérivée  $n$ -ième du potentiel thermodynamique. Paramètre d'ordre discontinu pour transition d'ordre 1.

**1 - Transitions du premier ordre****1.1 - Solide-solide****Expérience**

*Recalcescence du fer.*

*- On chauffe le fil, il se dilate donc la masse descend, le fer change de variété allotropique mais cela n'est pas visible car va dans le même sens que la dilatation thermique.*

*On coupe le courant, le fil se refroidit et se rétracte se transforme en fer  $\gamma$  qui est une forme plus compacte, donc la rétractation est plus grande (et donc pas très visible).*

*- A 906°C le fer  $\gamma$  va se retransformer en fer  $\alpha$  qui est moins compact et ainsi le fil va se dilater de manière plus importante que la rétractation due à la température et on voit ainsi la masse redescendre.*

*Utiliser une flexcam.*

On en déduit que le fer gamma est plus dense que le fer alpha. La paramètre d'ordre est la masse volumique.

**1.2 - Liquide-vapeur****Expérience**

*Mesure calorimétrique de la chaleur latente de fusion de l'eau.*

*Etalonner le calorimètre puis utiliser un glaçon fondant.*

*Relever très régulièrement la température (20s).*

*Corriger les pertes.*

*Déterminer l'enthalpie de changement d'état (=chaleur latente) et comparer aux valeurs tabulées.*

**1.3 - Diagramme de Clapeyron****Expérience**

*Isothermes de SF<sub>6</sub> du froid vers le chaud. Tracer des isothermes d'Andrews, déduire la courbe de saturation.*

*Mettre en évidence la discontinuité de volume.*

*Déduire la quantité de matière contenue dans l'ampoule.*

*Mesurer la chaleur latente de vaporisation via la formule de Clapeyron.*

*Autour du point critique la transition est d'ordre deux.*



## 2 - Transitions du second ordre

### 2.1 - Opalescence critique

#### Expérience

*Se mettre au voisinage du point critique, le dépasser légèrement en température, puis poser un béccher de glace sur la cellule. Projeter avec QI et AC puis lentille. Ce phénomène est dû à la fluctuation importante de l'indice optique.*

### 2.2 - Supraconductivité

#### Expérience

*On utilise l'expérience ENSL prévue pour. On mesure à la fois la résistance et la température. référence partielle On plonge le tout dans l'azote liquide (77K), puis on laisse réchauffer dans un autre Dewar préalablement refroidi. Mettre les deux signaux sur synchronie en amplifiant/filtrant si besoin. Comparer à la température de transition attendue (90K environ). L'idéal serait de prendre un nanovoltmètre Keythley.*

### 2.3 - Ferromagnétique/Paramagnétique

#### Expérience

*Chauffer le clou avec le thermocouple prévu pour ça à l'aide d'une lampe à souder. Bien protéger l'aimant derrière une plaque réfractaire. Estimer la température de transition de phase.*

La paramètre d'ordre est alors l'aimantation.

## 3 - Retard à la transition

3.1 - Surfusion de l'eau. Tube à essai dans de la glace. On atteint  $-5^{\circ}\text{C}$  puis on perturbe et on observe la solidification immédiate.

#### Expérience

*Surfusion de l'eau*

*pas de référence*

Dire que c'est utilisé dans les gadgets chauffants.

3.2 - Surfusion de l'étain

#### Expérience

*Observer la surfusion et mesurer la température de transition grâce au palier. Chauffer dans un creuset au bec bunsen et mesurer à l'aide d'un thermocouple prévu pour ça ou d'une Pt100 prévue pour ça. Dans l'idéal utiliser oscilloscope en mode roll puis STOP ou le nanovoltmètre avec sortie sur synchronie. pas de référence*

## Conclusion

Application aux machines thermiques.

#### Avis

*Pas de grosse difficulté si ce n'est le fond.*

#### Remarques

*Une transition de phase est associée à des discontinuités. Notion de coexistence = plateau pour des transitions d'ordre deux. La transition ferro/para n'est du second ordre (troisième selon Pérez) qu'en champ nul. Il existe aussi la superfluidité de l'hélium 3 (2mK). Une application possible de la variation brutale de la résistivité est l'utilisation du dispositif en thermomètre de très forte sensibilité, cela donne également un point fixe en thermométrie. la théorie BCS avec les paires de Cooper n'est valable qu'à faibles températures. Ici avec  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , on est à haute température et cette théorie ne s'applique pas. Les atomes d'hélium 4 sont des bosons qui peuvent subir une transition proche d'une condensation de Bose-Einstein (mais il s'agit d'un liquide, pas d'un gaz parfait). Il existe également deux transitions superfluides pour l'hélium 3 (appelées He-3A et He-3B) à des températures beaucoup plus basses. Les atomes d'hélium 3 sont des fermions donc la physique de la transition est plus complexe que pour l'hélium 4. Fer alpha = cubique. Fer gamma = cubique faces centrées.*



**Ce que dit le jury...**

Connaître et comprendre les conditions d'obtention d'images de *bonne qualité*. Ne faut pas appliquer sans discernement un protocole trouvé dans un livre. Les conditions de *stigmatisme* (approché ou rigoureux), les conditions de Gauss, les aberrations géométriques et les aberrations chromatiques ... doivent être connues. Les manipulations proposées doivent illustrer réellement le *fonctionnement* de l'instrument choisi. Il s'agit ici de savoir former des images et pas seulement d'en étudier tous les défauts. Il est intéressant d'illustrer l'effet du *verre de champ* d'un instrument d'optique en expliquant son intérêt. On peut aussi souligner comment les qualités du récepteur jouent sur la résolution spatiale d'un instrument objectif.

**Bibliographie**

*Duffait, Expériences d'optique* ; Pour le montage en version rapide, le critère de Rayleigh.  
*Houard, Optique* : Pour tout ce qu'il faut savoir, les schémas.  
*Taillet, Dictionnaire de physique* : Pour la définition de la clarté.  
*Pérez, Optique* : Pour la différence entre pupille et lucarne.

**Introduction**

Limitation de la résolution de l'oeil, intérêt de la lunette astro sur laquelle on centre le montage.

**1 - Présentation du montage****Expérience**

Créer un objet à l'infini (utiliser des barres).  
 Créer un oeil qui fait l'image d'un objet à l'infini sur un écran.  
 Intercaler la lunette (40 et 16 cm).  
 Faire une remarque sur le sens de l'image.

*référence partielle***2 - Mesure du grossissement****Expérience**

Vérification de la loi du grossissement (égal au grandissement angulaire dans ce cas particulier) pour différents couples de lentilles formant la lunette astronomique. Obtenir une droite.

*référence partielle***3 - Diaphragmes d'ouverture et de champ****Expérience**

Mettre en évidence le rôle du diaphragme d'ouverture.  
 Montrer le cercle oculaire, vérifier l'autre formule du grossissement en fonction du diamètre du diaphragme d'ouverture et du cercle oculaire.  
 Placer l'oeil au cercle oculaire. Notion de grossissement équipupillaire.

*référence partielle***Expérience**

Mettre en évidence le rôle du diaphragme de champ.  
 Montrer le vignettage.  
 Le placer à l'image intermédiaire pour faire disparaître le vignettage.  
 Montrer le rôle du verre de champ.

*référence partielle*

Attention, Il faut choisir une lentille de grand diamètre pour l'objectif, et de petit diamètre pour l'oculaire pour bien séparer les rôles, et utiliser une grille comme objet pour compter le nombre de carreau dans les différents champs. Constaté les différences avec deux jeux de lentilles.

# 4 - Pouvoir de résolution

## Expérience

pas de référence

Expérience avec Caliens et oscilloscope, un jeu de bifentes d'épaisseur différentes, et une unique lentille. Montrer la limitation due au « grain » du récepteur. Montrer le critère de Rayleigh dû à la diffraction en rajoutant une fente réglable ou en bougeant/changeant les fentes. On peut même en faire sa mesure ou illustrer au laser avec ce qui suit (bonus).

Résolution de la lunette : avec bifente de séparation connue comme objet.

- Fente en entrée de la lunette, qu'on diminue jusqu'à brouillage (=influence du diaphragme de champ.).
  - Enlever la fente et pointer avec un laser et une lame semi-réfléchissante l'image d'une des fentes à travers la lunette.
  - Mettre la fente avec le même écartement en sortie du laser et mesurer d'écartement de la fente grace à la figure de sinus cardinal où les zéro sont à  $\theta = \lambda/d$ , et theta par simple trigonométrie avec les bifentes.
- Vérifier cette formule avec trois bifentes et deux longueurs d'onde. Comparer à la valeur pour l'oeil.

# 5 - Clarté

## Expérience

référence partielle

Vérification de la loi de la clarté pour des objets étendus avec un luxmètre.  
En déduire taux de transmission de la lunette.

# Conclusion

En pratique, monture = diaphragme. Il existe d'autres instruments.

## Avis

Seulement deux manips, avec les avantages et les inconvénients qui vont avec. Bonus = mesure des focales par la méthode de Bessel. Pas de protocole pas à pas bien entendu mais tout est dans les livres.

## Remarques

L'image est à l'envers sur l'écran mais pas pour la rétine car le cerveau se charge de les retourner. La mesure du grossissement doit être propre. Mesurer les focales. La connaissance des diaphragmes d'ouverture et de champ est incontournable. La monture de l'objectif ne joue pas toujours le rôle de diaphragme d'ouverture, la monture de l'oculaire celui de diaphragme de champ. Il est bien de montrer l'effet d'un verre de champ, on peut également montrer le champ de contour et comment on l'élimine. Le ratio des diamètres du diaphragme d'ouverture et du cercle oculaire redonnent le grossissement de la lunette (ce qui est normal). Unités liées au flux de photons et au flux lumineux. Clarté pour objet étendu. Sur la manip de la résolution, on illustre un appareil photo à une seule ligne de pixel. Il faut collecter de la lumière donc la taille du diamètre de l'objectif est prise grande. On prend un fort grossissement donc on a un champ réduit, d'où la nécessité d'avoir une petite lunette de visée avec un faible grossissement et un grand champ. Cacher les lumières parasites. Ne pas personnaliser le matériel. Pour la lunette de Galilée, l'oculaire est une lentille divergente.  $lux = \frac{cd \cdot strad}{m^2}$ . Le luxmètre répond comme l'oeil. Il faut observer au cercle oculaire. Pupilles pour l'ouverture, lucarnes pour le champ.

MPO6 Instrument(s) d'optique

I La lunette astronomique

Objet à l'infini      Lunette      Œil

☒ Système afocal

II Grossissement

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{f'_{ob}}{f'_{oc}}$$

$$\frac{\Delta(\frac{\alpha'}{\alpha})}{(\frac{\alpha'}{\alpha})} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\alpha'}{\alpha'}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)^2}$$

Exp:

$$\begin{cases} f'_{ob} = \\ f'_{oc} = \end{cases} \Rightarrow G_{th} =$$

$$\begin{cases} \alpha' = \\ \alpha = \end{cases} \Rightarrow G_{exp} =$$

III Diaphragme d'ouverture et de champ

☒ Diaphragme d'ouverture = objectif  
☒ Diaphragme de champ = plan focal image de l'objectif

IV Clarté

$$C' = \frac{\phi'}{\phi} = T \left( \frac{D}{d_o G} \right)^2$$

Exp:  $\phi =$   
 $D =$        $\Rightarrow \phi' =$

V Limite de résolution

$$D = \frac{\lambda f'}{Ga}$$

**Ce que dit le jury...**

Les dispositifs d'interférences sont très *divers*. En choisir deux bien maîtrisés permet des présentations de qualité sur les *cohérences spatiale et temporelle*. Des montages bien réglés et bien utilisés fournissent des résultats *quantitatifs* précis si le candidat s'y prend bien. Il ne faut pas confondre les annulations périodiques de contraste obtenues avec un doublet (souvent le doublet jaune du sodium) et la teinte plate de fin de cohérence temporelle due à une trop grande différence de marche. Les battements de contraste donnent des informations sur l'écart des longueurs d'onde entre les 2 raies du doublet, mais ne donnent pas d'information sur la longueur de cohérence de la source lumineuse. Les interférences ne se limitent pas à l'addition de deux ondes. On doit montrer leur intérêt dans le cas du *réseau de diffraction* ou de l'interféromètre de *Perot-Fabry*. Pour illustrer la cohérence temporelle, il est maladroit de mesurer l'écart d'un doublet. Il convient plutôt d'illustrer cette notion à partir de la largeur d'une raie. Trop de candidats ne maîtrisent pas les notions de *localisation* ou de non-localisation des interférences lumineuses. Quant à la définition correcte de la cohérence spatiale et de l'échelle ou de l'aire de cohérence, aucun candidat ayant pourtant choisi un sujet s'y rapportant (interférences, diffraction, laser) n'a pu la donner. Certains connaissent pourtant la définition des fonctions de corrélation et le théorème de *Wiener-Kintchine*. Dans tous les cas, le jury attend des approches quantitatives sur la *mesure* de la cohérence temporelle et de la cohérence spatiale d'une vibration lumineuse.

**Bibliographie**

*Duffait, Expériences d'optique* : Pour Fresnel-Arago, fentes d'Young, localisation michelson, spectro par TF

*Sextant, Optique expérimentale* : Pour le Michelson et la cohérence spatiale.

*Pérez, Optique* : Pour l'intérêt du Michelson et beaucoup de formules si besoin.

**Introduction**

Définition d'interférence, rappel des conditions théoriques d'obtention (source unique, ponctuelle et monochromatique). Et en pratique ?

**Expérience**

Prendre une fente, puis deux : on voit apparaître des franges d'interférences dans la figure de diffraction. pas de référence

**1 - Interféromètre à division du front d'onde : fentes d'Young****1.1 - Cohérence temporelle****Expérience**

Eclairage en lumière blanche, utiliser Caliens. On utilise le rouleau de sopalin tenu par un diaphragme. Fentes à un bout et Caliens à l'autre. Mesurer l'interfrange en fonction de la longueur d'onde pour différents filtres interférentiels et lasers. Remonter à l'écart entre les fentes. Comparer. Bien compacter et optimiser. Ne pas oublier condenseur et anticalorique. Approcher les bifentes autant que possible de la fente source : les deux bifentes doivent être pile dans la tâche de la fente source. référence partielle

**1.2 - Cohérence spatiale****Expérience**

Mettre en évidence le brouillage et l'inversion de contraste (ne pas oublier qu'on est modélisé par un sinus cardinal), à la fois en ouvrant la fente source et en la rapprochant des bifentes. Conclure que la cohérence spatiale tient compte à la fois de la source et de l'interféromètre. Mesurer l'angle pour lequel le contraste s'annule.

Expliquer l'intérêt du Michelson et de la division d'amplitude.

## 2 - Interféromètre à division d'amplitude : le Michelson

### 2.1 - Cohérence spatiale et localisation

#### Expérience

Régler avec laser puis lampe Hg + gélatine verte en lame d'air avec technique "Fabry Pérot". <sup>référence partielle</sup> Passer ensuite en lumière blanche. Ne pas oublier condenseur et lentilles de projection. Montrer la localisation.

### 2.2 - Mesure de la largeur spectrale d'une raie

#### Expérience

Configuration lame d'air, lampe Hg, raie verte isolée avec une gélatine. Chariotter avec le moteur, acquérir avec Caliens et faire la FFT. Si ça rate, on peut chariotter à la main, mesurer le contraste pour des valeurs bien choisies et se contenter d'une discussion qualitative. On doit aboutir à une gaussienne, de laquelle on extrait la longueur de cohérence temporelle, puis la largeur spectrale de la source. On utilise ici le théorème de Wiener-Kinchine. On peut aussi étudier un filtre interférentiel, beaucoup plus large, voir la lampe QI en cas d'urgence.

## 3 - Interférences en lumière polarisée

#### Expérience

Expérience de Fresnel-Arago. Jeu de miroirs et polariseurs et microscope, montrer que deux ondes polarisées orthogonalement n'interfèrent pas entre elles. Mettre des courtes focales au début pour faire source laser élargie. Utiliser lentille de microscope 40x pour projection à la fin.

## Conclusion

Revenir sur les deux cohérences, temporelle (intrinsèque à la source) et spatiale (due à la façon dont le dispositif voit une source étendue), et sur les façons de les éviter (division d'amplitude et filtres interférentiels).

#### Avis

Notions de cohérences (temporelle, spatiale, de polarisation) à bien illustrer... et donc à comprendre sur des exemple clairs.

#### Remarques

Attention à l'alignement. Le Michelson permet de s'affranchir de la cohérence spatiale. Protéger caliens avec rouleau de sopalin. La fente source permet de rendre la lumière cohérente (ponctuel selon une direction). Grand débat sur la notion de cohérence temporelle, ne pas en parler apparemment si on a un doublet car relatif pour la correcteur à une raie d'émission atomique. Expliquer à chaque fois pourquoi on a des interférences : champ d'interférence, cohérence, localisation. Ne surtout pas toucher aux fentes d'Young après avoir fait l'étalonnage interfrange/longueur d'onde. Utiliser le Michelson de Lyon et les lentilles et pieds de Cachan. Allumer Caliens puis démarrer le logiciel. Le paramètre pertinent pour quantifier la cohérence spatiale est l'angle sous lequel on voit la fente source depuis l'interféromètre. La cohérence temporelle est la perte de contraste d'une figure d'interférence lorsque la différence de marche devient trop grande. Ce phénomène est dû à la largeur finie des raies spectrales. Il ne faut surtout pas présenter la résolution du doublet du sodium comme une expérience de cohérence temporelle. Etudier la raie verte du mercure isolée par une gélatine. Pour Fresnel-Arago, le choix de l'objectif de microscope est important. On est passé d'un dispositif de division du front d'onde à un dispositif de division d'amplitude, qui nous a permis d'avoir un meilleur contraste, au prix de la localisation des figures d'interférence.

**Ce que dit le jury...**

La différence entre diffraction de *Fraunhofer* et diffraction de *Fresnel* doit être connue, et l'on doit s'assurer que les conditions de Fraunhofer (tant sur l'onde incidente que sur le plan d'observation) sont remplies. Les phénomènes de diffraction peuvent s'observer avec d'autres sources lumineuses que des lasers, dont le speckle peut parfois nuire à la précision des mesures. A propos des réseaux : attention aux protocoles de réglages : alignements (bancs d'optique conseillés), orientation, hauteur, conditions de Fraunhofer. Attention aux conditions de validité des relations employées : l'angle d'incidence n'est pas toujours nul (par exemple dans la relation de Bragg) : on peut avoir intérêt ou pas, à se placer à un minimum de déviation. Les figures sont de bien meilleure qualité quand les appareils sont convenablement alignés. Il ne suffit pas de présenter des expériences du niveau de la classe de seconde. Dans les expériences de filtrage spatial de type passe-haut, l'utilisation d'objets de phase serait certainement plus pertinente que celle d'une plume. La diffraction est certes un phénomène gênant, mais pas uniquement : le principe de fonctionnement d'instruments comme les réseaux optiques repose sur son existence. L'optique diffractive prend de plus en plus d'importance industrielle. Le filtrage en éclairage incohérent a aussi des applications. La strioscopie est rarement montrée dans de bonnes conditions, la conduite de cette expérience exige une certaine maîtrise théorique du sujet.

**Bibliographie**

Duffait, *Expériences d'optique* : Pour Fresnel par un trou, Abbe, Strioscopie.  
 Sextant, *Optique expérimentale* : Pour de Fresnel à Fraunhofer, limite de résolution.  
 Howard, *Optique* : Pour les fils.

**Introduction**

Limites de l'optique géométrique.

**Expérience**

Fermer une fente éclairée par un faisceau laser.

*pas de référence*

**1 - De Fresnel à Fraunhofer****1.1 - Nombre de Fresnel****Expérience**

Faire la diffraction par un trou. Observer qu'on a deux limites distinctes selon que la figure de diffraction est dans ou hors de l'image géométrique. Dans ces deux conditions, estimer le nombre de Fresnel pour introduire les deux types de diffraction. Banc d'optique.

*référence partielle*

**1.2 - Ouverture circulaire****Expérience**

Diffraction d'un laser par un trou. Vérifier la loi des rayons. Si on enlève la dernière lentille. Placer l'écran très loin pour dire qu'on observe le plan focal.

**2 - Diffraction de Fraunhofer****2.1 - Propriétés****Expérience**

Revenir sur les conditions de l'approximation et justifier le montage. Faire la diffraction par une fente et montrer les propriétés de la figure de diffraction : invariance par translation, rotation en bloc, homothétie, complémentarité.

*pas de référence*



## 2.2 - Mesure du diamètre d'un fil

### Expérience

Mesurer pour plusieurs fils l'écart des  $N$  tâches centrales. Vérifier la linéarité. Pour un fil inconnu, idéalement un cheveu, utiliser la courbe d'étalonnage ainsi établie pour déduire sa taille.

## 3 - Filtrage

### 3.1 - Strioscopie

#### Expérience

Trace de doigts sur plaque de microscope super propre. Utiliser diapositive avec la tête d'épingle.

### 3.2 - Expérience d'Abbe

#### Expérience

Montage  $4f$  avec fente dans le plan de Fourier (on peut le montrer avec laser si besoin, et lame semi-réfléchissante). Faire le reste de l'expérience en lumière blanche.

## 4 - Application : Réseau et spectroscopie

### Expérience

Montrer simplement la décomposition de la lumière par un réseau, éclairé bien comme il faut surtout. *pas de référence*

## 5 - Limite de résolution

### Expérience

Retour sur les bifentes. On ajoute en amont une fente diffractante. On diminue jusqu'à brouillage. Enlever la fente et pointer avec un laser l'image d'une des fentes. *référence partielle*

Mettre la fente avec le même écartement en sortie du laser et mesurer d'écartement de la fente grâce à la figure de sinus cardinal où les zéro sont à  $\theta = \lambda/d$ , et theta par simple trigonométrie avec les bifentes.

Vérifier cette formule avec trois bifentes et deux longueurs d'onde. Comparer cette limite avec la valeur théorique pour l'oeil.

## Conclusion

La diffraction n'est pas toujours gênante, elle est utilisée en spectroscopie avec les réseaux, le filtrage, et l'analyse interne de la matière, par exemple la découverte de la structure en double hélice de l'ADN.

### Avis

Vive la diffraction !

### Remarques

Lentille de projection = convergente de courte focale avec écran placé loin. On forme l'image sur l'écran environ du plan focal objet de la lentille. Déplacer la lentille de projection en gardant l'écran fixe permet d'observer sur l'écran différents plans objets. Il faut des expériences visibles. Attention aux lasers. Le faisceau laser n'est onde plane que proche de la sortie. Il y a dans le nombre de Fresnel une contribution source et une contribution image. Si  $N$  objets, on peut parler du facteur de forme et du facteur de structure. Facteur de structure : interférence des ondes diffusées par les atomes de la maille. Facteur de forme : interférence des ondes diffractées par les différentes mailles. Estimer en direct un ordre de grandeur du nombre de Fresnel dans chacune des configurations extrêmes. Il faut être capable de poser la lentille à peu près au bon endroit. Une fois les mesures de préparation prises, il ne faut plus toucher à la diffraction de Fresnel qui est très sensible aux distances laser-source et source-écran. Un choix discuté est de pas ou peu présenter de diffraction par un objet périodique type réseau. Dans le cas des réseaux, le terme de diffraction d'une seule fente est modulé par le terme d'interférence à  $N$  fentes, d'autant plus fin que  $N$  est grand (imbrication de deux sinus cardinal).



**Ce que dit le jury...**

Quel que soit l'appareil de mesure utilisé, notamment le *spectromètre* à entrée fibrée interfacé avec l'ordinateur (qui ne doit pas être exclusif), son principe et sa manipulation doivent être connus. Le *prisme* à vision directe doit être réservé aux observations qualitatives. Le *pouvoir de résolution* des appareils doit être connu et leurs limitations discutées. Dans le cas où un candidat souhaite utiliser un spectromètre qu'il a réalisé lui-même, il est rappelé que la mesure des angles au goniomètre est bien plus précise qu'avec une règle sur un écran. La spectrométrie par transformée de Fourier, souvent réalisée de façon semi-quantitative sur les raies du mercure ou du sodium, se prête à un enregistrement numérique. Si le cœur du sujet est la *mesure de longueurs d'onde*, les phénomènes qui affectent la résolution des spectromètres ne doivent pas être ignorés, dont la *largeur de la fente d'entrée*. L'utilisation de montages avec *réseaux* doit être mieux maîtrisée, en évitant de confondre angles et déviations par rapport à l'ordre zéro. Les conditions de Fraunhofer gagneraient à être connues. Le jury apprécie aussi l'utilisation de spectromètres à fentes traditionnels lorsqu'un grand pouvoir de résolution est nécessaire ou lorsqu'on cherche à illustrer quantitativement le rôle des fentes d'entrée et de sortie sur les performances des spectromètres, rôle souvent plus important que celui de la diffraction. Un des objectifs du montage est de montrer le rôle respectif de ces paramètres. Ce montage est en général très mal traité. Le fait de montrer la dispersion par un prisme est bien entendu loin d'être suffisant. Rappelons que les prismes et les réseaux doivent être utilisés en lumière parallèle. La notion de fonction d'appareil est bien souvent complètement ignorée.

**Bibliographie**

*Duffait, Expériences d'optique* : Pour Rydberg et le réseau aussi, la TF, le doublet du sodium, Fabry-Pérot aussi.

*Sextant, Optique expérimentale* : Pour le PVD, le réseau, les isotopes avec Fabry-Pérot.

*Taillet, Dictionnaire de physique* : Pour la définition du pouvoir de résolution.

**Introduction**

But et le principe de la spectroscopie. Nommer les deux types de dispositifs : interférentiel et dispersif. On va aller de plus en plus précis.

**Expérience**

*Prisme à vision directe et lumière blanche.*

*Rappeler la variation de l'indice optique avec la longueur d'onde.*

*Estimer son pouvoir de résolution avec le doublet jaune du mercure et une fente.*

*Au pire majorer par le doublet jaune du mercure.*

*référence partielle*

**1 - Spectrométrie dispersive : Le réseau****1.1 - Résolution, étalonnage et mesure****Expérience**

*Utiliser un réseau et lampe à vapeur de mercure, faire l'image de la fente.*

*Rappeler la définition du pouvoir de résolution et la formule des réseaux.*

*Étalonner le réseau avec la distance à l'ordre zéro, on peut voir l'UV avec une feuille (linéaire aux petits angles).*

*Montrer l'influence du nombre de traits/mm, du nombre de traits éclairés, de la largeur de la fente source, de l'ordre, de blazage.*

*Mettre en évidence l'influence de la fente d'entrée sur la résolution du doublet jaune du mercure (600 traits/mm).*

*Discuter la précision.*

*Mesurer la longueur d'onde du doublet de Sodium en montrant qu'on n'arrive pas à le résoudre.*

*Encadrer ainsi le pouvoir de résolution.*

## 1.2 - Constante de Rydberg

### Expérience

*Avec une lampe à hydrogène et le modèle commercial (à étalonner si besoin), remonter à la valeur de la constante de Rydberg.*

## 2 - Spectrométrie interférentielle : Michelson et TF

### 2.1 - Résolution du doublet du sodium

#### Expérience

*Michelson en lame d'air, régler comme toujours avec raie verte du mercure.  
Lampe au sodium dont on veut séparer le doublet.  
Observer la résolution sur l'écran.  
Mesurer la période des battements. Conclure sur le pouvoir de résolution.  
On peut aussi faire le contraste point par point puis fitter le log.*

### 2.2 - Transformée de Fourier

#### Expérience

*Faire une acquisition au moteur de la raie verte du mercure et déduire sa largeur spectrale et donc sa longueur de cohérence.  
Si possible utiliser une photodiode pour acquérir sur synchronie plutôt que sur Caliens.  
Ici on a même accès à la forme du spectre.*

## 3 - Cavité confocale Fabry-Pérot

### Expérience

*Régler avec la méthode habituelle (Laser puis Hg + dépoli et oeil).  
Constater qu'on résout le doublet du sodium sans problème.  
Tenter de voir une différence isotopique avec la lampe à hydrogène.  
Conclure sur le pouvoir de résolution (bonus).*

## Conclusion

Permet de caractériser la source via l'étude de la lumière émise.

Très utilisé, par exemple pour accéder à la température (via la loi du corps noir), la vitesse (via effet Doppler), le champ magnétique (via effet Zeeman).

### Avis

*Un montage pas simple du tout en fait et sûrement trop long.*

### Remarques

*Si on déplace le réseau sans faire exprès, le re-étalonner.  
Le montage est orienté métrologie.  
PVD = 3 prismes.  
Ecrire les valeurs tabulées au tableau.  
Interférences en fait pas exactement sur les miroirs quand le Michelson est en coin d'air, un peu à coté.  
Bien gérer l'éclairage.  
Bien faire l'image d'une fente sur l'écran lorsqu'on utilise le PVD.  
Ne pas confondre système dispersif et milieu dispersif.  
Résolution en  $N \cdot k$  où  $N$  est le nombre de traits éclairés et  $k$  l'ordre qu'on regarde. Largeur des fentes = compromis entre résolution et intensité (+ diffraction).  
Spectro commercial = monochromateur = plans conjugués et réseau.  
Basse pression -> Effet Doppler -> profil Gaussien.  
Haute pression -> Collisions -> profil Lorentzien.*

**Ce que dit le jury...**

*Savoir définir les termes lame taillée parallèlement ou perpendiculairement à l'axe, axe optique, lignes neutres, milieu uniaxe ou biaxes. Ne pas confondre avec le montage sur la polarisation. Être capable d'expliquer le principe physique des protocoles utilisés pour l'étude de la biréfringence d'une lame mince. Il s'agit d'étudier des propriétés de matériaux et non d'ondes lumineuses.*

**Bibliographie**

*Duffait, Expériences d'optique : Pour le rhomboèdre, les lames épaisses et minces de quartz, le pouvoir rotatoire, et les rappels des définitions.*

*Sextant, Optique expérimentale : Pour les lames épaisse et mince de quartz aussi.*

*JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour le saccharose.*

*Taillet, Dictionnaire de physique : Pour quelques définitions, dont la loi de Biot.*

*Houard, Optique : Pour des compléments sur le spath.*

**Introduction**

Rappels biréfringence : matériau anisotrope (structure cristalline), indice dépend de la direction de propagation et de la polarisation.

Rappel définition pouvoir rotatoire.

**1 - Biréfringence****1.1 - Mise en évidence avec un rhomboèdre de spath****Expérience**

*Rhomboèdre de spath*

*QI - diaph - rombo - lentille - pola, ana - écran*

*Sans analyseur : 2 images, l'extraordinaire tourne autour de l'ordinaire.*

*Avec analyseur : montrer polarisation orthogonales des images.*

*Montrer que si a.o. dans plan horiz/vert alors  $\vec{p}_o$  est selon l'axe vert/horiz.*

$$\vec{p}_o \perp (\vec{k} \text{ et } \vec{a} \cdot \vec{o}.) , \vec{p}_e \perp (\vec{k} \text{ et } \vec{p}_o)$$

Deux polarisations orthogonales à  $n_o$  (cercle) et  $n_e$  (ellipse).

a.o. = direction où indices égaux = petite diagonale rhombo.

**1.2 - Mesure de la biréfringence d'une lame épaisse de quartz****Expérience**

*Lame épaisse de quartz*

*QI - AC - fente - pola - lame || - ana - lentille - prisme/spectro - écran*

*Sans rien : croiser pola et ana, puis introduire lame et expliquer avec lignes neutres (2 polarisations particulières) et les mettre en évidence en tournant la lame.*

*Avec prisme (PVD) : 2 indices pour 2 pola → on reprojette les pola dans la même direction (lignes neutres à 45° des pola-ana pour un max de lumière) pour observer des interférences et un spectre cannelé.  $\delta = (n_o - n_e)e$ .*

*Avec spectro (SPID-HR) : compter p cannelures entre  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ .*

$$\text{On a } \Delta n = \frac{p}{e} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}.$$

*Mesurer, estimer erreurs, comparer à valeur tabulée.*

## 1.3 - Mesure de l'épaisseur d'une lame mince de quartz

### Expérience

*Lame mince de quartz*

*QI - AC - pola - lame - compensateur de babinet - ana - lentille - écran*

*Sans lame : ligne noire au centre (on fait le zéro), expliquer principe étalonnage avec filtre interférentiel et faire une mesure en retrouvant le noir au centre, lire vernier très précis.*

*Relation entre déplacement  $d$  et  $\delta$ .*

*Avec lame : lignes neutres lame et comp. de Babinet parallèles et faire la mesure de  $e$ .*

On prend la même lame.

Comp. de Babinet = 2 primes d'a.o.  $\perp$  (ord  $\longleftrightarrow$  extra).

## 2 - Polarisation rotatoire

### 2.1 - Polarisation rotatoire et chiralité

#### Expérience

*Polarisation rotatoire*

*Laser vert 532nm - pola - cuve - ana - écran*

*Préparer 3 solutions de saccharose à 200, 300 et 400 g/L.*

*Mesurer déviation  $\alpha$  à chaque fois pour retrouver l'extinction et tracer courbe avec Regressi.*

*On peut aussi utiliser la lumière blanche et vérifier la dépendance en longueur d'onde avec des filtres interférentiels.*

Laser vert car maximum absorbance (attention aux réflexions, poser cuve droite).

Citer la loi de Biot  $\alpha = lc[\alpha]$  avec unités.  $[\alpha]$  dépend de  $T, \lambda, solvant...$

### 2.2 - Polarisation rotatoire par effet Faraday

#### Expérience

*Effet Faraday*

*Laser rouge 632nm - pola - barreau de int dans électroaimant - ana - écran*

*Étalonner  $B = f(I)$ , puis faire les mesures pour différents  $B$ .*

*Tracer courbe, linéaire dans une certaine gamme.*

## Conclusion

Propriétés originales, ouverture sur l'optique non-linéaire.

Visualisation possible des contraintes d'un matériau transparent.

#### Avis

*Ce montage a obtenu la note maximale.*

#### Remarques

*Taillé  $\parallel$  = a.o. dans le plan de la face d'entrée.*

*Cannelure = extinction.*

*Erreur sur spid-HR = pointage.*

*Incertitudes absolue s'ajoutent si somme, soustraction.*

*Incertitudes relatives s'ajoutent simultiplication, division.*

*Étalonnage pas toujours nécessaire.*

*Le pouvoir rotatoire des tables est à 25°C pour le doublet du sodium ou d'autres raies. Il faut l'indiquer dans la loi de Biot.*

**Ce que dit le jury...**

*Différencier par des expériences, polarisation partielle et polarisation elliptique ainsi que lumière naturelle et polarisation circulaire. Connaître le principe de fonctionnement du détecteur utilisé (photodiode, luxmètre). Il s'agit ici d'étudier les propriétés des ondes lumineuses. La loi de Malus est souvent mal réalisée et mal exploitée. Il est intéressant d'analyser la lumière produite dans des conditions non artificielles de réflexion sur un miroir métallique, sur un dioptre en incidence quelconque. Mener à bien la procédure d'analyse de la lumière elliptique.*

**Bibliographie**

*Sextant, Optique expérimentale : Pour le dichroïsme, les réflexions vitreuse et métallique, la diffusion.  
Duffait, Expériences d'optique : Pour le rhomboèdre, la quart d'onde.  
Taillet, Dictionnaire de physique : Pour quelques définitions.  
Pérez, Electromagnétisme : Pour le graphe des coefficients de réflexion pour Brewster.*

**Introduction**

Le modèle scalaire ne suffit pas pour décrire certains phénomènes, il faut tenir compte de la nature vectorielle. Définir la polarisation.

**1 - Polarisation rectiligne****1.1 - Production et analyse par dichroïsme****Expérience***référence partielle*

- Avec un polariseur :  
Vérifier que la QI n'est pas polarisée d'aucune façon car on a une intensité constante.

- Avec polariseur et analyseur :  
Expliquer les variations d'intensité et le principe des polariseurs.

- Avec film de cellophane :  
P et A croisés, film au milieu, on retrouve de la lumière. On enlève A, on constate que le film se comporte comme un polariseur partiel (attention, en fait, ne permet pas de conclure totalement sur la nature de la lumière, ça pourrait être circulaire.)

- Avec photodiode :  
Vérification de la loi de Malus.

**Attention**

*Toujours faire une source propre et éclairer en lumière parallèle, c'est de l'optique !  
On choisit plutôt la QI que le laser dans tout ce montage.*

**1.2 - Polarisation par réflexion vitreuse****Expérience***référence partielle*

*Polarisation par réflexion vitreuse avec plateau qui permet de mesurer l'angle.*

- Mettre un analyseur sur la réflexion, trouver l'angle de Brewster après avoir polarisé dans le plan d'incidence (horizontal). Mesurer  $n$  et  $R_{\perp}$ .

- Mettre la photodiode sur la transmission, mesurer le taux de polarisation avec  $N$  lames.

**Attention**

*Ne pas oublier de soustraire la tension due à la lumière ambiante captée par la photodiode.*

L'angle de Brewster permet de parler de cavité laser, de photographie à travers les vitres.



## 1.3 - Polarisation par diffusion

### Expérience

*Diffusion par des gouttelettes de lait.*

*référence partielle*

- Montrer qu'à 90° la polarisation est presque totale, interpréter les couleurs et les polarisations en diffusé et transmis.

- Mettre un polariseur en entrée (horizontal) et observer l'effet.

Faire l'analogie avec le ciel. Parler des photographes, des lunettes de soleil pour conduire et des arc en ciel.

## 1.4 - Polarisation par biréfringence

### Expérience

*Rhomboèdre de spath*

*QI - diaph - rombo - lentille - pola, ana - écran*

*Sans analyseur : 2 images, l'extraordinaire tourne autour de l'ordinaire.*

*Avec analyseur : montrer polarisation orthogonales des images.*

## 2 - Polarisation elliptique

### 2.1 - Production et analyse par une lame quart d'onde

#### Expérience

*Repérer les lignes neutres puis placer la quart d'onde à environ 60°. Mettre en évidence que c'est un polarisation elliptique partielle avec l'analyseur, mais qu'à priori on ne peut pas différencier d'une rectiligne partielle.*

*référence partielle*

*Caractériser son ellipticité avec la photodiode pour différents angles :  $e = \sqrt{\frac{I_{min}}{I_{max}}}$  (à savoir).*

### 2.2 - Polarisation par réflexion métallique

#### Expérience

*Montrer par la procédure d'analyse classique que la réflexion sur un métal à incidence d'environ 70° (angle du polariseur en amont) d'une polarisation rectiligne donne une polarisation elliptique totale.*

Parler de cinéma 3D et des écrans.

## Conclusion

Ouverture sur les applications citées au cours de l'exposé.

### Avis

*Bien penser à mettre en évidence à la fois la production et l'analyse dans l'exposé oral.*

*Il est impératif de relire les définitions et rappels.*

### Remarques

*Photodiode = jonction PN, création de paires électron-trou. Luxmètre = photodiode avec verre diffusant ayant la même fenêtre de pondération que l'oeil. Les lames quart d'onde et demi-onde sont utiles pour différencier les types de polarisation. Il faut penser à estimer le bruit de fond à chaque fois qu'on modifie le gain de la photodiode. L'angle de Brewster (57°) est utile dans les cavités laser pour sélectionner une polarisation. Réflexion vitreuse (sur diélectrique) par opposition à réflexion métallique. Un polariseur doit normalement s'utiliser toujours en lumière parallèle. Il y a un schéma récapitulatif d'analyse très utile dans le Duffait page 190. Pour une preuve convaincante de la loi de Malus les résultats doivent être normalisés correctement. Utiliser + $\theta$  et - $\theta$ . Pour  $\theta$  compris en 0 et 90°, on entrera dans Regressi :  $A(\theta) = \frac{(V_{+\theta} - V_{min}) + (V_{-\theta} - V_{min})}{2(V_{max} - V_{min})}$ . On moyenne les valeurs de façon symétrique pour s'affranchir des problèmes de zéro. On enlève  $V_{min}$  pour pallier les problèmes de position de la photodiode, d'imperfection des polariseurs et surtout de bruit extérieur. Enfin, on normalise par  $V_{max} - V_{min}$  pour s'affranchir de la réponse de la photodiode. Dans cette exploitation il est crucial que  $V_{max}$  et  $V_{min}$  soient des points expérimentaux. Polariseur qu'on utilise ne sont pas métalliques mais en polymères. Un miroir métallique ne doit pas être recouvert par du verre pour voir l'effet attendu. Utile dans les lunettes de soleil, lunettes 3D polarisation circulaire pour incliner la tête. Atténuer réflexion sur les vitres. Un bout de scotch sur un transparent penché fait un milieu biaxe. Attention,  $I = \frac{E^2}{2\mu_0 c}$ .*



**Ce que dit le jury...**

*Les deux aspects de l'intitulé doivent être abordés.*

*Bonne connaissance des spectromètres : étalonner, connaître la résolution.*

*L'émission du corps noir n'est pas une émission spontanée.*

*Les ordres de grandeurs des largeurs de raies et leur origine devraient être connus des candidats.*

*Attention à la résolution des spectromètre USB.*

*Etre critique vis à vis des résultats.*

**Bibliographie**

*Duffait, Expériences d'optique : Pour la fluorescence, la spectro par TF*

*Sextant, Optique expérimentale : Pour l'hydrogène.*

*Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Thermodynamique : Pour la loi de Stefan.*

*Taillet, dictionnaire de physique : Pour le speech sur l'émission induite.*

*JFLM, La chimie expérimentale (générale) : Pour Beer-Lambert,*

**Introduction**

Différents processus qu'on va mettre en évidence.

**1 - Absorption****1.1 - Loi de Beer-Lambert****Expérience**

*référence partielle*

*Loi de Beer-Lambert*

*- Montrer que l'absorption d'une espèce dépend de  $\lambda$  et de la longueur avec un PVD. Discuter le choix de la longueur d'onde pour la suite (stabilité, sensibilité).*

*- Avec différentes concentration et SPID-HR/ULICE, remonter au coefficient d'absorption.*

**1.2 - Fluorescence****Expérience**

*référence partielle*

*Tube néon*

*- Montrer que l'absorption est réémise à une longueur d'onde différente (UV -> Visible; Déplacement de Stokes).*

*- Repérer les raies du mercure.*

*Au pire, le faire en qualitatif.*

**2 - Emission spontanée****2.1 - Constante de Rydberg****Expérience**

*Lampe à hydrogène*

*- Présenter.*

*- Avec SPID-HR/ULICE, remonter à la constante de Rydberg.*

## 2.2 - Largeur de raie

### Expérience

*Avec le michelson*

- Avec Caliens par TF, faire le spectre de la QI et d'un filtre interférentiel (une vraie raie, c'est trop long). Remonter à la longueur de cohérence.
- Faire de même en chariotant pour estimer la largeur de raie verte du mercure avec un fluxmètre (on regarde l'enveloppe). Si on a le temps, essayer de le faire vraiment par TF.

### Attention

*On règle le michelson par :*

- Laser pour les séparatrice et compensatrice. Laser en faisceau direct.
- Lampe Hg et dépoli puis méthode comme un Fabry-Pérot.
- Lumière blanche si on veut en passant en franges si besoin.

*Ne pas oublier condenseur et lentille de projection.*

## 3 - Emission stimulée

### Expérience

*Laser transparent et Spid-HR :*

- Spectre sur le côté : on voit de l'émission spontanée.
- Spectre dans le faisceau : on voit l'émission stimulée, amplifiée et filtrée grâce à la cavité.

*pas de référence*

Bien discuter les conditions et propriétés.

## 4 - Rayonnement du corps noir

### Expérience

*Loi de Stefan : Avec Wattmètre sur le secteur (variateur) et pyromètre optique en mode 2C.*

- Remonter à l'exposant 4.
- Déduire la valeur de la constante de Stefan.

## Conclusion

Tout ça c'est de la mécanique quantique.

### Avis

*Utiliser le dico pour se remémorer le corps noir et d'autres définitions.*

### Remarques

*Les incertitudes de lecture au niveau de l'interface graphique du logiciel associé au spectromètre Ulice sont négligeables devant la résolution du spectromètre.*

*L'émission stimulée produit un photon avec même fréquence et même direction de propagation que le photon incident, alors que l'émission spontanée n'est pas directionnelle et peut se faire sans champ électromagnétique ambiant.*

*L'effet laser nécessite un système à trois niveaux au moins.*

*Le Deutérium ne diffuse pas à travers les parois de la lampe H.*

*Basse pression -> Effet Doppler -> profil Gaussien.*

*Haute pression -> Collisions -> profil Lorentzien.*

*Les tubes fluorescents utilisés quotidiennement sont (enfin plus depuis peu) des lampes à mercure avec une poudre fluorescente déposée sur la surface du tube qui absorbe les UV et qui rémet un spectre continu visible (d'où la lumière blanche et non bleue).*

*La largeur de la raie du laser ouvert est fine grâce à la cavité Fabry-Perrot et uniquement grâce à elle.*

*Ulice est précis à 1nm.*

**Ce que dit le jury...**

*Parler de directivité, divergence, monochromaticité, de mode, d'énergie...*

*Les diodes lasers (semi-conducteur) peuvent être utiles.*

*Le speckle doit être bien expliqué.*

*La notion de cohérence temporelle doit être illustrée et discutée en fonction des différents paramètres.*

*Le montage est souvent limité à des études sur le laser He-Ne.*

*Aborder la physique de ce qui se produit à l'intérieur du laser (plus simple sur les diodes).*

*L'immense majorité des lasers utilisés dans la vie courante ne sont pas des lasers He-Ne.*

*On peut montrer de façon quantitative le caractère gaussien du faisceau.*

*L'alignement des axes optiques est critique dans la mise en évidence des modes du laser He-Ne.*

*Il est intéressant de déterminer la structure géométrique transversale du faisceau laser.*

*Les diodes laser sont en train de supplanter les laser à gaz pour de nombreuses applications.*

**Bibliographie**

*Duffait, Expériences d'optique :*

*Pour les formules, l'expérience de la cavité Melles-Griot, les photorécepteurs.*

*Sextant, Optique expérimentale :*

*Pour les expériences, les caractéristiques des sources lumineuses et l'exploitation des résultats.*

**Introduction**

Responsable de nombreuses innovations technologiques depuis 50 ans.

**1 - Principe de fonctionnement d'un laser****Expérience**

*Laser transparent + Spid HR.*

*Expliquer ce qui se passe dans chaque spectre, sur le côté et dans le faisceau.*

*Donner le principe et parler d'émission stimulée, de gain, de cavité.*

*pas de référence*

**2 - Propriétés géométriques du faisceau laser****2.1 - Caractère gaussien****Expérience**

*Acquisition sous Caliens, exportée sous Regressi.*

*Comparer les fits des différents modèles.*

**2.2 - Divergence du faisceau****Expérience**

*Caliens dans le faisceau laser atténué.*

*Mesure de du waist par un fit.*

**Attention**

*Atténuer le laser avec analyseur et polariseur.*

*Ne pas oublier l'offset de distance dans la modélisation.*

*Il est donné par le prolongement de l'asymptote.*

*Si besoin, utiliser une lentille et la formule du sextant pour déplacer le waist et pouvoir faire beaucoup de points en son voisinage.*

## 2.3 - Cas de la diode laser

### Expérience

*Refaire les deux expériences précédentes avec une diode laser et comparer, discuter.*

## 3 - Cohérence temporelle et modes du laser

Rappeler ce qu'est la cohérence temporelle

### Expérience

*Cavité confocale Melles-Griot pour voir les modes d'un laser He-Ne.  
Faire chauffer le laser longtemps à l'avance et utiliser l'astuce du persist de l'oscilloscope.  
On a les relations :  $l_c \Delta f = c$ ,  $(ISL) * 2L_{cavit} = c$ ,  $R_{solution} * Finesse = ISL$ .  
La notice donne  $ISL=2GHz$ ,  $F=274$  et  $R=7,3MHz$ .  
Remonter à la longueur de cohérence du laser et à la longueur de la cavité.  
Montrer également la polarisation des modes.*

### Attention

*Finesse de la cavité laser à comparer avec finesse de la cavité de mesure.  
Toujours apporter un grand soin à l'alignement.*

### Expérience

*Idem avec une diode laser.  
Elle a beaucoup plus de modes car la raie d'émission est a priori beaucoup plus large.*

## 4 - Cohérence spatiale et speckle

Rappeler ce qu'est la cohérence spatiale.

### Expérience

*Montrer le speckle avec un laser vert et bien le discuter.  
- Elargir le faisceau avec un objectif de microscope et une lentille pour que ce soit visible.  
- Tenter la mesure seulement si tout le reste est ok.*

## Conclusion

Ouverture sur l'optique non linéaire car on a beaucoup d'intensité.

### Avis

*Attention à la sécurité, enlever montre.  
Prendre le temps qu'il faut pour relire, il y a tout dans les deux livres.*

### Remarques

*Attention, atténuer le laser si besoin, par exemple sur une CCD.  
Souvent la cavité limite la précision.  
Prendre un laser multimodes. La méthode générale d'incertitude c'est les dérivées partielles.  
Utiliser un rouleau de sopalin pour caliens.  
Attention, le laser pédagogique est de classe 3 (c'est un comble !).  
Les polarisations de deux modes consécutifs sont orthogonales.  
Si les taches du speckle sont trop petites, alors on voit la structure de la rétine.*

**Ce que dit le jury...**

*Composants fondamentaux et matériel grand public. Distinguer les détecteurs photoniques et les détecteurs thermiques (réponse spectrale, temps de réponse). La notion de point de fonctionnement peut être utile pour bien expliquer et justifier un montage avec photodiode. Le temps de réponse d'un photorécepteur peut dépendre du circuit. Résolution et sensibilité à définir proprement. On peut faire des hypothèses en les précisant pour s'affranchir de la thermopile. Les thermopiles comportent souvent un filtre optique infrarouge qu'il convient de retirer avant utilisation. Une ouverture vers l'optoélectronique est possible. Le photomultiplicateur est un instrument fragile, ne pas dépasser le courant anodique maximal. Les barettes CCD peuvent servir à faire des mesures, et pas seulement à obtenir une image sur l'écran d'un oscilloscope.*

**Bibliographie**

*Duffait, Expériences d'optique : Pour la caractéristique de la photorésistance, la réponse spectrale, la CCD, le tableau récapitulatif.*

*Sextant, Optique expérimentale : Pour décrire les capteurs, pour la caractéristique de la photodiode, le rendement quantique.*

**Introduction**

Usage fréquent de photorécepteurs, ce sont des capteurs qui transforment en général un flux lumineux en signal électrique. Distinction entre récepteurs photoniques et thermiques. De plus, l'oeil est un photorécepteur qui a ses propres caractéristiques. Présenter le principe de la photorésistance, de la photodiode en quelques mots.

**1 - Caractéristiques****1.1 - Photodiode****Expérience**

*Tracer la caractéristique sur synchronie et sur l'oscilloscope en polarisant en inverse.*

*Eclairer et voir que le plateau change.*

*Justifier le choix de R (compromis entre la sensibilité du courant et l'observation d'une caractéristique juste).*

*Parler du choix du point de fonctionnement pour la suite.*

**1.2 - Photorésistance****Illustration**

*Caractéristique au tableau et discuter rapidement (R diminue quand le flux lumineux augmente).*

**2 - Linéarité, Sensibilité****Expérience**

*Vérifier la linéarité de la photodiode avec la loi de malus et une diode laser.*

*pas de référence*

*Il faut faire la moyenne sur deux angles opposés pour s'affranchir de l'erreur de zéro, et ne pas oublier que c'est affine à cause de la lumière ambiante et du caractère non parfait des polariseurs.*

*On vérifie que c'est linéaire. La valeur de la pente donne accès à la sensibilité.*

**Calcul**

*Avec un puissance mètre pour laser (Thorlabs) et un ampèremètre, on en déduit le rendement quantique.*

**Expérience**

*Vérifier aussi comme avant la non-linéarité de la photorésistance avec la loi de malus et une diode laser.*

*pas de référence*

*On mesure la résistance à l'ohmmètre. On vérifie que c'est linéaire. La valeur de la pente donne accès à la sensibilité. Ici la sensibilité en courant peut être grande car on choisit le coefficient dans le montage AO de convertisseur courant-tension.*

Comparer et commenter en complétant le tableau de conclusion.

### 3 - Réponse spectrale

Dire qu'une thermopile est un corps noir (on fait cette approximation) et que sa réponse spectrale est plate. Elle va donc nous servir d'étalon de référence.

#### Expérience

*Lampe QI et filtres interférentiels. On normalise la réponse de la photodiode par celle de la thermopile. référence partielle  
Utiliser le nanovoltmètre pour la thermopile. On trace la réponse spectrale : meilleure sensibilité dans le rouge.  
Il faut prendre la grosse thermopile. Attention, rester loin pendant les mesures car sensible à l'infrarouge. Tracer et discuter les réponses.*

Compléter le tableau, et profiter de la longueur de la mesure pour présenter la photopile et mettre ses caractéristiques dans le tableau.

### 4 - Temps de réponse

#### Expérience

*Avec les mêmes montages que pour la mesure de linéarité (mais les polariseur et analyseur). Utiliser stroboscope pas de référence  
(ou diode laser boîte bleu pulses) en source (flash de maximum 100ms, temps de montée non indiqué). Commencer par la photorésistance : mesure du temps de montée. Passer à la photodiode : même mesure. Discussion :  
Peut être que le stroboscope est limitant pour la photodiode. De plus, on remarque que R influe sur le temps de réponse, à discuter.*

### 5 - Résolution

#### Expérience

*Montrer avec une fente double et caliens vers un oscilloscope, la discrétisation due aux pixels. Parler aussi du référence partielle  
critère de Rayleigh. Dire que CCD = photodiode en séries sur condensateurs lus par lignes. On a donc une matrice de valeurs lumineuses, donc une image.*

### 6 - Applications

#### Expérience

*Télécommande (ou DEL) au plus près de la photodiode et trigger de l'oscillo. Tester différentes touches. pas de références*

#### Expérience

*Détecteur. Photorésistance, pile, relai → pile et ampoule. pas de références  
S'arranger pour que ça s'allume quand on éclaire la photorésistance.*

### Conclusion

Tableau comparatif des différents photorécepteurs à remplir au fur et à mesure (+ oeil).

Présent tous les jours (télécommande, appareil photo, détecteurs, lampadaires, panneaux solaires...).

#### Avis

*Relire les définitions des grandeurs photométriques. Peu de références précises.*

#### Remarques

*Le montage est orienté métrologie : bien discuter les incertitudes. Si les points ne se superposent pas à la courbe, c'est que les conditions d'éclairement ont changé (prendre plusieurs points). Créations paires électron-trou donc c'est le courant qui est proportionnel au flux lumineux. Intrinsèque : sensible, rapide, non-linéaire, isolant. Ex-trinsèque (dopé) : sensible, lent, linéaire, isolant. Thermopile = corps noir à réponse plate. Taux de recombinaison proportionnel à l'écart à l'équilibre. Cable coaxial = 100pF/m, photodiode 30pF, le temps de réponse (relaxation) RC varie. La capacité de la photodiode modélise la ZCE et donc le temps de réponse (SC intrinsèque). En dehors du spectre visible, on utilise : pour les RX un compteur Geiger ou scintillateur (on image la fluorescence liée à l'absorption du photon), pour IR par exemple des microbolomètres pour les caméras thermiques à base de résistance qui change avec la température sous l'effet du rayonnement. Parler de gap, de semi-conducteur, de ZCE...*



**Ce que dit le jury...**

Les différentes stratégies de production de champ magnétique peuvent être mises en regard des applications éventuelles. La sonde à effet Hall est souvent le seul instrument de mesure présenté dans ce montage. Trop de candidats ignorent son principe de fonctionnement. Les mesures de champs magnétiques ne sont pas limitées à ceux qui règnent dans l'entrefer d'un électro-aimant. La maîtrise du maniement de la sonde de Hall et une connaissance sommaire de son principe de fonctionnement sont indispensables. L'ordre de grandeur de la composante horizontale du champ magnétique terrestre doit être connu. Il en est de même de l'existence d'un décalage systématique du zéro d'une sonde à effet Hall. L'usage de l'électroaimant occasionne de grosses erreurs, souvent dues à la non-linéarité de la réponse des pièces en matériau ferromagnétique. La formule donnant  $B$  proportionnel à  $1/e$ ,  $N$  et  $I$  suppose en particulier que la carcasse et l'entrefer forment un tube de flux de section constante, ce qui est rarement justifié, en particulier avec des pièces polaires tronconiques. L'emploi d'un teslamètre à sonde de Hall exige un minimum de soin (réglage du zéro, orientation...).

**Bibliographie**

Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Electricité : Pour les expériences : boussole, champ magnétique terrestre, champ magnétique tournant, étude d'une bobine plate, transformateur, conduction (sonde Hall densité porteurs).

Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Mécanique : Si on veut mesurer le moment d'inertie.

Fiat, Toute la physique de SUP : Pour l'effet Hall.

Fiat, Toute la physique de SPE : Pour le cycle d'hystérésis.

Taillet, Dictionnaire de physique : Pour se rappeler des pôles d'un aimant et les commentaires de l'expérience d'intro.

Garing, Milieux magnétiques : Pour des infos si besoin.

Brenders, Précis Bréal Électrotechnique PSI : Pour le tracé du cycle d'hystérésis si besoin.

Pérez, Electromagnétisme : Pour des rappels si besoin.

**Introduction**

Hypothèse d'Ampère de 1821 qui nous dit que les champs dans la matière sont dus à des boucles de courant microscopiques. Donner des ODG (Terre, disque dur, RMN, aimant...)

**1 - Production de champs magnétiques****1.1 - Aimant permanent****Expérience**

Très fort dans les matériaux ferromagnétiques. on place un aimant permanent sur la plaquette avec les petites boussoles : caractère vectoriel de  $B$ , les lignes de champ bouclent, ODG au teslamètre.

Parler de boussole, commenter le déplacement des pôles magnétiques, permet datation.

**1.2 - Bobine****Expérience**

Mesure du champ au milieu d'une bobine, ajout d'un noyau de fer doux pour montrer que ça augmente le champ : on utilise les deux effets à la fois, courant et aimantation.

**1.3 - Champ tournant****Expérience**

Brancher trois bobine sur du triphasé. Mettre des noyaux de fer doux. Mettre une boussole au centre. Expliquer, puis mesurer la fréquence au stroboscope (fréquencemètre si possible). On retrouve la fréquence du secteur. C'est une machine synchrone.

## 1.4 - Electroaimant

### Expérience

*Montrer électroaimant pédagogique. Dire que c'est comme la bobine avec un noyau, présenter le dispositif pour faire la transition. Faire l'étalonnage en traçant  $B$  en fonction de  $1/e$  au teslamètre commercial. Déduire  $\mu_0$ . Discuter.*

## 2 - Mesure de champs magnétiques

### 2.1 - Teslamètre (sonde effet Hall Ge), Fluxmètre

#### Expérience

*Expliquer les deux principes de mesure. Faire la courbe d'étalonnage aller et retour au fluxmètre en fonction de  $I$  et parler de l'hystérésis. Discuter la linéarité. Discuter le moyennage spatial, et le fait que le champ n'est pas rigoureusement nul à l'extérieur de l'entrefer. Comparer mesure au teslamètre (avec intégrateur prêt mais qui sature à 6V) et au fluxmètre (on met et on sort en suivant en roll). Vérifier que  $V_H$  est proportionnel à  $B$ . Parler de fidélité et de justesse de la sonde. Déduire la densité de porteurs.*

### 2.2 - Champ magnétique terrestre horizontal

#### Expérience

*Mesurer une composante du champ magnétique terrestre :*

- Mesure de  $m$  et  $L$  pour avoir  $J$ .
- Mesure dynamique pour la norme.
- Mesure statique de l'angle avec autre aiguille pour éliminer  $M$ .

*Accrocher la ficelle très haut. Il ne faut pas que le couple ait d'influence.*

### 2.3 - Dans la matière

#### Expérience

*Tracer le cycle d'hystérésis et mesurer le champ rémanent de l'électroaimant. Zéro de l'intégrateur très important. Bien expliquer le principe. Attention conflit entre  $B$  et  $M$ .*

## Conclusion

Comparer entre elles les méthodes de production et de mesure. Deux grandes façons de produire les champs magnétiques : courants et aimants. Mesure au fluxmètre et à la sonde de Hall permettent d'avoir accès à des infos complémentaires : le fluxmètre moyenne spatialement, mais il peut permettre de mesurer des champs dans la matière alors que la sonde de Hall est beaucoup plus petite, mais ne peut pas rentrer dans un matériau. Ouverture sur les applications, les moteurs, la RMN...

#### Avis

*Attention aux questions, et à l'hystérésis, aux champs rémanent, au zéro de l'intégrateur, à tout objet aimanté...*

#### Remarques

*Lorsque les soudures donnant la tension de Hall ne sont pas symétriques de part et d'autre de l'échantillon mais décalées d'une distance  $d$ , il s'ajoute une tension de décalage proportionnelle à la distance  $d$ . En faisant la demi-somme de deux mesures symétriques, on s'en affranchit. Retourner la sonde plutôt que de changer le sens du courant (hystérésis/placement). On mesure la composante orthogonale à la sonde. Ne pas prendre la référence du fluxmètre dans l'électroaimant car champ rémanent. Champ magnétique terrestre : horizontal =  $4 \cdot 10^{-5}$  T; vertical =  $2 \cdot 10^{-5}$  T.  $1G=0,1mT$ . Utiliser l'électroaimant marron. Maxwell linéaire : distribution courants  $\rightarrow$  forme champ. Intégrateur : la durée de l'expérience doit être courte devant son temps de dérive et rapide devant l'inverse la fréquence de coupure. Bouger le fluxmètre à la main pour l'amener dans l'entrefer et le ressortir, et à regarder la tension de sortie en mode roll. Attention,  $R_H i^2$  n'est pas une puissance car tension de Hall et courant sont orthogonaux. Dans un métal  $n = 10^{29}$  environ. Fer doux (électroaimant) : linéaire, peu rémanent, cycle petit. Fer dur (disque dur) : pas linéaire, rémanent, gros cycle. Etalonner en montée non initiale sinon hystérésis. Notre formule est valable si l'entrefer est petit. Noyau de fer canalise et amplifie (double effet kiss-cool!).*

**Ce que dit le jury...**

Ne pas se limiter aux milieux ferromagnétiques. L'étude exhaustive du transformateur n'a pas sa place dans ce montage en dehors des propriétés des ferromagnétiques. L'effet Meissner (supraconductivité) ne se résume pas à une expulsion de ligne de champ. Les grandeurs mesurées, telles que les *champs rémanent et coercitif*, doivent être comparées et/ou commentées. Il faut pouvoir justifier la *forme des pièces polaires de l'électro-aimant choisies*. Electroaimant non linéaire,  $B$  proportionnel à  $1/e$ ,  $N$  et  $l$  si la carcasse et l'entrefer forment un tube de flux de section constante, ce qui est rarement justifié, en particulier avec des pièces polaires tronconiques. L'emploi d'un teslamètre à sonde de Hall exige un minimum de soin.

**Bibliographie**

Quaranta, *Dictionnaire de physique expérimentale - Electricité* : Pour le cycle d'hystérésis (transformateur).

Quaranta, *Dictionnaire de physique expérimentale - Thermodynamique* : Pour la transition du Fer.

Pérez, *Electromagnétisme* : Pour la mise en évidence dia/para, pour  $FeCl_3$ , le cycle d'hystérésis, les domaines de Weiss, des rappels et plein d'ODG (sauf  $T_c$  faux). Bref, presque tout pour les manip de magnétisme.

Taillet, *Dictionnaire de physique* : Pour les ODG de susceptibilité.

Fiat, *Toute la physique de SPE* : Pour le cycle d'hystérésis.

Garing, *Milieux magnétiques* : Pour  $FeCl_3$  si besoin.

Brenders, *Précis Bréal Électrotechnique PSI* : Pour le tracé du cycle d'hystérésis si besoin.

**Introduction**

Introduction sur les milieux magnétiques, les différents comportements qu'on peut observer (aimantation spontanée, induites), redéfinir la susceptibilité magnétique.

**1 - Diamagnétisme, paramagnétisme****1.1 - Mise en évidence****Expérience**

Barreaux de bismuth (dia) et d'aluminium (para) dans l'entrefer d'un électro-aimant.

Expliquer à l'aide de la force volumique en  $\chi g \vec{r} ad (B^2)$ . Il est parfois judicieux de placer l'échantillon légèrement de côté.

**1.2 - Azote et dioxygène****Expérience**

Faire couler diazote et dioxygène dans entrefer refroidi prévu à cet effet.

*pas de référence*

Expliquer en terme d'orbitales moléculaires et de paires d'électron.

**1.3 - Susceptibilité de  $FeCl_3$** **Expérience**

Etalloner en montée et descente avec sonde à effet Hall.

Tracer  $h$  en fonction de  $B^2$ .

Déduire la susceptibilité.

Attention à la composition en eau de la solution pour la masse volumique. Discuter le protocole et la capillarité.

Résultat très peu précis. (Il y a additivité des  $\chi$  volumiques.)

## 2 - Ferromagnétisme

### 2.1 - Mise en évidence

#### Expérience

*Constater une force très importante proche de l'électroaimant.*

### 2.2 - Transition ferro-para

#### Expérience

*Ne pas mettre d'incertitude, c'est un ODG de  $T_c$  qu'on retrouve (770°C). Transition du premier ordre. Prendre l'ODG dans le Quaranta. Ne pas chauffer l'aimant. Utiliser le thermocouple spécialement prévu à cet effet.*

### 2.3 - Hystérésis magnétique

#### Expérience

*GBF, Ampli, Rhéostat (30 Ohm) au primaire et 1kΩ, 1μF sur AO au secondaire.*

*Champ rémanent et excitation coercitive : comparer les matériaux dur (cycle large, beaucoup de pertes), doux (cycle étroit) et ferrimagnétiques. Commenter vis à vis des applications. Justifier le choix de la fréquence. Attention à la dérive de l'intégrateur, prendre celui tout prêt sinon mettre une grosse résistance en parallèle, avec un bouton poussoir si besoin.*

*Montrer première aimantation et désaimantation. Interprétation en domaines de Weiss.*

## 3 - Domaines de Weiss

#### Expérience

*Utiliser courant alternatif, bobine et noyau de fer pour exciter. Croiser polariseur et analyseur, lame avec sourire (grenat), caméra adaptée, QI et filtre AC. L'hystérésis est dû à ce phénomène du déplacement des parois de Bloch. Interpréter en terme de compétition couplage intérieur/extérieur.*

## Conclusion

Ouverture sur les applications des matériaux ferromagnétiques, pour canaliser les champs par exemple (transformateur), ou pour stocker les données (disques durs).

#### Avis

*Il manque un index au Quaranta.. Sinon expériences classiques. Penser à discuter les choix des composants. Il a une faute dans le Garing pour  $FeCl_3$ , regarder dans Quaranta.*

#### Remarques

*Pertes par hystérésis proportionnelles à  $f B^2$ , par courants de Foucault à  $f^2 B^2$ . Il faut situer le cadre du montage dès l'introduction en définissant les trois types de milieux magnétiques. La relation de proportionnalité  $B = \mu_0(1 + \chi) H$  n'est pas générale : elle est fautive pour les matériaux ferromagnétiques car hystérésis. La susceptibilité est un coefficient de réponse, mettant en jeu des dérivées, et qui dépend a priori de l'état magnétique du matériau et de son histoire. Agiter le flacon contenant la solution avant de remplir le tube car celle-ci sédimente. Les effets de capillarité sont une source d'incertitude importante. Ils interviennent de deux façons différentes (ménisque et hystérésis de mouillage). Augmenter puis en diminuer  $B$  et en moyenner  $h$ . Il faut négliger le terme dû à l'eau. La soudure froide du thermocouple doit être placée dans un bain eau-glace homogène (avec agitation) et sans toucher la paroi du bécher. Connaître un peu cette transition de phase. Faire référence aux lois physiques : le courant au primaire est proportionnel au champ  $H$  (théorème d'Ampère et secondaire à vide) alors que la tension de sortie de l'intégrateur est proportionnel au champ  $B$  (loi de Faraday intégrée). Fréquence de travail suffisamment petite car les courants de Foucault augmentent comme  $f^2$ , mais suffisamment grande car il faut être au delà de la fréquence de coupure de l'intégrateur. On pourra montrer la désaimantation adiabatique, la courbe de première aimantation, l'universalité de la pente lorsque l'on inverse le sens du champ, l'existence d'un cycle limite dans lequel sont inclus tous les autres, l'apparition de courants de Foucault et leurs conséquences. Attention, le champ  $B$  ne sature pas vraiment, c'est l'aimantation  $M$  qui sature. La ferrite est un isolant, on a pas de perte par courant de Foucault. Sinon, on feuillette le matériau.*

## Ce que dit le jury...

Ce montage doit mettre en évidence différentes *caractéristiques propres aux métaux* (conductivités thermiques et électriques, élasticité...) et leur liens éventuels. Les mesures doivent être particulièrement soignées. Il est intéressant de montrer la *spécificité des valeurs* obtenues. Les expériences présentées se réduisent souvent aux conductivités thermiques et électriques. L'étude de caractéristiques mécaniques par exemple nécessite d'être mise en perspective. Attention aux conditions aux limites. Le régime permanent implicitement mis en jeu doit être précisé, de même que son temps d'établissement.

## Bibliographie

Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Electricité : Pour la sonde Hall Ag (conduction).

Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Thermodynamique : Pour le conductoscope et la barre de cuivre (conduction).

Garing, Magnétisme : Pour la chute d'un aimant dans un tube.

Taillet, Dictionnaire de physique : Pour la loi de Wiedmann-Franz et le nombre de Lorenz.

JFLM, La chimie expérimentale (organique) : Pour la recalescence du fer.

Fiat, Toute la physique de SPE : Pour la formule du module d'Young.

Haynes, Handbook of Chemistry and Physics : Pour la valeur du Dural.

## Introduction

Définition d'un métal et propriétés simples. Propriétés spéciales car les électrons sont délocalisés.

## 1 - Variétés allotropiques

## Expérience

Recalcescence du Fer. Existence de formes allotropiques. Caractère cristallin. On présente la discontinuité de volume de la transition. Projeter à la caméra devant une feuille quadrillée, quantifier la variation.

## 2 - Conductivité électrique

## 2.1 - Cuivre par mesure 4 fils et effet Hall

## Expérience

Mesure à 4 points de la conductivité du cuivre sur un bout de fil avec pinces croco. Vérifier la loi d'Ohm, mesurer la taille et le diamètre du fil, déduire la conductivité. Discuter le principe et l'avantage de la mesure 4 points (permet de mesurer de très faibles résistances) et bien traiter les incertitudes. Comparer à la valeur du Handbook. pas de référence

## Expérience

Même chose mais avec la bobine calibrée dans un bain thermostaté. Déduire dépendance. pas de référence

## Expérience

Mesure de la densité des porteurs d'une sonde effet Hall Ag après avoir étalonner un électroaimant. Se placer à B constant et faire varier I (bonus car non testée). référence partielle

## 2.2 - Aluminium par courants de Foucault

## Expérience

Mesure d'un rapport de conductivité en utilisant les courants de Foucault. Temps de chute en fonction de la distance. Transitoire est très court. La chute de l'aimant constitue un champ variable pour le tube conducteur -> courants radiaux s'opposent au champ leur ayant donné naissance (loi de Lenz) -> champ magnétique qui freine l'aimant dans sa chute non libre (analogie avec les freins des camions). Type frottement fluide. La pente donne la vitesse limite, inversement proportionnelle à la conductivité. Le cuivre n'est pas pur. Reconnaître l'allure de la courbe sur l'oscilloscope liée à la loi de Lenz.



### Attention

Penser à faire une correction d'un cosinus d'angle (diagonale de l'aimant = diamètre du tube) car l'aimant ne tombe pas droit.

## 2.3 - Dépendance en température

### Expérience

Recommencer en ayant mis le tube de cuivre dans l'azote liquide. Comparer si possible à une valeur tabulée. *pas de référence*

## 3 - Conductivité thermique

### 3.1 - Cuivre en régime permanent

On illustre ici le fait qu'être bon conducteur électrique c'est être bon conducteur thermique (Réciproque fautive, par exemple le diamant qui est isolant).

### Expérience

Vérifier les capteurs de la barre de cuivre et leurs linéarité à flux constant (zéros, droite, pas de fuite, pas de réflexion). Barre de Cuivre en excitation sinusoïdale (offset ambient) avec ampli. Lancer dès le début. Mesurer la conductivité thermique. Vérifier la loi de Wiedmann-Franz.

### Attention

Attention, il y a des erreurs dans le Quaranta : un T a remplacé un L, mais surtout il manque un  $\rho$  au numérateur dans l'expression de  $\lambda$ .

### 3.2 - Autres métaux au conductoscope

### Expérience

Comparaison avec les tiges cristallines liquides dans l'eau bouillante.

## 4 - Module d'Young

### Expérience

Définir le Dural (série 2000). Mesure de la célérité d'une onde ultrasonore dans l'eau puis dans le Dural : utiliser *référence partielle* bac et ampli. Relier Dural à la masse, position 2 de l'ampli et trigger EXT, moyennage. Montrer ondes sonores transverse et longitudinale. Déduire le module d'Young du Dural, élevé car on a des liaisons métalliques. Comparer avec valeur tabulée, avec d'autres, donner des ODG. Etre précis sur la mesure dans l'eau. Grosse incertitude.

## Conclusion

Récapituler les propriétés caractéristiques des métaux illustrées ici. Ouverture sur les propriétés optiques des métaux (réflexion, production de lumière polarisée).

### Avis

Reprise et enrichissement du plan de Divoux, qui a obtenu 18/20. Il y a manifestement trop de choses prévues, comme souvent dans mes plans, mais au moins ça laisse le choix pour les imprévus.

### Remarques

La mesure à 4 fils présente un intérêt comparée à la mesure à l'Ohmmètre. L'effet Hall est d'autant plus important que le nombre de porteurs est faible ! C'est pour ça que l'effet Hall n'est pas utilisé en pratique avec des métaux. Cristaux liquides : orientation partielle et espacement entre les molécules en spire fonction de la température. Dural = alliage d'Al et de Cu. Dans un fluide, pas de cisaillement. Il y a sinus (effet Peltier) et sinus carré (effet Joule) dans la barre de cuivre. La conduction est limitée par les impuretés et les défauts. La réflexion ne se fait pas à toute longueur d'onde. Béton armé : acier travaille en traction, béton en compression. La résistance augmente avec la température à cause des chocs avec les phonons. Drude = Chocs. Sommerfeld = gaz de fermions. Ondes de compression plus rapides que les ondes de cisaillement (Ondes P et S pour un séisme).



**Ce que dit le jury...**

*Il vaut donc mieux utiliser des composants de caractéristiques connues. Il est essentiel de savoir différencier les régimes de conduction intrinsèque et extrinsèque (dopés).*

**Bibliographie**

*Sextant, Optique expérimentale : Pour la cellule photovoltaïque (photopile).*  
*Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Electronique : Pour la densité de porteurs.*  
*Desvignes, Effet photovoltaïque et photopiles solaires - BUP 492 : Pour tout comprendre sur l'effet photovoltaïque et faire un beau schéma.*  
*Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Electricité : Pour l'influence de la température (thermistance).*  
*Fiat, Toute la physique de SUP : Pour la conductivité et l'effet Hall.*  
*Taillet, Dictionnaire de physique : Pour l'introduction, la définition, la théorie des bandes. Très riche.*  
*Perez, Thermodynamique : Pour les formules des semi-conducteurs.*  
*Perez, Electromagnétisme : Pour les ODG de gap, conduction... et plein de trucs sur les semi-conducteurs pour en parler rapidement et bien (conduction électrique).*

**Introduction**

Définition d'un semi-conducteur (théorie des bandes, paires électron/trou). Différencier intrinsèque et extrinsèque (dopage). Ces caractéristiques impliquent des comportements particuliers.

**1 - Influence de la température dans un semi-conducteur intrinsèque**

Donner la formule de  $n$  et  $p$ . Intrinsèque donc  $n=p$ . Conductivité proportionnelle à  $n$ . En déduire que la conductivité augmente avec la température, contrairement à un métal. Donner le modèle, préciser qu'on néglige le terme pré-exponentiel.

**Expérience**

*On utilise une thermistance CTN dans un bain thermostaté.*  
*Méthode rapide si besoin : On part d'un mélange eau-glace pour aller jusqu'à ébullition avec Ohmmètre.*  
*Méthode lente : Partir de l'ébullition puis acquérir pendant que ça refroidit avec mesure 4-fils automatique.*  
*Agiter. Utiliser une Pt100 comme référence car c'est le thermomètre légal. Prendre une grosse résistance et surveiller le courant pour avoir un échauffement Joule négligeable ( $I < 0,1\text{mA}$ ). Commenter la courbe. Comparer l'énergie de gap (env.  $1\text{eV}$ ) à la valeur tabulée et à l'agitation thermique. Conclure que peu conducteur.*

**2 - Mesure de la densité de porteurs de charge dans un semi-conducteur extrinsèque****2.1 - Mesure de la conductivité**

Présenter ce qu'est un semi-conducteur dopé. Donner un ODG du gap ( $40\text{meV}$ ).

**Expérience**

*On utilise la plaquette de Germanium. On fait au mieux possible une mesure à 4 fils. D'après la notice et avec la formule  $R = \frac{\rho l}{S}$ , on en déduit la conductivité. Commenter et comparer.*

*référence partielle*

**2.2 - Mesure de la densité de porteurs de charges**

Présenter l'effet Hall et d'après l'expression de la résistance de Hall (en  $1/n$ ) expliquer pourquoi les SC sont intéressants par rapport aux métaux.

**Expérience**

*On place la plaquette de Ge dans l'entrefer d'un électroaimant étalonné au fluxmètre. On mesure  $B$  et  $V_H$  à  $I$  constant. Déduire  $n$  ( $10^{20}$ ). Comparer à la valeur tabulée et commenter, comparer aux métaux.*

### Attention

Si on veut un champs homogène (le cas ici), on utilise des pièces polaires plates. Dans le cas contraire, si on veut concentrer le champ, on utilise des pièces polaires tronconiques. Comme toujours, faire une moyenne pour enlever la tension Hall de décalage. Attention à l'hystérésis de l'électroaimant : moyenner sur aller retour ou faire dans le même sens après avoir fait un cycle.

## 2.3 - Détermination de la mobilité des porteurs de charges

SC extrinsèque, on approxime que la conduction est uniquement réalisée par les porteurs majoritaires.

### Calcul

Déduire par simple calcul  $\sigma = ne\mu$  la mobilité des porteurs de charges (ODG=3900 USI). *trouver valeur tabulée*

## 3 - Application : la cellule photovoltaïque

### 3.1 - Mode de fonctionnement

Expliquer brièvement le principe de la photodiode (photopile, jonction PN). Photon dont l'énergie est supérieur au gap crée une paire électron-trou, d'où création d'une tension. Une grande valeur de l'énergie de gap donne une grande tension mais un faible courant et réciproquement, il faut donc un compromis (Si :  $E_g=1,1\text{eV}$ ).

### Illustration

Schéma de la jonction p-n et potentiel des électrons, trous pour montrer l'accumulation sous l'effet des photons.

### 3.2 - Caractéristiques

#### Expérience

Cellule photovoltaïque (Jonction PN sinon marque LAP), QI, AC (car inf à 50°), Résistance variable. Mesurer la puissance récupérée en fonction de la charge (résistance) branchée sur la cellule photovoltaïque. Remarquer que la caractéristique n'est pas linéaire. Déterminer la charge adaptée et la puissance maximale.

### 3.3 - Rendement maximum

#### Expérience

Calcul du rendement en mesurant le flux incident avec une thermopile (rendement très mauvais).

## Conclusion

Ouverture sur les nombreuses applications en électronique (diode, transistor, thyristor, ordinateur, CCD...).

### Avis

Ce montage est un peu léger, mais je ne suis pas à l'aise sur ce sujet, donc je limite les risques au cas où je doive choisir quand même ce montage, qui malgré tout est plutôt bon.

### Remarques

Ne jamais débrancher brutalement une source de puissance, risque d'arc électrique. Cellules photovoltaïques LAP = jonction métal-semiconducteur (sélénium sur fer) = diode Schottky, il ne faut pas la polariser en inverse. Première par Fritts en 1883 (or sur sélénium). Thermopile = Corps noir, effet Seebeck (inverse de Peltier). Pour le rendement, prendre le même pinceau lumineux et même géométrie. Côté industrie, SC : 300 Milliards de dollars par ans. Acier : 90 Milliards de dollars par an. A 300K, pas de conduction -> ok si pas de champ. Si  $n = p$  alors à la moitié du gap  $\mu_n = \mu_p$  et donc  $n \propto \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$ . L'efficacité quantique dépend beaucoup de la longueur d'onde incidente. Thermistance = poudres de SC. CTN/CTP = coeff de température négatif/positif, oxydes de métaux de transition/titanate de baryum, large plage de fonctionnement/faible plage mais plus précise. Ge est dopé n. Le dopage s'exprime en ppm. Jonction PN -> Recombinaison -> Zone de Charge d'Espace -> Champ électrique -> diode -> un seul sens pour le courant -> Accumulation -> Tension. Compromis sur l'énergie de gap pour avoir un maximum de puissance (gap faible -> fort courant, faible tension // gap élevé -> faible courant, forte tension).

**Ce que dit le jury...**

*Pas que circuit RC ou condensateur modèle d'Aepinus ou ligne coaxiale. Le stockage d'énergie n'est pas typique des effets capacitifs. Le principe de fonctionnement d'un capacimètre doit être connu. Pour mesurer des capacités de petite valeur, on ne peut pas négliger la capacité d'entrée de l'oscilloscope ou celle des câbles. Ne pas se limiter à  $f=1000\text{Hz}$ . Résonance RLC série peu convaincant pour accéder à C. On ne mesure pas de la même façon à 5 et 50 kHz. La mesure au capacimètre pas forcément la plus judicieuse. Le modèle du multivibrateur astable à circuits logiques contient des hypothèses trop grossières. Se demander pourquoi les boîtes de condensateurs de précision comportent trois bornes. En hautes fréquences, les propriétés des diélectriques modifient les valeurs mesurées.*

**Bibliographie**

*Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Electricité : Pour le diélectrique (condensateur), le câble coaxial (ligne électrique), le filtre RC (filtre).*

*Duffait, Expériences d'électroniques : Pour multivibrateur, et détecteur d'enveloppe.*

*Fiat, Toute la physique de SPE : Pour le multivibrateur astable si besoin, la modélisation du câble coaxial si besoin.*

*Fiat, Toute la physique de SUP : Pour la capacité parasite de l'oscillo.*

*Taillet, Dictionnaire de physique : Pour la discussion et les formules sur la câble coaxial.*

**Introduction**

Un des composants de base de l'électronique. On va se concentrer sur le condensateur et ses applications.

**1 - Caractéristique d'un condensateur : Capacité C****1.1 - Dépendance avec la distance inter-armatures.**

Attention aux points pourris à cause des effets de bord.

**Expérience**

*Mesure de la permittivité du vide à partir du modèle du condensateur d'Aepinus.*

*On utilise un RLC-mètre à 1kHz et le vernier (regarder quand même le changement).*

*Sans tenir compte des points faux à cause des effets de bords et après avoir estimé la surface on en déduit  $\epsilon_r$  (air) par régression affine (car capacité parasite).*

*Comparer à la valeur attendue et discuter l'écart : humidité ( $\epsilon_r$  différent de 1,006), fils parasites mêmes fixés...*

*référence partielle*

**1.2 - Rôle du diélectrique**

Triple rôle à discuter : pertes, tension de claquage, capacité. Dire un mot sur l'énergie stockée.

**Expérience**

*On se sert de l'étalonnage précédent pour mettre une plaque de verre (ou autre) entre les armatures (bien serrer) et on en déduit  $\epsilon_r$  (diélectrique).*

*référence partielle*

Donner des ODG de  $\epsilon_r$ .

Ne pas faire la tension de claquage pour la survie de l'alimentation HT.

**2 - Mesure de capacités, multivibrateur astable (principe du capacimètre)****Expérience**

*Montage de base du Duffait. C'est une succession de comparateur et d'intégrateur, on a donc des oscillations. On peut montrer que la période répond à une formule faisant intervenir C. On a  $T = 4 \frac{R_1 RC}{R_2}$ . C'est ce qu'il se passe dans un capacimètre. On vérifie cette formule en faisant varier C à l'aide d'une boîte de capacité. On trace T en fonction de C. On vérifie que la loi est linéaire (et pas affine). Bien sûr, mesurer C au RLC-mètre et toujours soigner les incertitudes.*

**3 - Effet capacitif dans un câble coaxial**

### 3.1 - Impédance caractéristique et vitesse de propagation

#### Expérience

Envoyer un pulse et mesurer le temps de vol. Mesurer l'impédance en annulant la réflexion à l'aide d'un potentiomètre à vis qu'on mesure ensuite à l'ohmmètre (env. 35 Ohm). On peut alors en déduire la vitesse, donc en déduire la valeur de  $\epsilon_r$ .

Comparer les valeurs entre elles et à la valeur attendue déterminée à partir des données géométriques et/ou de l'indication constructeur.

### 3.2 - Capacité linéique au capacimètre

Présenter l'intérêt du câble coaxial.

#### Expérience

Remplacer dans le montage précédent la boîte de capacité par le câble coaxial. Mesurer grâce à la courbe d'éta-<sup>référence partielle</sup> lonnage sa capacité C. Diviser par la longueur (80m) pour obtenir la capacité linéique. On peut alors en déduire les données géométriques, et réinjecter ces données dans l'expérience précédente pour avoir une deuxième mesure de la capacité linéique.

Comparer à la valeur attendue déterminée à partir des données géométriques et/ou de l'indication constructeur. Pour mémoire on a  $v^2 = \frac{1}{\Lambda\Gamma}$  et  $Z_c = \sqrt{\frac{\Lambda}{\Gamma}}$ .

## 4 - Application : filtrage

### 4.1 - Filtre passe-bas

#### Expérience

Tracer le diagramme de Bode du filtre RC. Vérifier la pulsation coupure à -3dB. Faire amplitude et phase. Utiliser<sup>pas de référence</sup> l'oscilloscope pour mesurer sa capacité parasite en tant que filtre passe-bas.

### 4.2 - Détecteur d'enveloppe

#### Expérience

Dire que c'est utile pour démoduler (ex : radio), qu'il faut un compromis sur la constante de temps RC. Justifier le choix ainsi des composants. Démoduler un signal et bien mettre en évidence à l'oscilloscope le rôle de la décharge du condensateur.

## Conclusion

Ouverture sur les détecteurs capacitifs. Si on peut mesurer la présence d'un diélectrique, on peut savoir quand un objet s'approche d'un condensateur.

#### Avis

Montage en général bien réussi et où il faut penser à manipuler devant le jury autre chose que l'oscilloscope. Bien justifier les montages et les transitions. Reprise d'un montage de démo donc au top à priori. On m'a déconseillé de présenter la tension de claquage de l'air, mais c'est possible. C'est d'ailleurs sûrement encore mieux dans l'eau lol. On pourrait aussi s'amuser avec l'électroscope. Expériences simples mais pas vraiment de référence.

#### Remarques

Modèle idéal si on néglige les effets de bord, sinon on oublie de l'énergie et on sous-estime C. Modèle d'ajustement : si la théorie prédit une dépendance linéaire, il faut faire un fit linéaire (et pas affine) sauf si on a une bonne raison de dire qu'il y a un offset. Câble coaxial doit être justifiée comme application. L'application rigolote est le théremine (instrument de musique) et les touches tactiles d'ascenseur. On parle de condensateur pour « deux armatures conductrices en influence totale (toutes les lignes de champ de l'un atteignent l'autre) et séparées par un isolant polarisable (diélectrique) ». Un condensateur électrolytique est un conducteur électrique dans une gelée conductrice sans isolant : après application d'une tension continue aux bornes du système, une réaction d'électrolyse a lieu qui crée une couche très fine d'isolant (quelques molécules). Si on le branche à l'envers, l'électrolyse se fait à l'envers, ce qui produit une surchauffe de la gelée qui se vaporise puis explose. Le condensateur ressemble alors à un champignon, la croix indique le point de faiblesse. Bobine a des effets capacitifs entre les spires. Ne pas confondre condensateur/bobine/résistor avec capacité/inductance/résistance.  $\epsilon_r$  (eau) = 80.

**Ce que dit le jury...**

La notion d'*inductance mutuelle* est souvent oubliée ou mal dégagée, par suite de mauvais choix dans les composants utilisés et dans la *fréquence d'excitation*. L'observation subjective d'un retard à l'allumage d'une lampe ne peut être qu'une introduction qualitative du phénomène d'auto-induction qui doit être illustré par des *mesures précises* et une confrontation entre la mesure et le *modèle* décrivant le phénomène. L'étude du rendement du transformateur n'a pas sa place dans ce montage. Ces notions sont fondamentales. Le montage est pourtant souvent décevant, traité à un niveau trop élémentaire. Il est préférable de ne pas s'attarder trop longtemps sur les expériences qualitatives préliminaires de mise en évidence du phénomène. En revanche, du temps peut être utilement consacré à effectuer des mesures soignées de l'*impédance* associée aux bobines. Le flux magnétique créé par un courant à travers une bobine n'est proportionnel à l'intensité de ce courant ( $\Phi = Li$ ) qu'en l'absence de noyau ferromagnétique. La différence entre le modèle théorique que constitue une inductance pure (à laquelle on peut ajouter une résistance série) et une bobine concrète n'apparaît pas toujours (hautes fréquences). Il ne faut pas perdre de vue le titre du montage : toutes les propriétés des circuits utilisés n'ont pas forcément de rapport direct avec le sujet.

**Bibliographie**

*Duffait, Expériences d'électronique* : Pour des généralités sur les bobines (limites, etc), résonance RLC.  
*Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Electricité* : Pour Lenz (induction), fluxmètre, inductance mutuelle (couplage), transformateur, rails de Laplace (transducteur -> induction, Laplace).  
*Garing, Milieux magnétiques* : Pour la chute des aimants.  
*Fiat, Toute la physique de SPE* : Pour les rappels théoriques.

**Introduction**

Equation de Maxwell-Faraday.

**1 - Lois de l'induction****1.1 - Loi de Lenz****Expérience**

Oscilloscope en mode ROLL, bobine et aimant.  
 Observer le courant induit conformément à la loi de Lenz.  
 Prévoir et observer sens du courant.  
 Importance du sens du bobinage et de l'aimant.

**1.2 - Loi de Faraday****Expérience**

Vérification au fluxmètre qu'on sort de l'électroaimant et ampèremètre.  
 Tracer fluxmètre en fonction de teslamètre, vérifier que c'est linéaire.  
 L'intégrateur existe tout monté si on manque de temps.

**2 - Mesures d'inductances****2.1 - Inductance propre****Expérience**

Résonance d'un circuit RLC. *référence partielle*  
 Mesure des autres composants au RLC-mètre puis on déduit L par résonance en mode XY (ou par réponse individuelle).  
 Vérifier au RLC-mètre.



## 2.2 - Inductance mutuelle

### Expérience

Deux bobines sur banc d'optique.

Choisir fréquence adaptée (trop basse, pas d'effet, trop haute, on sort du modèle).

Attention ne pas utiliser de noyau de fer dans ce montage.

Chercher à modéliser par une loi de puissance (donc fit en log).

Bien aligner le montage.

Toujours discuter incertitudes et résultats bien sûr.

## 3 - Applications

### 3.1 - Transformateur et cuisine

#### Expérience

Expliquer le principe et la notion de circuit magnétique. On passe du circuit électrique au circuit magnétique *référence partielle* et réciproquement grâce à l'induction. Mesurer le rapport des tensions. Expliquer le rôle joué par le nombre de spire. Insister sur le rôle de l'induction et comment on exploite ici ce phénomène. C'est en fait une application de la mutuelle induction.

Bien fixer le transformateur pédagogique, utiliser alternostat et bobine de 250 tours au primaire et anneau de chimie avec étain au secondaire. Mesurer le courant au primaire avec un ampèremètre, au secondaire avec une pince ampèremétrique (Calibration à faire). Comparer les rapports expérimentaux et théoriques des courants. On illustre ainsi le principe des poêles à induction, l'étain se vaporise... ne pas faire trop durer le plaisir. Attention à la sécurité.

### 3.2 - Mesure de rapports de conductances

#### Expérience

Chute d'un aimant dans un tuyau conducteur en cuivre puis en aluminium. On remonte au rapport des conductances. Détection par deux fluxmètres, faire une pente en fonction de l'écart. Comparer aux valeurs théoriques. Discuter l'écart, les incertitudes (ici alliages). On se sert d'un phénomène de freinage par induction similaire sur les camions. *référence partielle*

### 3.3 - Rails de Laplace

#### Expérience

Illustrer par les rails de Laplace le principe de la machine à courant continu. Montrer qu'on peut ainsi convertir de façon réversible deux types d'énergie. Attention si on utilise des LED.

## Conclusion

Nombreuses applications (cuisine, freinage, transformateurs, haut parleur, lissage des tensions...).

#### Avis

Pas de grosse difficulté à priori, mais bon, c'est un montage, on ne sait jamais...

#### Remarques

Faire apparaître et identifier les spécificités des trois notions : l'induction, l'auto-induction et la mutuelle induction. Applications innombrables de ces deux phénomènes : fluxmètre, freinage, moteur, électronique, limitation de courant, étincelle de rupture, transformateurs. Bobine =  $(L+r)/C$  -> effets capacitifs à hautes fréquences entre les spires. On peut ainsi déduire la fréquence limite du modèle linéaire. Différencier Neuman ( $B$  varie) et Lorentz ( $r$  varie). Mesurer le champ dans la bobine, ne pas oublier la loi de Lenz. Le champ  $B$  entre par le pôle sud et sort par le pôle nord de l'aimant. Rouge = Nord. Le pôle nord magnétique de la Terre est au sud géographique (en gros).



**Ce que dit le jury...**

Utilisation le régime nominal de fonctionnement. Le transformateur n'est pas le seul dispositif pouvant être présenté dans ce montage. Mesures de puissance et de rendement souhaitées. Attentions aux erreurs de calibration des axes (H, B) pour ne pas avoir des mesures de pertes absurdes. Il s'agit de conversion de puissance, non de conversion de signal. Les hacheurs ne sont pas utilisés pour alimenter les moteurs à courant continu. Trop de montages se limitent à des puissances symboliques de l'ordre du milliwatt. Limiter l'étude au redressement par diode, suivi d'un lissage par condensateur, ne couvre évidemment pas le sujet.

**Bibliographie**

Duffait, *Expériences d'électronique* : Pour le redresseur, le hacheur.

Quaranta, *Dictionnaire de physique expérimentale - Electricité* : Pour le transformateur, le redresseur.

Fiat, *Toute la physique de SPE* : Pour le transformateur et le hacheur.

**Introduction**

Chaîne de puissance de la vie courante : centrale -> maison -> lampe, il faut convertir à chaque fois et avec le meilleur rendement possible. On va illustrer trois des quatre familles de conversion : alternatif-alternatif, alternatif-continu et continu-continu.

**1 - Transformateur****1.1 - Présentation****Expérience**

Deux bobines en influence mutuelle, puis sur un noyau de fer doux : ça marche beaucoup mieux car on guide les lignes de champ magnétique. *pas de référence*

Structure d'un transformateur idéal.

Loi des tensions et des courants du transfo parfait. Ne pas dépasser un rapport de 10, constater qu'on a des pertes sans faire de réelle mesure.

**1.2 - Rendement en charge****Expérience**

Utiliser désormais un vrai transformateur, c'est à dire pas pédagogique, et qui divise la tension par 10 si possible, pour être cohérent avec la suite de la fiche. *référence partielle*

Mettre un rhéostat au secondaire et se placer aux valeurs nominales.

Mesure directe de rendement avec deux wattmètres. Noter les mesures de  $P_1$ ,  $P_2$  et du rendement.

Constater les pertes, modèle du transformateur réel à commenter.

On va s'intéresser séparément à chaque type de pertes par la méthode des pertes séparées.

**1.3 - Pertes fer****Expérience**

Etude à vide pour avoir un courant négligeable. *référence partielle*

On mesure  $U$  et  $I$  au primaire et au secondaire pour toute la gamme de tension au primaire.

On trace  $U_2 = f(U_1)$  -> le transformateur est ainsi idéal pour les tensions, on retrouve le rapport théorique.

On trace  $U_1 = f(I_1)$  et  $U_2 = f(I_2)$  -> on discute la linéarité du dipôle.

On trace  $P_1 = f(U_1^2)$  -> c'est la puissance perdue dans le circuit magnétique (pertes fer), elle ne dépend que du champ magnétique créé du fait de la ddp imposée au circuit primaire.

Justification : Pertes par hystérésis proportionnelles à  $f$  et à  $B^2$ , donc à  $e^2$ , donc  $U_1^2$ , bonne variable.

Constater qu'on a une droite et estimer les pertes fer à la tension nominale.

## 1.4 - Pertes cuivre

### Expérience

*référence partielle*

*Etude en court-circuit pour avoir un courant très fort (donc attention...).*

*On mesure  $U$  et  $I$  au primaire et au secondaire pour une gamme de tension raisonnable au primaire (surveiller, il ne faut pas des courants trop forts).*

*On trace  $I_2 = f(I_1)$  -> le transformateur est ainsi idéal pour les courants, on retrouve le rapport théorique.*

*On trace  $P_1 = f(I_2^2)$  -> c'est la puissance perdue dans les enroulements (pertes cuivres), elle ne dépend que de l'intensité qui circule au secondaire.*

*Constater qu'on a une droite et estimer les pertes fer à la tension nominale.*

## 1.5 - Pertes séparées

### Calcul

*Réévaluer le rendement par la méthode des pertes séparées (environ 0,9). Comparer à la valeur expérimentale, qui doit être très proche.*

## 2 - Redresseur double alternance

### Expérience

*référence partielle*

*Pont de diode de redressement (=pont de Graetz) d'un boîtier tout prêt + transfo d'isolement sur l'oscillo si nécessaire pour visualiser les signaux.*

*Lisser avec un condensateur.*

*Mesure du taux d'ondulation en fonction de  $1/R$ . On a la tension efficace en mode AC et la tension moyenne en mode DC.*

*Estimation du rendement avec des wattmètres.*

## 3 - Hacheur dévolteur

### Expérience

*Utiliser un MOSFET BUK455. Prendre  $E=24V$  sur alimentation à masse flottante comme si on sortait du transformateur. Montrer les chronogrammes pour expliquer le fonctionnement du circuit. Choix de la bobine en fonction de la fréquence (qu'on fait ici varier), car il faut un régime de commutation ininterrompu. Mesure du rendement (avec des multimètres car le wattmètre ne veut que du sinusoïdal). Mesure de  $\Delta I = f(\alpha)$ , on peut faire varier l'éclairement en fonction du rapport cyclique du hacheur dévolteur (tout prêt sur plaquette).*

## Conclusion

Montrer la chaîne complète avec une lampe au bout à la place de la résistance (attention ne rien faire griller). On peut assez facilement avoir de bons rendements.

### Avis

*Pas très loin de l'électrotechnique tout ça. Bien avoir en tête le protocole du transformateur, et comprendre ce qu'on fait.*

### Remarques

*Ca peut disjoncter, le prévoir (sauvegarde, repérer le disjoncteur). Pertes cuivre / Pertes fer. Utiliser absolument les valeurs nominales du transformateur. Partir du minimum de puissance quand on met la lampe. Transport en triphasé car 3 fils au lieu de 6 si équilibré, donc moitié moins de pertes joules. Regarder la modélisation du transfo imparfait. Tracer  $U=f(I)$  au secondaire. Impédance de sortie du transformateur = Résistance du bobinage + inductance du flux de fuite. Pertes séparées -> modélisation à puissance réduite utile en industrie. Court-circuit -> parfait pour tension. Coupe circuit -> parfait pour courant. Multimètre : montage aval (A et V ensemble) si  $i$  fort; montage amont (A et V séparés) si  $i$  faible). Attention si U et B sont sinusoïdaux, H n'est que périodique.  $\chi_2$  grand -> incertitudes trop faibles.  $\chi_2$  petit -> incertitudes trop faibles. Ne pas confondre déphasage (sinusoïde) et retard (périodique). Synchro sur ligne idéal. Hacheur = utilisé dans métro, ordinateur... Utiliser des multimètres TRMS. MOSFET = metal oxide semiconductor field effect transistor.*

**Ce que dit le jury...**

Même si l'étude d'un haut-parleur relève du thème, il existe bien d'autres exemples. Le moteur électrique est à l'ordre du jour. Il convient d'insister sur l'aspect quantitatif de la conversion électrique-mécanique. La notion de point de fonctionnement nominal est importante. Un effort pédagogique incluant une approche physique des phénomènes impliqués dans le fonctionnement des moteurs permet d'éviter un montage constitué d'une série de mesures sans logique apparente.

**Bibliographie**

Mérat, Génie électrotechnique : Pour les schémas et bien discuter.

Fiat, Toute la physique de SPE : Pour les équations de bases utiles.

**Introduction**

Il y a un peu plus d'un siècle, la principale source d'énergie était la combustion, qui servait à faire fonctionner les machines à vapeur. Aujourd'hui elle a été remplacée par l'électricité, et nous allons étudier quelques exemples de machines qui permettent une conversion d'énergie électrique-mécanique.

**Expérience**

Expérience qualitative des rails de Laplace. Problème = pas confiné, pas périodique. Mais, réversible.

**1 - Conversion mécanique -> électrique : exemple de la génératrice (MCC)****1.1 - Présentation**

Dans cette partie, le MAS sera vu comme une boîte noire permettant d'entraîner l'axe du rotor.

Stator : circuit inducteur, fixe par rapport au référentiel du laboratoire. Génère un champ magnétique constant car parcouru par un courant continu.

Rotor : circuit induit, ensemble de bobines entourées autour d'un matériau ferromagnétique. Il tourne autour de son axe (entraîné par la MAS) : création de courant induits (induction de Lorentz).

Système balais-collecteur ingénieux : placé au bout de l'induit, permet de garder le couple des forces de Laplace dans le même sens.

**1.2 - Force électromotrice**

Dans tout le montage on essaye de garder U et I du circuit inducteur plus basses que les valeurs nominales pour avoir une large possibilité de vitesses de rotation. On les mesure donc et on vérifie leur valeur. On fait en sorte que I ne dépasse pas sa valeur nominale, même quand il y aura une charge. Dans la suite on sera toujours à flux fixé.

**Expérience**

Vérification de la loi à vide :  $E = k\Phi\Omega$ , à flux fixé, en faisant varier la vitesse de rotation, mesure de  $k\Phi$ . référence partielle

Rq : à vide la caractéristique donnera un cycle d'hystérésis.

**1.3 - Caractéristique en charge et résistance de l'induit**

Pour une résistance de charge R imposée, on peut déterminer le point de fonctionnement qui sera utilisé.

**Expérience**

Etude électrique en charge. On fait varier la charge à flux fixé et à vitesse de rotation constante (en pratique la vitesse de rotation varie avec la charge, il faut donc la régler à chaque fois). référence partielle

On trace d'abord  $U = E - rI = f(I)$ , pour remonter à la résistance interne du moteur (la comparer avec la valeur mesurée à l'ohmmètre).

Si la courbe est non-linéaire à grand I, c'est à cause de la réaction magnétique d'induit (le courant induit crée un champ qui s'oppose au champ inducteur).

**1.4 - Couple des forces de Laplace**

On s'intéresse à l'influence du couple exercé sur le rotor sur la puissance électrique.

## Expérience

*Etude mécanique en charge. Sur la mesure précédente on repère également le couple  $\Gamma$  et la vitesse de rotation  $\Omega$  (qui est fixée). On trace  $\Gamma = k\Phi I - \Gamma_{\text{frottements}} = f(I)$ . On en déduit  $k\Phi$ . En déduire  $k\Phi$  à nouveau et le couple de frottement. (Mesure couple par jauges de contraintes.)*

*référence partielle*

## 1.5 - Rendement

### Expérience

*Tracer le rendement en fonction de la puissance utile. En fait, toutes les mesures sont déjà faites. Autre façon de le voir : on trace le rendement  $\frac{UI}{\Gamma\Omega + U_a I_a}$  en fonction de la valeur de la charge  $\frac{U}{I}$ . Montrer l'existence d'une charge nominale, de rendement maximal.*

*référence partielle*

## 2 - Conversion électrique -> mécanique : le moteur asynchrone

### 2.1 - Présentation

Dans toute cette partie la machine à courant continu sera considérée comme une boîte noire, ayant pour unique rôle de pouvoir appliquer un couple résistif sur le rotor du moteur. Montage identique. Le principe des machines alternatives est de créer un champ magnétique tournant par rapport au laboratoire qui entraîne le rotor assimilable à un moment magnétique.

### 2.1 - Couple des forces de Laplace

#### Expérience

*Tracer sur synchronie à fréquence d'alimentation fixée le couple en fonction de la vitesse de rotation en faisant varier la charge. Le faire pour chaque position du rhéostat de démarrage. On a une faible dépendance, et à couple nul on doit retrouver la fréquence de l'alimentation comme vitesse de rotation (partie stable seule).*

*référence partielle*

Attention au "rhéostat" de démarrage. On démarre à vide normalement. Intérêt de ce rhéostat.

### 2.2 - Rendement

#### Expérience

*Mesure avec deux wattmètres, générateur triphasé réglable.*

*Tracer le rendement en fonction de la puissance utile.*

*On mesure la puissance électrique  $UI$  (avec 2 wattmètres) et la puissance mécanique  $\Gamma\Omega$  en fonction de la charge.*

*De même que précédemment, on doit avoir une charge nominale (Utiliser charge ou puissance utile  $\Gamma\Omega$ ).*

*On peut retrouver à couple nul la vitesse du champ le nombre de paires de pôles (à priori 2) par la formule*

$$p = \frac{\Omega_{\text{magnétique, synchronisme}}}{\omega_{\text{électrique, entre}}}$$

*référence partielle*

## Conclusion

Ouverture sur le fait qu'ici on s'est surtout intéressé à la conversion de puissance, mais qu'on peut aussi avoir de la conversion d'information avec des transducteurs (haut-parleur).

### Avis

*Protocole de tête. C'est de l'électrotechnique. Toujours tout mesurer. Prendre le temps de relire la biblio.*

### Remarques

*Une MCC a deux variables électriques et deux variables mécaniques, elles ne sont pas indépendantes. Bien préciser à chaque expérience quelles sont les variables que l'on fixe et celles que l'on fait varier. Dans l'industrie, ce qui compte c'est le nombre de watt mécanique par kilogramme de machine. Le mieux = oléopneumatique. MCC = extérieur courant continu, intérieur courant alternatif et redresseur. MA = conducteur qui coupe un flux. L'axe des spires est orthogonal à l'axe du rotor. On parle de flux par pôle.  $K$  est relié au nombre de paires de pôle, nombre d'enroulement, géométrie. On parle de résistance apparente de l'induit. Si  $I$  trop fort, autoinduction dans l'induit. Exploiter la plaque signalétique. Le flux en charge est plus faible qu'à vide. Mesure du couple par induction. Attention au sens de rotation. On démarre à vide. Pas de lignes de champs dans le fer. Théorèmes de Leblanc/Ferraris. Le résistor de démarrage permet de diminuer le temps d'établissement du régime périodique.*

**Ce que dit le jury...**

Les notions de temps de réponse des capteurs et de fonction de transfert des transducteurs sont essentielles. On devrait aussi s'intéresser aux qualités de fidélité, sensibilité et justesse qui permettent de transformer ces capteurs en instruments de mesure. La différence entre capteurs et transducteurs est trop souvent méconnue. De ce fait, les candidats se limitent en général à l'étude de différents capteurs sans aborder les transducteurs. Le jury a assisté cette année à des études de haut-parleurs électrodynamiques dénuées de signification physique et très sensibles à l'environnement. Le jury attend au moins une étude approfondie des propriétés de l'un des capteurs présentés ainsi que celle d'un transducteur. Les principes physiques qui sous-tendent le fonctionnement des capteurs étudiés ne peuvent être ignorés des candidats. Le moteur pas-à-pas est aussi un transducteur électromécanique.

**Bibliographie**

Mérat, Génie électrotechnique : Pour la MCC.

Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Electricité : Pour le haut-parleur (transducteurs).

Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Thermodynamique : Pour les capteurs de température.

Taillet, Dictionnaire de physique : Pour les définitions.

Fiat, Toute la physique de SPE : Pour la MCC.

Duffait, Expériences d'optique : Pour les photorécepteurs.

**Introduction**

Annoncer les définitions. Analogie corps humain.

**1 - Transducteurs électro-mécanique****1.1 - Haut-parleur****Expérience**

Fonction de transfert au sonomètre.

Réversibilité.

référence partielle

**1.2 - Machine à courant continu****Expérience**

Tracer le rendement en fonction de la puissance utile (tout mesurer en charge variable). On trace le rendement  $\frac{UI}{\Gamma\Omega + U_d I_d}$  en fonction de la valeur de la charge  $\frac{U}{I}$ . Montrer l'existence d'une charge nominale, de rendement maximal.

référence partielle

**2 - Capteurs de température****2.1 - Expérience****Expérience**

Eau glacée : on plonge les thermomètres (thermocouple type K, thermistance CTN, thermomètre à alcool, Pt100 pour la température) un par un en mesurant leur temps de réponse et la valeur mesurée.

Thermostat : On va de  $T_{amb}$  à  $80^\circ\text{C}$  en plongeant tous les thermomètre dedans. On fait des mesures tous les  $10^\circ\text{C}$ . On trace ensuite tout. Ne pas utiliser de CTP car moins simple.

pas de référence

**2.2 - Discussion**

Discuter les caractéristiques des différents capteurs : linéarité, sensibilité, fidélité, temps de réponse.

**3 - Photorécepteurs**

Présenter la thermopile et dire qu'elle a une réponse plate car corps noir et qu'elle nous servira de référence par rapport à la photodiode.



### 3.1 - Linéarité, sensibilité

#### Expérience

*pas de référence*

Vérifier la linéarité de la photodiode avec la loi de Malus et une diode laser.

Il faut faire la moyenne sur deux angles opposés pour s'affranchir de l'erreur de zéro, et ne pas oublier que c'est affine à cause de la lumière ambiante et du caractère non parfait des polariseurs.

On vérifie que c'est linéaire. La valeur de la pente donne accès à la sensibilité.

Faire de même avec le thermopile dans l'idéal.

### 3.2 - Réponse spectrale

#### Expérience

*référence partielle*

Lampe QI et filtres interférentiels. On normalise la réponse de la photodiode par celle de la thermopile.

Utiliser le nanovoltmètre pour la thermopile.

On trace la réponse spectrale : meilleure sensibilité dans le rouge. Il faut prendre la grosse thermopile.

Attention, rester loin pendant les mesures car sensible à l'infrarouge. Tracer et discuter les réponses.

### 3.3 - Temps de réponse

#### Expérience

*pas de référence*

Avec les mêmes montages que pour la mesure de linéarité (mais les polariseur et analyseur).

Utiliser stroboscope (ou boîte bleu pulses) en source (flash de maximum 100ms, temps de montée non indiqué) pour la photodiode (le stroboscope est peut-être limitant).

Estimation au chronomètre pour la thermopile.

### 3.4 - Résolution d'un capteur

#### Expérience

*référence partielle*

Montrer avec une fente double et caliens vers un oscilloscope, la discrétisation due aux pixels.

Parler aussi du critère de Rayleigh.

Dire que CCD = photodiode en séries sur condensateurs lus par lignes. On a donc une matrice de valeurs lumineuses, donc une image.

## Conclusion

Ouverture sur les très nombreuses utilisations. Choix du capteur en fonction de l'utilisation que l'on veut en faire.

#### Avis

Montage qui se prend très souvent de mauvaises notes, plutôt à éviter a priori, encore que...

Tout n'est pas faisable, peut-être enlever les photorécepteurs.

#### Remarques

Transducteur n'est pas forcément réversible (ex : sonde à effet Hall).

Selon correcteurs : capteur = système permettant de convertir une grandeur physique en une grandeur utilisable comme par exemple une tension électrique ; un capteur est constitué d'au moins un transducteur.

Notions de sensibilité, réponse spectrale, domaine d'utilisation, temps de réponse.

Diode laser = 3mW, attention, lunettes.

Boîtes bleues : pulse jusqu'à 50GHz.

Transducteur : on cherche à tout convertir.

Capteur : on cherche à ne pas perturber.



**Ce que dit le jury...**

Ne pas se limiter au multimètre. Il s'agit de métrologie. La qualité de la mesure doit être clairement exposée. Autres types de mesures que des courants et tensions. Pas que convertisseur analogique-digital. La notion de courte et de longue dérivation peut être utile dans des cas extrêmes (très grandes ou très petites résistances), mais sinon est historique. Connaître les caractéristiques des multimètres ou oscilloscopes utilisés (sensibilité, bande passante...). La réalisation d'un voltmètre de très grande impédance d'entrée (à l'aide de composants à effet de champ par exemple) est possible.

**Bibliographie**

Duffait, *Expériences d'électronique* : Pour le CAN, le multivibrateur, le RLC aussi.  
 Quaranta, *Dictionnaire de physique expérimentale - Electronique* : Pour infos sur multiplieur.  
 Quaranta, *Dictionnaire de physique expérimentale - Electricité* : Pour infos sur multimètres.  
 Taillet, *Dictionnaire de physique* : Pour un discours clair sur la facteur de puissance et EDF

**Introduction**

Importance de la mesure et de l'électronique. On se ramène à la grandeur tension.

**1 - Tension****1.1 - Tension continue, principe du voltmètre, CAN****Expérience**

CAN simple rampe. Vérifier relai et prendre  $RC=1s$ . Mesurer le coefficient RC par regression linéaire. Montrer la reproductibilité. utiliser toujours le RLC-mètre pour les composants. Rampe pas trop rapide pour la précision (env. 1V/s).

**1.2 - Tension variable et valeur efficace, multiplieur**

Donner la définition de la tension efficace et son importance.

**Expérience**

Rajouter en amont du CAN un multiplieur et un filtre RC passe-bas pour garder la composante continue. Attention, c'est juste car on a un signal sinusoïdal, sinon le facteur de forme intervient. Facteur 10 sur le multiplieur.  $R=1\Omega$ ,  $C=1\mu F$ , on envoie 1kHz. *pas de référence*

**Expérience**

Montrer la différence sur une tension carré avec des appareils commerciaux non-RMS RMS et TRMS. Parler du facteur de forme. Comparer avec notre montage. *pas de référence*

**2 - Courants****2.1 - Courants faibles**

Il suffit d'utiliser la Loi d'Ohm dans son domaine de validité et un voltmètre exposé avant.

**2.2 - Courants forts**

Ampèremètres commerciaux nécessitent d'utiliser moins de 10A et d'ouvrir le circuit. Problématique dans l'industrie. On utilise alors des pinces ampèremétriques basées sur l'effet Faraday (alternatif) ou Hall (continue).

**Expérience**

Pince ampèremétrique Fluke noire ( $I>2A$ ) Coeff de 1000. *pas de référence*  
 Etalonnage pour déterminer le coeff avec alim 30V de puissance et N enroulements autour de la pince.  
 Mesure d'un très fort courant avec transformateur pédagogique sur le secteur et bobine de 250 tours et anneau de chimie de l'autre côté. Attention manip dont le danger est à justifier.

### 3 - Puissance

En continu, on fait seulement le produit UI. En alternatif, différents type de puissance (apparente, consommée, réactive).

#### Expérience

*Comparer au wattmètre sur un RC à basse/haute fréquence les différentes puissances. Expliquer pourquoi EDF aime les  $\cos(\phi)$  élevés. D'ailleurs il doit être supérieur à 0,9.* *pas de référence*

Quand on a un signal sinusoïdal, parler du facteur de puissance.

### 4 - Limitations

#### Expérience

*Diagramme de Bode d'un multimètre commercial en croyant le GBF.* *pas de référence*

### 5 - Composants électroniques

#### 5.1 - Résistance

#### Expérience

*Principe de la mesure à 4 fils à bien expliquer (voir remarques) après avoir expliqué l'Ohmmètre. Utiliser AOIP 1 Ohm ou alors long fil (rail de Laplace) pour accéder à la résistance linéique.* *pas de référence*

#### Expérience

*Transition de phase d'un supraconducteur. Hameg + réostat + AO + nanovoltmètre et plaquette prévue pour. Loi thermocouple type T puis adapter le gain pour 77K au début. Faire en réchauffant à partir de l'azote liquide.* *pas de référence*

#### 5.2 - Capacité

#### Expérience

*Multivibrateur astable*

#### 5.3 - Inductance

#### Expérience

*Résonance d'un circuit RLC en mode XY de l'oscillo.*

### Conclusion

Très nombreuses applications.

#### Avis

*Montage présenté par mon binôme. Bon mais long. Prendre toutes les notices.*

#### Remarques

*Soin des câblages. Appareils = CAN adaptés selon la fréquence. Pour les faibles courants, on peut aussi utiliser de l'électronique (AO). Pincés ampèremétriques = transformateurs d'intensité que l'on peut ouvrir (donc défauts des transfo...). Générateur de courant = générateur de tension + grande résistance (ou alors transistor à effet de champ), ça dissipe beaucoup. Parler de sensibilité et de fidélité. Défauts du CAN : sensible au bruit, RC peut changer, temps de réponse des interrupteurs. Solution = double rampe. Il existe aussi le VCO. Bruit = intrinsèque. Parasite = Extérieur. Si non RMS, alors on a  $V_{eff} = \frac{V_{max}}{\pi}$ .  $V_{eff}$  important car donne l'équivalent de puissance en continu. Convertisseurs analog device sensibles au facteur de forme :  $F = \frac{V_{eff}}{\langle V \rangle}$ . Limite basse = bruit thermique  $V_{eff}^2(\text{bruit}) = 4kTR\Delta f$ . Dur si  $V < 1\mu V$ . Foudre = MV. Pertes sur le transfo = courants de magnétisation, hystérésis. Pince ampèremétrique si alternatif, à effet Hall si continu (idéal = système asservi pour un flux nul). Wattmètre = CAN + multiplicateur. Mesure de puissance pas avec GBF. Mesure 4 fils à comparer à l'ohmmètre. Mesurer la tension où les lignes de courants sont parallèles. Source de tension possible : Zener. Ne pas confondre déphasage (sinusoidal) et retard (signal quelconque). Signal sinusoïdal redressé, facteur de forme = 1,11.*

## Remarques

*Montage impasse, puisqu'on a le choix entre deux, si celui-ci tombe, je prendrai l'autre...*

Vive la physique!



Ceci est un atome...

**Ce que dit le jury...**

Trois parties d'égale importance. Réalisation d'une chaîne complète. Différentes solutions technologiques. Pas AM seul. Si démodulation synchrone, le problème de récupération de la porteuse doit être étudié. Suppose culture spéciale. Importance des fibres optiques. Démodulation pas linéaire, plus complexe que filtrage. Le multiplexage, signaux TV et numériques peuvent être abordés.

**Bibliographie**

Duffait, *Expériences d'électronique* : Pour presque l'ensemble du montage.

Quaranta, *Dictionnaire de physique expérimentale - Electricité* : Pour le câble coaxial.

**Introduction**

Problème de la distance et de différentes informations à transmettre.

**1 - Principe général****Illustration**

Décrire la chaîne de transport de l'information à l'aide du schéma sur le tableau sous la forme de bloc.

**2 - Transmission AM****2.1 - Modulation d'amplitude : multiplieur****Expérience**

- Sommer signal sinusoïdal informatif ( $f_I=5\text{kHz}/I=2\text{V}$ ) et offset ( $i=4\text{V}$ ) avec deux AO (sommateur + inverseur).
- Multiplier par une porteuse ( $f_P=100\text{kHz}/P=5\text{V}$ ) Utiliser  $R=10\text{k}\Omega$ .
- Définir taux de modulation  $m=I/i$ , illustrer surmodulation et faire une mesure du taux en XY.

**2.2 - Démodulation d'amplitude : détection synchrone**

Si détecteur d'enveloppe, alors on ne peut pas récupérer un signal surmodulé ou différents canaux. Ici méthode plus efficace, la détection synchrone, mais qui nécessite de connaître la fréquence de la porteuse.

**Expérience**

- Multiplier le signal reçu par la porteuse. En fréquence, on ramène alors le signal sur le continu. Il suffit de filtrer passe bas. On coupe vers 15kHz.

L'inconvénient de la modulation en amplitude est qu'on consomme beaucoup d'énergie pour créer la porteuse qui n'est pas le signal intéressant (et aussi la sensibilité au bruit). Avantage = ça va loin.

**3 - Transmission FM****3.1 - Modulation de fréquence : OCT****Expérience**

- On utilise pour un signal informatif ( $f_I=1\text{kHz}/I=0.1\text{V}$ ) et une porteuse ( $f_P=100\text{kHz}/P=4\text{V}$ ).
- On mesure le coefficient  $k$  en traçant la droite  $f_P(I)$ .

**3.2 - Démodulation de fréquence : PLL****Expérience**

Réaliser la démodulation en expliquant le principe d'une PLL. Vérifier qu'elle accroche à la fréquence recherchée.

**4 - Etude du bloc "Transport"**

## 4.1 - Encombrement spectral de la source

### Expérience

Faire la transformée de Fourier du signal radio, observer un encombrement spectral d'environ 15kHz. L'encombrement spectral de la voix est bien moindre, donc c'est bon. Il faut par contre éloigner les porteuses. pas de référence

Plages de fréquence privilégiées → nécessité de moduler. moduler.

## 4.2 - Trois supports principaux

En pratique : lignes électriques (0-1GHz) ; support Hertzien (1kHz-100GHz) ; fibres optiques (IR-300THz).

## 4.3 - Propagation dans un câble coaxial

### Expérience

- Impédance du long câble coaxial avec le potentiomètre dédié par disparition de la réflexion. référence partielle  
 - Atténuation en dB par diagramme de Bode avec GBF adapté en impédance.  
 Toujours comparer aux valeurs constructeur (50Ω, 3dB/km...) et commenter.

## 5 - Linéarité et réponse fréquentielle de la chaîne

### 5.1 - Diagramme de Bode, Influence de la porteuse

#### Expérience

Diagramme de Bode sur 0-200kHz pour vérifier que plat sur 0-15kHz. Déphasage pas gênant pour le son. pas de référence

### 5.2 - Réponse expérimentale - Multiplexage

#### Expérience

Montrer qu'on récupère au choix micro ou radio en jouant sur la fréquence de démodulation. pas de référence  
 Par sécurité, le faire en AM et en FM, dès qu'on a tout qui marche.

## Conclusion

On a montré mod/demodulation AM et FM sur des signaux analogiques. Il existe d'autres méthodes pour les signaux numériques (modem).

### Avis

Simple, mais long. Bien montrer les spectre à chaque fois pour discuter les fréquences du signal.

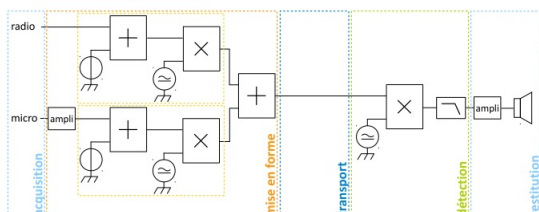
### Remarques

PLL = Comp phase + PBas + OCT), accrochage à vérifier. Linéarité et de réponse fréquentielle de la chaîne. Modem (0=f1, 1=f2). Onde AM de 200kHz se reflètent sur la ionosphère (fréquence plasma 10MHz) et donc se propagent plus loin que les ondes FM de 100 MHz, mais sont plus sensibles aux parasites et ont une bande réduite. Plages bande FM : transmission mono (G+D), stéréo (G-D) et RDS (= Radio Data System). Choix des fréquences selon la taille des antennes. Voix = 60 à 300Hz. Utiliser Agilent pour AM, Hameg pour la FM.

### MP 26 : Mise en forme, transport et détection de l'information

Comment communiquer deux informations différentes par le même chemin ?

#### I Principe général



#### II Etude du bloc « mise en forme »

##### Modulation d'amplitude

Indice de modulation :  $m = \frac{I_o}{I_o}$

$$i(t) = I_o \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t) + i_o$$

$$p(t) = P_o \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t + \varphi)$$

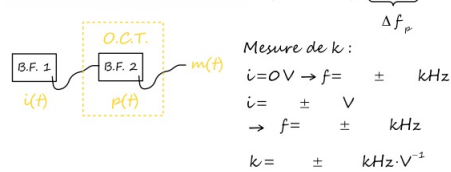
$$m(t) = p(t) \cdot i(t)$$

$$\frac{BD}{AC} = \pm V$$

$$\frac{BD-AC}{BD+AC} = m = \frac{BD-AC}{BD+AC}$$

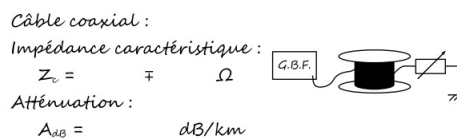
$$\Delta m = \frac{\Delta(BD-AC)}{BD-AC} + \frac{\Delta(BD+AC)}{BD+AC} = \%$$

#### Modulation de fréquence $f_p + f(t) = f_p + k \cdot i(t)$



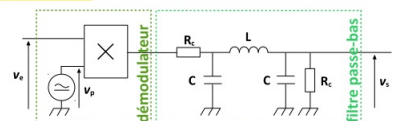
#### III Etude du bloc « transport »

Encombrement spectral de la source : kHz

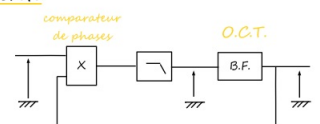


#### VI Etude du bloc « détection »

##### Démodulation d'amplitude : détection synchrone



##### Démodulation de fréquence : détecteur de crête



#### V Réponse fréquentielle du dispositif complet



**Ce que dit le jury...**

*Caractéristiques de la numérisation d'un signal. L'analyse des signaux ne se limite pas à une FFT sur un oscilloscope. L'aspect traitement du signal est trop souvent absent notamment le rapport signal/bruit et l'erreur de quantification. L'étude exhaustive d'un circuit RLC série n'a pas sa place dans ce montage. Pour la numérisation d'un signal, il faut mettre en évidence le rôle de l'échantillonnage et ses conséquences. Périodiser suppose connue la période du signal et on peut dès lors s'interroger sur la pertinence de l'analyse de Fourier subséquente. Les candidats perdent du coup de vue le rôle de la durée totale d'enregistrement sur la résolution spectrale associée à la transformée de Fourier. Au moins pour une partie du montage, le signal que l'on étudie devrait être relié à une grandeur que l'on cherche à mesurer et non fournie par un générateur BF. La détection synchrone compte parmi les méthodes de traitement du signal et son principe peut être illustré dans ce montage qui doit par ailleurs souligner l'importance des méthodes numériques actuelles. Le montage sur l'acquisition et le traitement de données expérimentales a souvent été présenté au moyen de maquettes ou de logiciels qui peuvent se révéler décevants si le candidat fait de leur utilisation le but du montage au lieu de les considérer comme un outil destiné à une meilleure présentation des phénomènes. Il faut également mettre en garde les utilisateurs sur le danger présenté par les logiciels dont ils ne dominent pas la complexité.*

**Bibliographie**

*Duffait, Expériences d'électronique : Pour échantillonneur-bloqueur, CAN, numérisation, détection synchrone.*

*Duffait, Expériences de physique au CAPES : Pour une discussion riche sur la FFT.*

*Taillet, Dictionnaire de physique : Pour la définition du SNR.*

**Introduction**

Chaîne d'acquisition. On va modéliser les différents éléments. On ne traitera pas le fonctionnement du capteur.

**1 - Acquisition : de l'analogique au numérique****1.1 - Échantillonneur-bloqueur**

On a un capteur qui délivre un signal analogique. Ensuite, étape de numérisation.

**Expérience**

*Utiliser la plaquette de l'ENS et voir l'effet sur un sinus. Discuter de l'erreur en fonction de la fréquence d'échantillonnage.*

**1.2 - CAN simple rampe**

il faut numériser la tension échantillonnée.

**Expérience**

*Faire un CAN simple rampe de constante de temps 1 seconde. Vérifier la linéarité et comparer la pente observée à la pente théorique prévue par les mesures au RLC-mètre. Discuter la précision.*

**1.3 - Numérisation****Expérience**

*Faire un CNA réseau R-2R dans un convertisseur à approximations successives. Discuter la précision en fonction du calibre et du nombre de bits.*

## 2 - Analyse de Fourier d'un signal échantillonné

### 2.1 - Critère de Shannon : importance de la fréquence d'échantillonnage

#### Expérience

*On fixe la fréquence d'échantillonnage et la durée totale, et on envoie différentes fréquences à l'entrée (deux sinusoïdes par exemples). On met en évidence le repliement de spectre, puis on filtre passe pas pour résoudre le problème. Adapter les valeurs en fonction des composants à disposition.*

*pas de référence*

### 2.2 - Résolution spectrale : importance de la durée d'acquisition

#### Expérience

*Influence du temps d'acquisition sur la résolution spectrale.  
Compromis largeur/résolution si nombre de point fixé comme dans synchronie ou sur un oscillo.  
Problèmes de périodisation liés à la FFT, techniques d'apodisation.*

*pas de référence*

## 3 - Extraction d'un signal d'un environnement bruité

On va utiliser ici la technique de battements (addition).

#### Expérience

*Mesure de l'effet Doppler avec la table traçante et les ultrasons. Scotcher l'émetteur.  
Mettre ampli et sommateur pour voir les battements  
Mesure des rapports signal/bruit (à défaut de faire l'expérience suivante).*

*pas de référence*

On va utiliser ici la technique de détection synchrone, utile lorsque les battements ne sont plus observables (fréquences trop proches).

#### Expérience

*La même chose mais avec ampli, multiplieur et passe bas pour détection synchrone.*

*pas de référence*

#### Expérience

*Lampe (0,4Hz,5V) + hacheur optique (70Hz) + photodiode (à 2m) + amplificateur à détection synchrone.  
Mesure des rapports signal/bruit avec et sans détection synchrone. Attention, l'intensité est le carré de la tension d'alimentation donc on trouve un signal à fréquence double.*

Bien expliquer le fonctionnement.

Insister sur l'aspect traitement du signal : on le multiplie, on le filtre.

Dire qu'on améliore le rapport signal sur bruit.

## Conclusion

Evoquer les problème de dérivation numérique et donc l'utilité du lissage.

Le capteur joue aussi un rôle essentiel (temps de réponse, sensibilité...).

Il faut rajouter une mémoire et une base de temps.

#### Avis

*Pas d'avis, si ce n'est que les rapports du jury ont l'air d'en attendre plus.*

#### Remarques

*On doit aborder les différentes étapes majeures du processus :*

- échantillonnage du signal*
- conversion analogique-numérique*
- traitement numérique par TF*

*Parler du critère de Shannon dès l'échantillonnage en l'illustrant.*

*Pour des tensions,  $SNR = 20 \log \left( \frac{V_{signal}}{V_{bruit}} \right)$ .*

**Ce que dit le jury...**

*La résolution spectrale lors d'une transformée de Fourier discrète n'est pas toujours connue. Même si un stroboscope présente un intérêt pédagogique, il ne saurait être préféré à un fréquencemètre. Lorsqu'on dispose d'une méthode plus précise, l'utilisation du chronomètre n'est pas recommandée. Connaître les méthodes de détermination de fréquence par multiplication (translation) ou hétérodynage. Le candidat doit avoir un minimum de connaissances sur la fonction FFT des logiciels spécialisés ou des oscilloscopes.*

**Bibliographie**

*Duffait, Expériences d'électronique : Pour le fréquencemètre.*

*Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Mécanique : Pour le pendule simple, les battements acoustiques, vidéocom.*

*Duffait, Etude expérimentale des oscillateurs mécaniques - BUP 867 : Pour vidéocom.*

*Duffait, Expériences de physique au CAPES : Pour le stroboscope.*

*Collectif, BUP - 761 : Pour tout sur le son.*

**Introduction**

On a souvent à mesurer des fréquences (musique, résonance...).

**1 - Mesure par comptage****1.1 - Pendule simple, chronomètre****Expérience**

*Pendule bifilaire pour être sûr d'avoir un mouvement dans un plan. Compter au chronomètre 10 périodes pour diminuer l'incertitude. Demander au technicien de faire la manip dix fois pour mener une étude statistique. Repérer au maximum d'amplitude, et pas au lancement.*

**1.2 - Diapason, fréquencemètre****Expérience**

*Le fréquencemètre électronique (compteur d'impulsion), expliquer le principe, bascule JK, bien montrer les différents signaux à l'oscilloscope. Brancher un micro sur un comparateur, suivi d'une diode et d'un pont diviseur de tension pour se ramener à un signal 0 ou 5 V, le mettre en entrée du fréquencemètre, mesure la fréquence d'un diapason. Penser à comparer avec le fréquencemètre commercial. Utiliser le boîtier ENSL. Prendre l'oscillo 4 voies pour montrer tous les signaux si possible. Précision au hertz.*

**2 - Mesure par comparaison****2.1 - Battements acoustiques****Expérience**

*Deux diapasons presque identiques, dont un désaccordé. Acquisition sur Synchronie avec un micro. Mesurer la période des battements, supposer une première fréquence connue, en déduire la seconde.*

**2.2 - Champs tournant, stroboscope****Expérience**

*Utiliser aiguille aimanté et champ tournant avec trois bobines alimentées en triphasé avec noyau de fer. Utiliser stroboscope avec fréquencemètre, faire une régression linéaire avec les fréquences multiples. Expliquer l'apparente immobilité, d'où ok pour hautes fréquences seulement. Remonter à la valeur de 50Hz du secteur. (Peut aussi se faire sur un petit moteur prévu pour ça, mais sans le 50Hz.)*

## 2.3 - Détection synchrone

### Expérience

Mesure de l'effet Doppler sur table traçante (ou à défaut haut-parleur) par détection synchrone pour voir les battements. Ainsi on a directement la fréquence de décalage. Tenter de remonter à la vitesse de la table. Puis par régression linéaire à la vitesse du son. Permet de valider le modèle isentropique au détriment du modèle isotherme. pas de référence

## 3 - Mesure par transformée de Fourier

### 3.1 - Pendules couplés

#### Expérience

Vidéocom, pendules couplés. On excite la chaîne de pendule, on enregistre le signal avec vidéocom, on fait la transformée de Fourier, on récupère les fréquences propres du système. Illustrer le fait qu'elles correspondent à des modes propres. Parler des critères d'une bonne TF : temps d'acquisition (résolution), Shannon.

### 3.2 - Diapasons multiples

#### Expérience

Mettre plein de diapasons ensemble et voir que la FFT permet d'accéder à leurs fréquences respectives. Pas de battements car assez éloignés. pas de référence

## Conclusion

Ouvrir sur la spectroscopie optique.

### Avis

Un montage cool.

### Remarques

Hétérodynage = détection synchrone. Caisse du diapason = adaptation d'impédance avec l'air, dimension d'un quart de longueur d'onde, mais élargi le pic à cause de l'atténuation du signal. C'est un montage de métrologie, pour lequel il faut beaucoup soigner la discussion sur les incertitudes, d'autant plus que les expériences sont simples. Mesure une fois  $N$  période plutôt que  $N$  fois une pour diviser l'incertitude par  $N$  plutôt que par  $\sqrt{N}$ . CMOS = autre logique possible. Temps de basculement des portes de l'ordre de la microseconde, pareil pour l'AO. TTL utilise transistor bipolaire NPN, portes logiques. Compteur = mélange de ET et de OU. La masse linéique et la hauteur du diapason modifient sa fréquence de résonance. Le son vient de la vibration en opposition de phase des deux branches avec un noeud de pression au point de jonction. La fréquence est donnée par  $f = \frac{1}{l^2} \sqrt{\frac{AE}{\rho}}$  avec  $l$  la longueur des branches,  $A$  l'aire de la section des branches,  $E$  le module d'Young du matériau et  $\rho$  sa masse volumique. Pieds dans TF car fenêtre de pondération. CMOS bascule à 15V, TTL à 5V.

## Ce que dit le jury...

Balayer les diverses échelles de longueurs, de l'infiniment petit à l'infiniment grand. Les incertitudes, malgré leur importance dans ce montage, sont souvent très mal gérées et mal hiérarchisées. Il est inutile d'utiliser un interféromètre de Michelson pour déterminer la différence de marche engendrée par une lame de microscope si on cherche à déterminer son épaisseur avec un indice peu précis. Les appareils de mesure traditionnels (palmer, mètre-ruban) permettent de vérifier les valeurs obtenues par des méthodes dont on cherche à illustrer le principe.

## Bibliographie

Duffait, *Expériences d'optique* : Pour la lame de microscope, et le montage Fraunhofer.

## Introduction

La physique est géniale car on explore beaucoup d'ordres de grandeur. Ici on va essayer de mesurer des distances de différents ordres de grandeurs.

Donner la définition du mètre basée sur la vitesse de la lumière et la définition de la seconde.

## 1 - Distances usuelles

## 1.1 - Instruments usuels

## Expérience

Présenter rapidement les différents instruments usuels (Règle, palmer). Mesurer la longueur de la table (Considérer que c'est un mètre étalon), dire qu'on se réfère donc à un étalon. pas de référence

Une règle n'est pas toujours ni pratique, ni possible.

## 1.2 - Télémètre acoustique

## Expérience

Montrer l'appareil commercial puis faire une mesure de distance avec émetteur et récepteur dans air et dans eau. On s'affranchi ainsi du temps de réponse des appareils. Envoyer des pulses. A la limite, ne faire que dans l'air. Vérifier la distance au mètre ruban. Vitesse dans l'air = 340m/s, vitesse dans l'eau = 1328 m/s. Le mieux est de mesurer la température est de chercher dans un Handbook. pas de référence

## 2 - Grandes distances

## 2.1 - Télémétrie laser

## Expérience

Utiliser le boîtier P18.6 "mesure de la vitesse de la lumière" (diode laser et photodiode). Soit avec des impulsions, soit avec des sinusoides pour mesurer le déphasage. Utiliser le banc d'optique, se placer assez loin et faire une correction à cause du cosinus. Faire une mesure de référence pour s'affranchir du temps de réponse du capteur, ou alors faire une mesure différentielle. Réflexion grâce à un miroir. Dire que c'est ainsi qu'on mesure la distance terre-lune car des réflecteurs coin-cube ont été déposés dessus par les missions Apollo. (Bonus) pas de référence

En général méthode limitée à des distances inférieures au kilomètre.

## 2.2 - Parallaxe

Pour étoiles lointaines, pas de réflexion, on utilise la parallaxe.

## Expérience

Aligner les deux goniomètres avec un laser (ou une QI + AC + dépoli) puis pointer le bâtiment d'en face en un point précis (ou le fond de la salle à défaut). Utiliser la formule qu'on retrouve facilement :  $h = \frac{d}{\frac{1}{\tan(\alpha)} + \frac{1}{\tan(\beta)}}$ . Mesurer les angles sur le vernier. Incertitudes avec dérivée logarithmique. Bien écarter les deux goniomètres. pas de référence

## 3 - Petites distances

### 3.1 - Interférométrie, lame de verre

#### Expérience

*On utilise le Michelson en lame d'air et lumière blanche pour repérer le contact optique et laser pour compter les franges. On utilise l'indice du verre borosilicaté D 263  $n=1,5230$ . La laser rouge permet d'avoir une mesure plus précise qu'au palmer, ce qui n'empêche pas de vérifier avec ce dernier (et vérifier son zéro). Fixer la lame sur un bout de polystyrène, pas sur un miroir, surtout pas. Attention au facteur 2. S'arranger pour voir les franges laser tout le temps (peu importe si elles sont dans la lame où pas) car c'est elles qui nous permettent de compter plus précisément que la vis micrométrique. si besoin, utiliser une lame semi-réfléchissante en entrée car on a alors deux sources lumineuses. Comparer aux données constructeur.*

*référence partielle*

### 3.2 - Diffraction, cheveu

#### Expérience

*On se place dans les conditions de Fraunhofer puis on utilise la formule de l'interfrange pour déterminer le diamètre d'un cheveu. On peut faire une droite d'étalonnage avec des fil de diamètre tabulés.*

*référence partielle*

### 3.3 - Diffraction, paramètre de maille

#### Expérience

*On utilise le dispositif ENSL et la formule de Bragg. On observe deux anneaux, qui correspondent aux deux premières familles de plans réticulaires du graphène (213pm et 123pm). On observe que le premier ordre soit parce que les autres correspondent à des distances trop grandes par rapport à celle de l'écran, soit parce qu'ils ne provoquent pas assez de luminosité, ou encore parce que la figure de diffraction est trop petite. On trace en gros (regarder la notice pour le détail)  $1/R$  en fonction de la racine de la tension (voir notice).*

*pas de référence*

## Conclusion

Caractère absolu ou relatif de la mesure. Analyse dimensionnelle

#### Avis

*Un montage cool mais avec peu de références. Attention avec les laser. Une seule des deux télémétrie peut suffire. Les notices aident souvent.*

#### Remarques

*Pour des dimensions plus petites qu'avec le Palmer, il existe le profilomètre, la jauge de profondeur en salle blanche, le microscope à force atomique. Poudre de graphite plutôt qu'un cristal car ainsi on scanne tous les angles possibles en même temps. Faire courbe d'étalonnage avec différentes tensions pour les électrons. Le palmer ne convient pas aux objets mous. Comparer taille émetteur et longueur d'onde pour dire si ça diffracte (ultrasons, 8,5mm)... Sortir un modèle moléculaire pour illustrer le graphite (hexagonal compact). Utiliser banc d'optique pour la mesure du cheveu et faire courbe d'étalonnage avec différents fils. Le clic du palmer indique qu'on applique le maximum. 1 Parsec = distance à laquelle on voit 1 unité astronomique sous 1 seconde d'arc. Négliger la différence entre l'indice de l'air et l'indice du vide conduit donc à une erreur d'environ 0.03 %. A mi-chemin, on a des interférences sur le bord de la lame de verre. On évite d'imposer une tension supérieure à 5 kV, seuil au delà duquel il y a production de rayons X néfastes.*



**Ce que dit le jury...**

Les notions de *stabilité*, de *temps de réponse* et de *précision* sont essentielles. Le monde moderne regorge de systèmes asservis évitant l'utilisation de *boîtes noires*. Le produit *Gain \* Bande passante = constante* ne doit pas être attendu aveuglément, les conditions de *validité* de cette relation doivent être connues. La connaissance du comportement en *fréquence* des quadripôles est nécessaire pour discuter les propriétés d'un système bouclé. Le tracé d'un *diagramme de Bode* peut faciliter la présentation. Il n'est pas nécessaire de se lancer dans des prestations trop techniques. Les méthodes de *corrections PID* peuvent être montrées. On peut se limiter aux asservissements analogiques. Certains dispositifs un peu sophistiqués permettent d'illustrer assez complètement de nombreux aspects du sujet. Il est dangereux d'utiliser une maquette dont on ne connaît pas le principe. Il existe des montages simples utilisant par exemple un correcteur (PI, PID, ...) et permettant l'étude de l'asservissement de vitesse (ou de position) d'un *moteur*. Bien qu'on exige davantage à l'agrégation, il faut savoir qu'une simple *régulation de température* en tout ou rien permet déjà de montrer un certain nombre de phénomènes.

**Bibliographie**

*Duffait, Expériences d'électronique : Pour l'AO, la PLL, et l'asservissement en position.*  
*Pérez, Electronique : Pour un peu de théorie.*

**Introduction**

Intérêt des systèmes asservis. Ici systèmes stables analogiques.

**1 - Amplificateur opérationnel****1.1 - Etude en boucle ouverte**

Présenter l'AO dans les grandes lignes.

**Expérience**

Justifier qu'on effectue un montage bouclé mais qu'on mesure les paramètres de la chaîne directe. Tracer le diagramme de Bode. Mesurer gain statique et bande passante.

**1.2 - Etude en boucle fermée****Expérience**

Faire la même chose et constater la conservation du produit gain\*bande passante car l'AO se comporte comme un système d'ordre 1. Dégager l'intérêt du bouclage.

**2 - Asservissement en position d'un moteur****2.1 - Principe****Illustration**

Illustrer et discuter sur le schéma bloc.

**Expérience**

Faire une rapide démo pour montrer qu'on contrôle bien la position. Attention, remplacer le troisième AO sur ampli de puissance "-1".

**2.2 - Fonction de transfert****Expérience**

En gain fort, faire une réponse indicielle, dériver le signal reçu, en faire la transformée de Fourier. On obtient la fonction de transfert du système bouclé. Noter la fréquence de résonance et le gain maximal. *référence partielle*

## 2.3 - Qualité de la réponse

### Expérience

Mettre en évidence l'influence du gain sur la réponse. Dépassement, temps de réponse, erreur statique. Discuter l'importance de ces paramètres selon l'application. Appliquer une tension crête pour cette étude (réponse indicielle). Nécessité d'un compromis.

## 2.4 - Amélioration par correction

### Expérience

Corriger par avance de phase et calculer le nouveau coefficient  $m$ . Passer ensuite au PID.

## 3 - Boucle à verrouillage de phase

### 3.1 - Etude du VCO

#### Expérience

Expliquer la rétroaction. Faire son propre VCO si on a le temps.

### 3.2 - Plage d'accrochage

#### Expérience

Mesurer la plage de verrouillage. Comparer à ce qu'on attend.

## Conclusion

Permet le développement du microscope à force atomique, de l'optique adaptative...

Ouverture sur les oscillateurs qui sont des systèmes bouclés instables.

### Avis

Un bon montage à priori La PLL est un peu bonus. Ce n'est pas difficile mais il faut prendre le temps de relire la référence, qui est unique. Quand même peu de mesures vérifiables à mon goût.

### Remarques

Système bouclé permet un système d'erreur. Préciser que le système est linéaire pour que notre modélisation soit correcte en terme de A et B. Contre-réaction ? Si  $AB \gg 1$  alors  $FTBF \approx 1$  donc que chaîne retour, on peut prévoir le gain. Définir stabilité : pôles à partie réelle négative, entrée bornée  $\rightarrow$  sortie bornée. Le produit gain bande-passante est constant si le système est d'ordre 1. si l'on traite l'AO il faut impérativement montrer l'instabilité de l'AO en boucle ouverte de façon introduire l'intérêt du bouclage. On peut au passage définir la notion de stabilité : entrée bornée-sortie bornée. Pour un système du premier ordre, ne pas hésiter à se servir de la phase pour déterminer la pulsation de coupure. Notions de temps de réponse et d'écart statique en fonction du type d'excitation à l'entrée. Il serait d'ailleurs bienvenu d'illustrer le critère de Barkhausen sur un diagramme de Nyquist. L'usage des correcteurs dans les systèmes bouclés est très important. Peut-être mettre un suiveur avant l'OCT dans la PLL. AO en chaîne directe réelle, il faudrait des tension de l'ordre mais c'est l'ordre de grandeur du bruit.

AO = ampli de tension différentiel + ramené à la masse + adaptation d'impédance.

AO = 3 étages, donc au moins 3ème ordre, corrigé filtre passe bas 1er ordre. Moteur = second ordre car passage de vitesse à position  $\rightarrow 1/p$ .

AO = 22 transistor = Miroir de courant + ampli diff. + push pull.

Temps de réponse = durée nécessaire pour que la réponse ne difère pas plus de 5% de la valeur finale. Temps de montée = durée nécessaire pour que la réponse passe de 10% à 90% de la valeur finale. Il existe aussi les correcteur PI, PD et PID. Ne pas confondre plage d'accrochage et de verrouillage.

	Précision	Stabilité	Rapidité
Sur le PID :	P	↗	↘
	I	↗	↘
	D	↘	↗

Avance de phase = correcteur PD dont le gain est tronqué en haute fréquence.

**Ce que dit le jury...**

Les candidats doivent prendre en compte les deux aspects de l'intitulé du montage. Cette année, les présentations se sont trop souvent limitées aux aspects non-linéaires. Il s'agit de bien illustrer quelques caractéristiques typiques des systèmes non-linéaires : pluralité des positions d'équilibre, bifurcation, caractérisation des non linéarités, ralentissement critique... Eviter un choix trop ambitieux de manipulations non maîtrisées. Il faut dégager en quoi les propriétés observées entrent dans le cadre plus général des phénomènes non-linéaires..

**Bibliographie**

Duffait, *Etude expérimentale des oscillateurs mécaniques - BUP 867* : Pour le pendule grand angle avec le programme.

Krob, *Electronique expérimentale* : Pour l'oscillateur de Van der Pol.

Taillet, *Dictionnaire de physique* : Pour les instabilités hydrodynamiques et des définitions.

Boissel, *La bille qui rebondit : une expérience simple pour aborder la physique du chaos - BUP 741* : Pour la bille qui rebondit.

Pérez, *Electronique* : Pour la dynamique des oscillations.

Vigoureux, *Introduction à l'étude des systèmes non linéaires - BUP 722 et BUP 724* : Pour la suite logistique.

**Introduction**

Approximation linéaire en général. Que se passe-t-il quand on s'éloigne du domaine de réponse linéaire ?

**1 - Du linéaire au non-linéaire : le pendule pesant aux grands angles.****Expérience**

- Vérification de la linéarité du capteur (attention à la discontinuité du potentiomètre, se placer du bon côté). Faire le zéro puis les mesures en  $+\theta$  et  $-\theta$  pour s'affranchir de l'erreur systématique.
- Vérification de l'équilibrage à vide.
- Mesure de la période pour en déduire le moment d'inertie à petit angle. Ellipse du portrait de phase.
- Faire la longue mesure de 5 minutes à grand angle et utiliser le programme donné par le BUP. Se placer en amortissement solide. Montrer que l'ellipse s'est déformée.
- Discuter l'écart à l'isochronisme à 1% puis l'écart à la formule de Borda à 1%.
- Montrer que cela correspond à la création d'harmonique. Attention il faut garder les anciennes courbes.
- Bonus non fait : Utiliser deux aimant pour créer un double puit.

Essayer de faire toute l'exploitation sur une mesure.

**2 - Un oscillateur fonctionnant sur les instabilités : le Van der Pol****Expérience**

- Tracer la caractéristique du composant non-linéaire, montrer sa modélisation polynomiale cubique. *référence partielle*
- Vérifier la valeur de la résistance critique prédite par l'équation, expliquer les différents termes et interpréter la stabilité avec leurs signes.
- Montrer diagramme de bifurcation.
- Caractériser les oscillations près de la bifurcation en terme de période et montrer l'amplitude en  $\sqrt{\epsilon}$  avec un comportement proche d'une sinusoïde.
- Dynamique de l'instabilité et sa caractérisation par un temps donné par l'équation de VdP linéarisée.
- Regarder les amplitudes à R grand et observer les déformations du cycle limite, la variation de la fréquence, l'enrichissement du spectre.
- Passer en configuration double puits. Illustrer régime libre et régime forcé, puis chaos.
- Bonus : Cascade sous-harmonique pour remonter à une estimation de la constante universelle  $\delta$ .

Ne pas oublier la dynamique de l'instabilité avec programme BUP pendule grand angle.

## 3 - Transition vers le chaos et universalité

### 3.1 - Dynamique des populations

Dire quelques mots sur le chaos (déterminisme, imprédictibilité exponentielle, dimension...). Présenter la signification de l'équation, les différents termes. Ici dire qu'on fait une expérience numérique.

#### Calcul

Suite logistique :  $X_i = aX_{i-1}(1 - X_{i-1})$  avec  $a$  variant de 1 à 4 (Population d'insectes ou autre). *pas de référence*

#### Expérience

- Faire la simulation numérique avec Regressi (afficher avec des pixels). *pas de référence*
- Retrouver une valeur approchée de la constante de Feigenbaum  $\delta$  en zoomant de 3,5 à 3,6.
- Commenter abondamment la figure : Similarité, fractales, bifurcations, chaos, stabilité dans le chaos...

### 3.2 - Bille et vibreur

#### Expérience

- Utiliser vibreur avec ampli et support incurvé, accéléromètre avec amplificateur (attention il faut qu'il se fixe dessus, donc un petit), balle de ping pong. *référence partielle*
- Régler l'horizontalité du système.
- Montrer les modes 1, 2, 4 et chaotique expérimentalement. Montrer le principe de la mesure à la main. Sinon pour faire un programme il faut filtrer passe haut puis dériver l'accélération avant de finalement déduire les phases mais c'est trop long. Tracer donc des bouts de diagramme de bifurcation avec ces mesures (phases du choc mesurées à l'oscillo en run/stop en fonction de l'amplitude).
- Montrer que ce système a des propriétés analogues à la dynamique des populations (On ne mesure pas Feigenbaum car ça part très vite dans le chaos, même avec des différences faibles d'amplitude d'excitation).

## Conclusion

Résolution numérique uniquement. Outils d'étude qui existent : analyse fréquentielle, portrait de phase avec points fixes, cycles limites et attracteurs. Ouverture sur les systèmes chaotiques.

#### Avis

Les deux premières expériences sont à soigner et peuvent suffire. La suite est un peu du bonus mais permettra de faire la différence et marquer son originalité. Parler de point fixe, cycle limite, cascade sous-harmonique, exposants de Lyapunov (imprédictibilité exponentielle avec le temps)... La troisième expérience, à moitié numérique, est un peu un pari. Il faut bien justifier le lien avec le système exposé.

#### Remarques

Le composant non linéaire contient des diodes. Eviter de laisser des appareils allumés toute la durée du montage s'ils ne sont pas utilisés (QI, GBF, Oscillo,...) et ne laissez pas de multiprises pendre dans le vide. On peut essayer de regarder la FFT du signal du pendule mais il va falloir prendre beaucoup de précautions (puissance de 2, bon choix de la fenêtre, nombre entier de période,...) et ne pas s'attendre à avoir des harmoniques très élevées : à une amplitude  $A$  fondamental correspond une amplitude  $A^2/192$  de l'harmonique de rang 3. Il existe l'instabilité de Jeans en gravitation. Les solitons, phénomènes de tsunamis et autres mascarets sont autant d'illustrations des phénomènes non-linéaires. Dans toutes les expériences, il faut bien identifier où se situe la non-linéarité et pourquoi il y a instabilité (compétition entre mécanismes stabilisateurs et ceux déstabilisateurs) lorsqu'il y en a. Pas de cycle limite à 1D. Pas de Chaos à 2D. Importance de la "dimension" du système dynamique, qui est le nombre équations différentielles du premier ordre couplées. En fait système forcé est 3D (deux tensions, une phase). La courbe ne se croise pas avec elle même, c'est interdit pour un système déterministe. Attracteur de Lorenz et équations à regarder pour expliquer la météorologie. Cycle limite = courbe fermée isolée. Instabilité cause la non-linéarité par saturation. Dans Rayleigh-Bénard, le paramètre est le nombre de Reynolds. On peut montrer la chaîne de soliton éventuellement. Utiliser le bouton autoscale en dernier recours. La rapport de grandissement vertical tend aussi vers une limite. VdP = Intégrateur + Inverseur + Intégrateur. Préciser que si les trajectoires se coupent, c'est que l'on regarde la projection à 2D d'un espace de phase 3D (à cause du forçage temporel qui donne la troisième dimension). Chaos bille : vitesse et phase du choc.

**Ce que dit le jury...**

*L'existence de conditions aux limites permet aussi l'apparition de phénomènes de réflexion, réfraction, diffraction, interférence, propagation guidée... La notion d'impédance caractéristique n'est pas limitée au câble coaxial et ne doit pas être totalement disjointe de la notion d'onde. Autres domaines que l'optique.*

**Bibliographie**

*Taillet, Dictionnaire de physique: Pour définir l'impédance, pour l'impédance caractéristique.  
Fiat, Toute la physique de SPE : Pour le câble coaxial, la corde de Melde.  
Pérez, Electromagnétisme : Pour la théorie de la propagation guidée si besoin.*

**Introduction**

On a étudié différents phénomènes ondulatoires. On va mettre en évidence différentes caractéristiques de la propagation et des conditions aux limites dans différents domaines de la physique. Ondes acoustiques/Ondes EM. Propagation libre/Propagation guidée.

**1 - Propagation libre****1.1 - Mise en évidence****Expérience**

*Tube néon et émetteur d'hyperfréquence avec antenne. On constate un transfert d'énergie sans contact. Il y a donc propagation.* *pas de référence*

Transfert pas instantané, à quelle vitesse ?

**1.2 - Mesure de la vitesse****Expérience**

*On place l'émetteur et le récepteur ultrason le plus près possible sur le banc d'optique. On acquiert les signaux émis et reçus à l'oscilloscope. Ensuite, on cherche les positions où les deux signaux sont en phase. On trace sur régressi la position en fonction du nombre de phases passées. Afin de mieux voir le signal on peut utiliser le moyennage sur l'oscilloscope. Discuter incertitudes et comparer à un Handbook (autre méthode = deux micros et un clap, moins préci car pas de régression).* *pas de référence*

Limite méthode = petites longueurs d'onde. Il faut alors s'aider des conditions aux limites et des phénomènes qu'elles engendrent.

**2 - Effet des conditions aux limites****2.1 - Réflexion et transmission aux interfaces****Expérience**

*Montrer la réflexion et qu'elle s'annule lorsque la résistance vaut le module de l'impédance caractéristique du câble  $R_C = \sqrt{\frac{L}{C}}$ . On crée avec le GBF une impulsion brève de 20 nanosecondes répétée dans le temps tous les 10 microsecondes. On regarde à l'oscillo, on mesure à l'ohmmètre. Comparer à la valeur attendue de 75Ohm, mais tout le monde trouve 78hm.*

La réflexion peut donner une onde stationnaire si l'onde est confinée.

**2.2 - Ondes stationnaires****Expérience**

*Utiliser une corde élastique fixée à la poignée de la porte et mettre en évidence à la main différents modes.* *pas de référence*



## Expérience

*Corde de Melde. Mesurer masse linéique de la corde, tension et longueur pour prévoir les fréquence de résonances. Exciter avec un vibreur. Mesurer au stroboscope en regardant si les noeuds sont fixes. La précision d'un fréquencemètre n'est pas forcément requise.*

On va utiliser ce phénomène pour effectuer des mesures précises.

## Expérience

*Cavité Fabry-Pérot du banc hyperfréquences pour mesurer la vitesse de la lumière. Mesurer avant tout la fréquence envoyée par le banc grâce à l'ondemètre et s'enlever de la résonance. On place ensuite l'émetteur et le récepteur (relié à synchronie) avec cornets de chaque côté du Fabry Pérot. On lance l'acquisition de 2 à 3 minutes après avoir optimisé les réglages habituels de sensibilité. Pic d'intensité lorsque la distance entre les deux plaques est un multiple de la moitié de la longueur d'onde. Discuter incertitudes et comparer avec la valeur attendue, dire qu'on a pas de dispersion.*

*pas de référence*

Mettons en évidence l'intérêt des cornets.

## Expérience

*Mesure du rapport d'onde stationnaire ( $E_{max}/E_{min}$ ) pour différents plaques en sortie. Mesure sur l'oscilloscope avec la ligne où on sonde. Relier au coefficient de réflexion simplement car  $E_{max}=E_i+E_r$  et  $E_{min}=E_i-E_r$ . Comparer et parler d'impédance (autre méthode = impédance du verre avec cloche à vide).*

## 3 - Propagation guidée, conditions aux limites transverses

Que se passe-t-il exactement dans le banc ?

## Expérience

*On mesure la fréquence avec l'ondemètre. On mesure la longueur d'onde avec la ligne à sonder. On tracer la relation de dispersion  $k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\pi^2}{a^2}$ . En déduire la largeur  $a$  du guide d'onde. Comparer à la notice et à une mesure au pied à coulisse.*

La propagation guidée induit de la dispersion.

## Conclusion

Généralité des phénomènes ondulatoires. Adaptation d'impédance.

## Avis

*A part le banc hyperfréquence que je n'aime pas franchement mais qui a une bonne notice, les expériences sont sympa et ne nécessitent pas ou peu de références. Ne pas confondre les ultrasons et les hyperfréquences.*

## Remarques

*Câble coaxial : on ne mesure que le module de l'impédance, réelle seulement si pas de pertes. Parler d'impédance, moteur de la propagation, échange d'énergie entre deux degrés de liberté : cinétique/potentiel pour la corde, capacitif/inductif pour le câble, électrique/magnétique pour les ondes EM, vitesse/pression pour les ondes acoustiques, courant/tension pour la ligne à éléments répartis. L'impédance caractérise le transfert entre ces deux grandeurs, ce n'est pas seulement aux interfaces. Une onde est un cas particulier de champ, où il y a couplage entre les coordonnées spatiales et temporelles, avec double périodicité. Discriminer entre les modèles isotherme et isentropique pour la propagation des ondes acoustiques. On peut voir une onde stationnaire comme la superposition de deux ondes progressives. Le guide d'onde met en évidence la dispersion : l'utilisation des ondes stationnaires dans le sens de la propagation est une astuce qui permet de remonter à la longueur d'onde. La fréquence est mesurée via l'ondemètre qui est une cavité accordable, et l'abaque permet de convertir la longueur mesurée avec le vernier en une fréquence. Le champ E est vertical dans le guide, en mode TE1. La vitesse du son augmente avec la température de l'air. On pourrait aussi y mettre l'effet Doppler.*



## Ce que dit le jury...

Le jury attend des notions plus variées que les seules mesures de célérité. On peut penser aux phénomènes : de réflexion-transmission, d'interférences et de diffraction, de modes; aux notions d'impédance acoustique, de timbre, de hauteur, d'effet Doppler; aux nombreuses applications (instruments de musique, sonar, échographie). Il est conseillé de ne pas se limiter à la propagation dans l'air ni à une gamme de fréquences restreinte aux fréquences audibles. Le rôle de la caisse de résonance d'un diapason reste méconnu. Les fonctionnements des microphones et haut-parleurs électrodynamiques présentent des analogies, mais la force de Laplace et la loi de l'induction sont deux phénomènes physiques à propos desquels il est difficile de parler réellement de réversibilité; est-ce d'ailleurs si important? L'emploi du tube de Kundt et la mise en oeuvre de l'expérience de Melde donnent lieu à de surprenantes confusions entre les notions de résonance et d'ondes stationnaires la résonance. On rend juste plus apparent le phénomène d'ondes stationnaires à la résonance : c'est pourquoi on préfère placer le haut-parleur à un noeud de pression, ce qui impose une contrainte à la fréquence du son si l'autre extrémité du tube est bouchée. Pour étudier l'influence d'un paramètre d'environnement (le température, par exemple) il est préférable de ne pas faire varier la longueur d'onde, et donc d'ajuster la fréquence.

## Bibliographie

Pérez, Mécanique : Pour l'impédance acoustique, le tube de Kundt et des rappels sur les ondes acoustiques.  
Fiat, Toute la physique de SPE : Pour des rappels et formules si besoin aussi.

## Introduction

Je parle, vous m'entendez.

Le son se propage, c'est une onde.

## 1 - Vitesse de propagation

## 1.1 - Dans l'air

## Expérience

On place l'émetteur et le récepteur ultrason le plus près possible sur le banc d'optique. On acquiert les signaux émis et reçus à l'oscilloscope. Ensuite, on cherche les positions où les deux signaux sont en phase. On trace sur régressi la position en fonction du nombre de phases passées. Afin de mieux voir le signal on peut utiliser le moyennage sur l'oscilloscope. Discuter incertitudes et comparer à un Handbook (autre méthode = deux micros et un clap, moins préci car pas de régression). pas de référence

Permet de trancher entre les hypothèses isotherme et isentropique.

## 1.2 - Dans un solide

## Expérience

Définir le Dural (série 2000). Mesure de la célérité d'une onde ultrasonore dans l'eau puis dans le Dural : utiliser bac et ampli. Relier Dural à la masse, position 2 de l'ampli et trigger EXT, moyennage. Montrer ondes sonores transverse et longitudinale. référence partielle

Notion de mode. Parler des séismes.

## 1.3 - Influence de la température

## Expérience

Tube de Kundt. Se placer en bout de tube et travailler à longueur d'onde fixée. Remonter à gamma proche de 1,4. référence partielle

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho\chi_s}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = \lambda f.$$

## 2 - Caractère ondulatoire du son

### 2.1 - Interférences

#### Expérience

*Deux diapasons identiques dont un légèrement désaccordé avec une masse.*

*pas de référence*

*On fait entendre les battements puis on vérifie que la période est bien l'inverse de la différence des fréquences.*

### 2.2 - Effet Doppler

#### Expérience

*Mesure de l'effet Doppler sur table traçante par détection synchrone pour voir les battements.*

*pas de référence*

*Ainsi on a directement la fréquence de décalage.*

*Tenter de remonter à la vitesse de la table.*

### 2.3 - Timbre

#### Expérience

*Comparer les timbres de différents instruments par simple FFT.*

*pas de référence*

*Discuter la notion d'harmoniques, de timbre.*

*Mentionner que l'attaque d'un son joue aussi.*

*Dire que c'est utile pour compresser les sons.*

## 3 - Impédance acoustique

#### Expérience

*Sonomètre dedans et dehors la cloche à vide sans faire le vide.*

*On suppose l'impédance de l'air connue, on déduit celle du verre.*

*On met en évidence l'intérêt du double vitrage.*

## Conclusion

Isolant phonique, double vitrage.

#### Avis

*Ah ce tube de Kundt...*

#### Remarques

*Le micro est à placer au niveau du biseau et pas du bout de la flûte contrairement aux trompettes et clarinettes. Bandes passantes : Signal téléphonique : 300Hz - 34kHz, sons qualité radio FM : 40Hz - 15kHz. C'est amusant de constater que le téléphone ne laisse pas passer le fondamental de la voix de la plupart des hommes. Ça ne nous empêche pas de comprendre ce qui se dit. Le timbre dépend aussi de l'attaque du son. Le son dépourvu de son attaque fait très synthétique. C'est le problème des instruments synthétiques de mauvaise qualité. Toujours mesurer le signal à une extrémité du tube. Expérience de la cloche à vide à éviter surtout au capes car sujette à interprétations différentes dans les livres de lycée. Effet Doppler possible. Sur les impédances : Lorsqu'on pousse sur un bloc d'une tonne, on impose une force, pas un déplacement, en revanche, si on prend une boîte de petit poids, on impose un déplacement. Pour savoir ce qu'on impose, il faut voir si l'appareil qu'on utilise (ici, l'homme) a une impédance adaptée à ce qu'on lui demande. Le Dural peut faire antenne. Tube de Kundt : on a des ondes stationnaires, les CL peuvent poser problème, mais pas de problème de propagation guidée si on suppose l'onde plane, transverse, et le fluide parfait. Eén fait on ne propage que le mode  $n=1$ , qui a la même relation de dispersion que dans le vide. Se placer juste au dessus de l'audible.*

*Il existe une belle manipulation d'interférence avec les hyperfréquences aussi (BUP 818, circuit pour détection).*

**Ce que dit le jury...**

*La résonance ne se limite pas à l'étude du circuit RLC. Les critères de détermination expérimentale de la fréquence de résonance ne sont pas toujours pertinents. Le rapport entre la largeur de la résonance et la durée du transitoire est trop souvent ignoré. La notion de facteur de qualité ou un équivalent est trop souvent absente. Les phénomènes non-linéaires, paramétriques pourraient aussi être abordés. Le phénomène de résonance n'apparaît pas qu'en électricité. En outre, le circuit RLC est souvent mal connu. Le jury apprécierait de voir des facteurs de qualité importants. La résonance n'est pas une amplification. L'influence de l'amortissement est souvent négligée. L'étude de la phase est trop souvent absente de ces montages alors qu'elle fournit des relations complémentaires non redondantes à celle de l'amplitude. Le phénomène de résonance apparaît dans des domaines très divers de la physique. L'étude du circuit RLC série ne devrait pas occuper plus du tiers du montage. Il est opportun de faire entendre l'effet de la caisse de résonance d'un diapason, mais il faut être capable d'expliquer qu'il s'agit bien d'une résonance et non d'une amplification.*

**Bibliographie**

*Taillet, Dictionnaire de physique : Pour les définitions.*  
*Pérez, Mécanique : Pour le lien entre atténuation et facteur de qualité.*  
*Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale : Pour le diapason.*  
*Duffait, Expériences d'électronique : Pour le RLC, le Quartz.*  
*Duffait, Expériences d'optique : Pour la cavité Melles-Griot.*  
*Fiat, Toute la physique de SPE : Pour la corde de Melde.*  
*Duffait, Etude expérimentale des oscillateurs mécaniques - BUP 867 : Pour le programme du pendule grand angle.*

**Introduction**

On a étudié les phénomènes de résonance de façon théorique.

On va maintenant en étudier quelques uns dans différents domaines de la physique.

Définition de la résonance.

Parler de la balançoire, excitation en phase avec la réponse.

**1 - Résonance électrique****1.1 - Circuit RLC**

Résonance en intensité / Résonance en tension.

**Expérience**

*référence partielle*

*Etude d'un circuit RLC.*

*Prédire et vérifier fréquence de résonance en XY car condition sur la phase comme pour la balançoire.*

*Montrer avec le programme de Duffait de réponse indicielle les diagrammes de Bode amplitude et phase.*

*Le faire pour différentes valeurs de Q en changeant la résistance.*

*Etudier le maximum de résonance en tension en fonction de Q.*

*Vérifier la formule donnant l'écart par une régression.*

**1.2 - Oscillateur à quartz****Expérience**

*référence partielle*

*Illustration d'un fort coefficient de qualité avec l'oscillateur à quartz (bonus).*

*Mesurer son facteur de qualité par réponse indicielle ou en l'excitant par une modulation de fréquence et en mesurant la réponse avec un convertisseur courant-tension (se placer en XY, X=signal modulant, Y=signal réponse).*

Déduire le temps pour être décalé d'une seconde.

## 2 - Résonance mécanique

### 2.1 - Corde de Melde

#### Expérience

*Corde de Melde. Mesurer masse linéique de la corde, tension et longueur pour prévoir les fréquence de résonances. Exciter avec un vibreur. Mesurer au stroboscope en regardant si les noeuds sont fixes. Utiliser les harmoniques. Estimer le facteur de qualité.*

*référence partielle*

### 2.2 - Diapason

#### Expérience

*Etude du facteur de qualité et de son lien avec la largeur de la résonance.  
Diapason seul puis diapason avec caisse de résonance.*

*référence partielle*

*Enregistrer sur synchronie puis faire une FFT. Mesurer les facteurs de qualité, les temps de transitoire, les largeur de résonance et vérifier leur lien en discutant. (Ou prendre enveloppe et fitter par exponentielle décroissante avec le programme du BUP).*

Montrer qu'ici aussi on se sert des forts facteur de qualité comme référence.

### 2.3 - Modes résonants

#### Expérience

*Expérience Vidéocom avec les 4 pendules couplés.  
Mesurer les 4 fréquences propres et observer les modes.  
Discuter les symétries.*

## 3 - Résonance optique

#### Expérience

*Cavité confocale Melles-Griot pour voir les modes d'un laser He-Ne.  
Faire chauffer le laser longtemps à l'avance et utiliser l'astuce du persist de l'oscilloscope.  
On a les relations :  $l_c \Delta f = c$ ,  $(ISL) * 2L_{cavit} = c$ ,  $R_{resolution} * Finesse = ISL$ .  
La notice donne  $ISL=2GHz$ ,  $F=274$  et  $R=7,3MHz$ .  
Estimer le facteur de qualité de la cavité (bonus).*

Décrire les analogies entre les systèmes.

## Conclusion

Notion transverse.

Phénomène à craindre, et parfois très utile en métrologie, filtres et ailleurs.

Ouverture sur les phénomènes non linéaires et la RMN.

#### Avis

*La résonance est partout. Bonus = c'est cool mais sûrement pas le temps et pas trop ce que j'aime.*

#### Remarques

*On a  $\tau \Delta \omega = Q$ . Pour mesurer une fréquence, toujours utiliser un fréquencemètre.*

**Ce que dit le jury...**

*Un oscillateur à quartz serait le bienvenu avec son fort facteur de qualité. Le rôle de la phase pour la détermination de la fréquence d'oscillation (critère de Barkhausen) est rarement utilisé. Penser aussi aux nombreuses applications. Importance des retards de phase dans l'étude de la stabilité des systèmes. Les oscillateurs amortis sont de peu d'intérêt au niveau de l'agrégation.*

**Bibliographie**

*Duffait, Expériences d'électronique : Pour portes logiques, multivibrateur astable, Wien aussi.  
Krob, Electronique expérimentale : Pour Généralités, Wien, VdP, Quartz.  
Fiat, Toute la physique de SPE : Pour multivibrateur astable aussi.*

**Introduction**

Auto-entrenu : système qui génère un signal périodique en l'absence d'excitation périodique, nécessite un apport d'énergie depuis l'extérieur. On prédit la fréquence mais pas l'amplitude qui est gouvernée par les effets non linéaires.

**1 - Oscillateur de Wien****1.1 - Etude de la fonction de transfert en boucle ouverte****Expérience**

*Bien montrer qu'on a un amplificateur et un filtre passe-bande. référence partielle  
Enoncer le critère de Barkhausen.  
Montrer qu'on va pouvoir avoir oscillation s'il est respecté.  
Faire le diagramme de Bode en boucle ouverte, puis à résonance mesurer et comparer gain et facteur de qualités.  
Utiliser boîte de résistance ou potentiomètres en série.*

**1.2 - Démarrage des oscillations****Expérience**

*Montrer la naissance des oscillations, leur pulsation. référence partielle  
Tracer le diagramme de Nyquist sur Régressi en faisant varier la fréquence.  
Relier à la condition de Barkausen et à l'étude précédente. C'est une condition en amplitude et en phase car portant sur une variable complexe. Comparer les valeurs des composants critiques.*

**1.3 - Qualité du signal obtenu****Calcul**

*Faire une transformée de Fourier.  
Calculer le taux de distorsion harmonique (le poids relatifs des harmoniques par rapport au fondamental).  
Calculer le coefficient de stabilité en fréquence (la largeur du pic de fréquence divisé par la fréquence centrale = facteur de qualité).  
Si on augmente la résistance, déformation car l'AO fonctionne de plus en plus longtemps en régime non linéaire.*

**2 - Oscillateurs à relaxation****2.1 - Vase de Tantale****Expérience**

*Expliquer le principe, montrer le fonctionnement. Pas de mesure car la fréquence dépend des hauteurs des tubes et du débit. Il y a un récipient prévu pour ça. pas de référence*



## 2.2 - Multivibrateur instable

### Expérience

Vérifier que la fréquence que l'on obtient dépend bien de la résistance et de la capacité utilisées.

Vérifier la fréquence prévue par régression linéaire en faisant varier une résistance.

On peut créer un créneau dont le rapport cyclique est variable en remplaçant la résistance par un montage avec deux diodes et deux résistances.

Etudier de la même façon le rapport cyclique.

Utilité dans les générateurs (VCO) et les capacimètres.

## 3 - Oscillateurs particuliers

### 3.1 - Oscillateur numérique

#### Expérience

Oscillateur à portes logiques. Mesurer le temps d'oscillation pour N portes logiques. Remonter <sup>pas de référence</sup> du temps de basculement (montée + descente) d'une porte par régression linéaire.

### 3.2 - Oscillateur de Van der Pol

#### Expérience

Montrer le démarrage des oscillations et le passage continu du quasi-sinusoidal à la relaxation.

### 3.3 - Oscillateur à Quartz

#### Expérience

Basé sur Colpitts (avec transistor, tout prêt sur plaquette). Mesure du facteur de qualité. Dire qu'on s'en sert de référence. (bonus)

## Conclusion

Génération de signaux et bases de temps (oscilloscopes, horloges de microprocesseurs, montre...). Donne des références de fréquence.

#### Avis

Un montage cool, mais plus difficile sur le fond. Il y a bien sûr trop de choses dans ce plan, et je ne pense pas être spécialement à l'aise dessus.

#### Remarques

Oscillateurs utiles car fréquence d'horloge, mesure de temps. Parler stabilité en fréquence et de facteur de qualité, du taux de distorsion. On peut osciller sans être bouclé ( $R_d < 0$ , diode à effet tunnel). Critère de Barkhausen et diagramme de Nyquist  $Re(H)/Im(H)$  : entourer le point -1 -> instable + rôle de la phase. VdP permet de passer continuellement du quasi-sinusoidal au régime de relaxation. Quartz très précis. Coax=100pF/m. Portes logiques : temps de montée et descente pas forcément identiques. De manière générale pour obtenir un oscillateur auto-entretenu il faut un circuit résonateur et un circuit excitateur : tous les oscillateurs obéissent à cette présentation, le résonateur pouvant être réduit à une simple constante de temps en cas de relaxation. L'apport d'énergie se fait par rétroaction ou  $R < 0$ . La continuité du fonctionnement entre pseudo sinusoidal et relaxation doit être montrée de façon expérimentale, la perte d'énergie au cours d'une période étant soit une fraction faible ou importante de l'énergie stockée dans le résonateur.

Pour faire un diagramme de Nyquist avec l'analyseur de spectre HP 35665A. 1. Relier la borne SOURCE à la borne CH1 et à l'entrée du montage à étudier. Connecter la sortie du montage à la borne CH2 ; 2. Dans le menu Inst. Mode, sélectionner 2 Channel ; 3. Menu Window -> Hanning ; 4. Input -> Ch1 AUTO Range et Ch 2 AUTO Range ; 5. SOURCE -> sélectionner Random Noise et Level -> saisir par exemple 1 V rms sur pavé numérique ; 6. AVG -> ON et Number average -> par exemple 30 ; 7. Meas Data -> Frequency Response ; 8. Freq -> choisir la plage de fréquence d'étude, Start minimum 0Hz, Stop maximum 51,2kHz ; 9. TR COORD -> MORE -> Nyquist Diagram (ou autre) ; 10. Scale -> Autoscale ON ; 11. Start pour commencer l'acquisition.

C'est l'AO qui limite la fréquence, sauf dans le colpitts avec le quartz.



## Ce que dit le jury...

Il faut analyser correctement les couplages pour éviter une mauvaise utilisation de formules toutes faites. Le jury met en garde les candidats contre l'utilisation de dispositifs dont la modélisation n'est pas comprise. Les pendules utilisés dans le cadre de ce montage sont souvent loin d'être des pendules simples. Les couplages non-linéaires conduisent à des phénomènes nouveaux comme l'accrochage de fréquence, qui ont de nombreuses applications. Les systèmes propagatifs à constantes réparties n'ont leur place dans ce montage qu'à condition de faire référence explicitement au couplage. L'étude de la phase est trop souvent absente de ces montages alors qu'elle fournit des relations complémentaires non redondantes à celle de l'amplitude. L'étude du couplage d'oscillateurs identiques ne permet pas de couvrir la totalité du sujet. Dans l'étude de deux oscillateurs couplés, il ne faut pas s'appesantir sur la détermination des paramètres des oscillateurs indépendants, mais il faut plutôt considérer les deux régimes, oscillations libres et forcées. Il est aussi possible d'étendre l'étude à des oscillateurs comportant plus de deux degrés de liberté.

## Bibliographie

Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Mécanique : Pour le couplage des pendules. (Attention quelques formules de bases à savoir ou retrouver avec les petits angles.)  
 Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Electricité : Pour le couplage des RLC.  
 Pérez, Mécanique : Pour le soliton et un peu de théorie en plus.  
 Duffait, Etude expérimentale des oscillateurs mécaniques - BUP 876 : Pour vidéocom, les 4 oscillateurs couplés.  
 Charmont, Montages de physique : Pour les modes des RLC.

## Introduction

En cours : Oscillateurs, fréquence propre, résonance. En réalité interactions et couplage. Influence de 1 sur 2 et de 2 sur 1, échange d'énergie.

## Expérience

Expériences de synchronisation entre deux métronomes sur canette. Prendre le blanc il marche bien car plus lourd. Couplage par accélération, à priori par linéaire, décrire un battement puis constater la synchronisation. Vérifier avant que les deux métronomes sont réguliers et proches en fréquences rapides (208 bpm). pas de référence

On a donc une action sur l'amplitude et sur la phase.

Dans la suite, on se limitera au couplage linéaire.

N oscillateurs donnent N modes. Un mode est un état stationnaire ici sinusoïdal. le mouvement est une combinaison linéaire des modes. Déjà N=2.

$$a_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1 \frac{dx_1}{dt} + c_1 x_1 = f(x_2)$$

## Illustration

Tableau de l'analogie des différents couplages.

Dépendance de $f$	En électricité	En mécanique
$\ddot{x}_2$	inductif	inertiel
$\dot{x}_2$	résistif	dissipatif
$x_2$	capacitif	élastique

Commençons par N=2.

# 1 - Pendules couplés

$$I_1 \ddot{\theta}_1 = -m_1 g l_1 \theta_1 - C(\theta_1 - \theta_2)$$
$$I_2 \ddot{\theta}_2 = -m_2 g l_2 \theta_2 - C(\theta_2 - \theta_1)$$

## 1.1 - Pendule libre

### Expérience

*Pendules couplés ENSL. Présenter dispositif.*

*Avant : vérifier linéarité, équilibrer et faire le zéro avec gain à fond puis adapté au calibre de mesure.*

*Pendant : lancer mesure libre dès le début (ne pas oublier de découpler). 40cm, 1kg, 3min, 8192 points. Discuter les paramètres et l'équilibre. Mesure de la fréquence. En déduire le moment d'inertie. Bien traiter les incertitudes.*

*On peut aussi estimer le facteur de qualité d'environ 100.*

$$\omega_0^2 = \frac{mgl}{I} \text{ et } \delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{x(t)}{x(t+nT)}\right) = \frac{1}{\sqrt{Q^2 - \frac{1}{4}}} \approx \frac{1}{Q}$$

## 1.2 - Pendules couplés

### Expérience

*On couple et on immobilise le second pendule. On refait la même chose pour en déduire la constante de couplage par différence des deux fréquences. Incertitude élevée à justifier. Lancer les mesures longues dès que possible et discuter la TF, les mesures des autres paramètres, les incertitudes... celle-ci n'est pas faite en présentation.*

$$\omega_0^{2'} = \frac{mgl+C}{I} \text{ et } C = I(\omega_0^{2'} - \omega_0^2)$$

*référence partielle*

## 1.3 - Efficacité du couplage

### Expérience

*Libérer le deuxième pendule mais le désaccorder en changeant sa hauteur. Constaté que le premier ne s'immobilise pas. Recommencer en les accordant, cette fois il s'immobilise. Très convaincant. (Peut-être avant.)*

## 1.4 - Modes

### Expérience

*Lancer l'acquisition et parler de la méthode matricielle théorique qui permet de déterminer les modes. Prévoir les fréquences attendues avec incertitude. Après TF, discuter si ça marche (normalement oui). Dire que l'importance de chaque mode dépend des conditions initiales. Accéder à une mesure plus précise de C avec la période des battements.  $\omega_S = \omega_0$  et  $\omega_A = \sqrt{\omega_0^2 + \frac{2C}{J}}$*

## 1.5 - Etude énergétique

### Expérience

*On va mettre en évidence ces modes symétrique et antisymétrique et l'aspect d'échange d'énergie. Dans synchronie convertir volts en radian, soustraire la moyenne, lisser dériver et lisser. Tracer les énergies de chaque oscillateurs et l'énergie du couplage. Si trop bruyant, diminuer la fréquence d'échantillonnage. 20s, 1024 pts. Mettre en évidence les modes symétriques et antisymétriques, discuter énergie de couplage et retrouver leur fréquence par TF. Faire de jolies courbes longues en préparation si on a le temps, permet aussi de voir l'amortissement fluide.*

$$E_{ci} = \frac{1}{2} I \dot{\theta}_i^2, E_{pi} = mgl(1 - \cos(\theta_i)) \text{ et } E_{couplage} = \frac{1}{2} C(\theta_1 - \theta_2)^2$$

```
1 g=9.81 L=0.4 m=1 I=0.248 C=0.280 coeff=4.56e-2\\
2 theta1=(EA0-MOY(EA0))*coeff theta2=(EA1-MOY(EA1))*coeff\\
3 theta1liss=LISSAGE(theta1) theta2liss=LISSAGE(theta2)\\
4 vit1=DERIV(theta1liss,T) vit2=DERIV(theta2liss,T)\\
5 vit1liss=LISSAGE(vit1) vit2liss=LISSAGE(vit2)\\
6 E1=m*g*L*(1-cos(theta1liss))+1/2*I*vit1liss*vit1liss\\
7 E2=m*g*L*(1-cos(theta2liss))+1/2*I*vit2liss*vit2liss\\
8 E12=1/2*C*(theta1liss-theta2liss)*(theta1liss-theta2liss)\\
9 ETOT=E1+E2+E12\\
```

## 2 - Couplage par mutuelle induction

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + r_1 i_1 + M \frac{di_2}{dt} = 0$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + r_2 i_2 + M \frac{di_1}{dt} = 0$$

$$\omega_- = \frac{1}{\sqrt{C(L+M)}} \text{ et } \omega_+ = \frac{1}{\sqrt{C(L-M)}}$$

### 2.1 - Etalonnage M(d)

On va maintenant pouvoir modifier C, sur un autre type de couplage. Présenter le dispositif.

#### Expérience

*D'après la loi de Faraday, on étalonne le couplage en fonction de la distance d entre deux bobines (46mH, 22nF, 10Ω). Se placer sur banc d'optique. Attention, travailler à 1kHz.*

*On peut terter un fit en log pour trouver une loi de puissance (environ 3).*

*Reprendre un ou deux points.*

### 2.2 - Accord des oscillateurs

#### Expérience

*Avant : avoir accordé le premier oscillateurs RLC sur 1kHz en XY et avoir mesuré leurs composants au RLC-mètre.*

*Pendant : Accorder le second oscillateur.*

### 2.3 - Dépendance des modes

#### Expérience

*Exciter le premier oscillateur par un créneau, observer le second et faire la TF sur l'oscilloscope (en fait presque).*

*On voit un doublement de fréquence lorsque le couplage est fort.*

*Tracer les modes en fonctions de la distance, théorique et expérimental. Discuter des erreurs.*

*On a une forme différente car couplage différent. On peut montrer les modes (mais pas le temps).*

*Il faut garder Q assez fort,  $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ .*

## 3 - Couplage de 4 oscillateurs

### 3.1 - Mesure des fréquences propres

Ici 4 oscillateurs dont 4 fréquences propres. On utilise aussi le système avec 3, 2 ou 1 pendule.

#### Expérience

*Mesure de toutes les fréquences propres à l'aide de Videocom. Clic droit sur le signal temporel pour la TF.*

*Une petite minute suffit. Remarquer que le système met préférentiellement son énergie dans les modes symétriques de basses fréquence.*

### 3.2 - Relation de dispersion

$$m\ddot{x}_n + k(x_n + x_{n-1}) - k(x_{n+1} - x_n) + \frac{mg}{l} x_n = 0$$

$$x_n = \sin\left(\frac{p}{N+1} n\pi\right) \cos(\omega t)$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 + \frac{4k}{m} \sin^2\left(\frac{p\pi}{2(N+1)}\right) = \omega_0^2 + \omega_1^2 \sin^2\left(\frac{ka}{2}\right)$$

#### Expérience

*Vérifier avec ces dix points la relation de dispersion donnée dans la référence. Interpréter en terme de filtre passe bande, la coupure haute étant dû à la discrétisation du milieu. Elle disparaît dans l'approximation des milieux continus, milieux à constante réparties.*

### 3.3 - Observation des modes

#### Expérience

*Utiliser le moteur pas à pas avec la vis le plus au centre (facteur 200) pour visualiser les modes et interpréter les phases symétriques, antisymétriques.*

## 4 - Milieu à constante réparties, soliton

### Expérience

*Manipulation bonus. Avec vidéo mesurer vitesse sur la chaîne à soliton, déduire la valeur de la constante de couplage. Uniquement si tout le reste est nickel... ce qui est illusoire.* *pas de référence*

### Conclusion

Récapitulatif puis ouverture sur les milieux continus si  $N$  tend vers l'infini. Si non-linéaire, phénomènes intéressants comme le soliton (tsunami, ADN...).

### Avis

*J'ai présenté ce montage pendant l'année.*

*Il a été très bien reçu.*

*Les correcteurs préfèrent mettre les métronomes à la fin.*

*On peut rajouter l'expérience bonus du soliton pour parler de milieux continus.*

*Sûrement trop de choses (coupure de courant...).*

### Remarques

*Synchronisation des métronomes : soit non-linéaire, soit un mode décroît plus vite que l'autre.*

*Si on souhaite réaliser un couplage non linéaire par exemple en mettant en évidence un accrochage en fréquence, il est sans doute possible de l'obtenir avec deux oscillateurs à résistance négative présentant deux fréquences propres différentes qu'on couple via les bobines.*

*Sur l'approximation des petits angles :*

<i>Angle</i>	<i>Erreur en%</i>
10	0,5
20	2
30	5
40	9
50	14

**Ce que dit le jury...**

*Un filtre RC passif ne permet qu'une présentation parcellaire de la notion de filtrage. Par contre, le clignotement d'une lampe à basse fréquence est un problème réel, qui est un exemple du lien science-société. La notion de suiveur, son utilisation pour transformer un filtre passif en filtre actif est trop souvent méconnue. En optique, un montage de filtrage des fréquences spatiales est bienvenu, mais l'utiliser pour mesurer le pas d'un réseau n'est pas pertinent. Il existe des filtres actifs. Lorsque le matériel informatique est utilisé pour tracer des diagrammes de Bode, le candidat doit être capable de gérer l'acquisition et surtout de réaliser une mesure devant le jury. Un filtre RC suivi d'un suiveur ne peut être considéré comme un filtre actif. Les candidats peuvent aborder d'autres domaines que l'électronique. L'étude d'un seul filtre passif suffit. Le circuit RLC série est, dans la plupart des cas, un mauvais filtre passe-bande, dont l'étude n'est pas conseillée. Les filtres actifs doivent être abordés, quel que soit le type retenu. On peut également présenter utilement l'évolution de la phase des signaux. L'étude du régime transitoire peut faire intervenir un échelon de tension, obtenu sur le front montant d'un signal carré (la dépendance de la réponse avec la fréquence de ce carré dépasse, en revanche, le cadre strict du montage). Le lien entre les régimes harmonique et transitoire, pourtant bien établi par la théorie, semble mystérieux à l'ensemble des candidats. Il vaut mieux s'intéresser à un nombre restreint de filtres ou de types de filtres. L'étude complète du diagramme de Bode d'un filtre n'a d'intérêt que si elle permet la détermination des paramètres du modèle décrivant le comportement de ce filtre. On peut alors envisager de comparer aux prévisions la réponse obtenue lorsqu'on attaque ce filtre par un signal non harmonique. On peut aussi attendre des circuits déphaseurs et l'on peut également penser aux filtres à capacités commutées.*

**Bibliographie**

*Duffait, Expériences d'électroniques : Pour le filtre RC (programme), l'AO.  
Duffait, Expériences d'optique : Pour la strioscopie, Abbe, interférométrie.  
Sextant, Optique expérimentale : Pour la strioscopie aussi.  
Duffait, Etude expérimentale des oscillateurs mécaniques - BUP 876 : Pour vidéocom, les 4 oscillateurs couplés.*

**Introduction**

Le filtrage ne se limite pas à l'électronique.  
Espoir historique d'ordinateur optique.

**1 - Electricité****1.1 - Filtre RC passif****Expérience**

*Etude d'un filtre RC passif d'ordre 1.  
Diagramme de Bode complet ou réponse indicielle (programme du RLC).*

**1.2 - Filtre actif****Expérience**

*Etude de l'AO en boucle ouverte et boucle fermée.  
Conservation du produit gain\*bande-passante.*

**2 - Optique****2.1 - Filtrage spatial : Strioscopie****Expérience**

*Strioscopie avec trace de doigts.  
Qualitatif.*

## 2.2 - Filtrage spatial : Abbe

### Expérience

*Expérience d'Abbe.  
Expliquer l'analogie entre électricité et optique.  
Retrouver le facteur racine de deux.*

## 2.3 - Interférométrie

### Expérience

*Bande passante d'un filtre interférentiel par interférométrie puis TF*

# 3 - Mécanique

## 3.1 - Quartz

### Expérience

*Facteur de qualité du Quartz.  
Alimenter en 400mV avec 1MHz modulé sur une plage de 500Hz.  
Récupérer le signal modulant.  
Mettre un suiveur.  
Tracer la réponse en XY et trouver un facteur de qualité très élevé.  
Déduire le décalage temporelle d'une montre sur un an.*

*pas de référence*

## 3.2 - Pendules couplés

### Expérience

*Pendules couplés vidéocom.  
Réponse impulsionnelle.  
Discuter aussi les modes.*

# Conclusion

Application à la détection synchrone.

### Avis

*Réinvestissement de plein d'expériences vraiment sympa.*

### Remarques

*Plus un filtre est sélectif, plus le régime transitoire est long. On peut retrouver le facteur racien de deux en faisant le rapport de l'écart entre deux franges dans l'expérience d'Abbe. Les systèmes linéaires invariants dans le temps (SLIT) sont caractérisés par leur réponse impulsionnelle. La réponse à un signal quelconque est obtenue par convolution de l'entrée avec la réponse impulsionnelle. On peut également obtenir cette réponse impulsionnelle en envoyant une impulsion à l'entrée du système ou en effectuant la transformée de Fourier de la fonction de transfert ou encore en dérivant la réponse indicielle. Pour faire des blocs opérationnels, il faut que les blocs aient des impédances de sortie faibles. Une multiplication s'obtient en optique en prenant un faisceau de lumière parallèle portant l'information et en le faisant traverser un film transparent avec des niveaux variables de transmission. Une transformée de Fourier s'obtient par une diffraction dans le régime de Fraunhofer mais en raison des fréquences rapides de l'optique de l'ordre de  $10^{14}$  Hz, les détecteurs usuels opèrent une moyenne temporelle et sont sensibles au carré du champ : l'information de phase s'en trouve perdue. On peut filtrer en optique d'autres grandeurs que l'intensité : la composante du champ électromagnétique dans une direction de polarisation avec un analyseur ou encore certaines fréquences optiques avec des filtres colorés ou interférentiels. On met un suiveur entre le générateur et le filtre pour s'affranchir de l'impédance du générateur si besoin. Attention, l'AO est un passe-bas. Optique = SLIT car équations de Maxwell linéaires ; réponse impulsionnelle = tâche d'Airy, trou. Acquisition à  $n \cdot 50$ Hz pour masquer le secteur. Parler un peu des signaux numériques. En numérique, il existe des filtres non causaux.*



**Ce que dit le jury...**

Les régimes *transitoires* ne se réduisent pas à la *relaxation* des systèmes linéaires en électricité. Par ailleurs, l'établissement de *régimes forcés* peut conduire à une physique bien plus variée que le retour à une situation d'équilibre. Il existe des régimes transitoires dans *plusieurs domaines* de la physique et pas uniquement en électricité. Bien que le régime transitoire des systèmes linéaires, évoluant en régime de *réponse indicielle*, puisse parfois se ramener à l'étude d'un circuit RC, la simple mesure du temps de réponse d'un tel circuit ne caractérise pas l'ensemble des propriétés des régimes transitoires. D'autre part, l'établissement de régimes forcés peut conduire à une physique bien plus variée que le retour à une situation d'équilibre.

**Bibliographie**

*Duffait, Expériences d'électronique* : Pour les relations sur le RLC, le moteur asservi, le détecteur de crête.

*Quaranta, Dictionnaire de physique expérimentale - Thermodynamique* : Pour la diffusion du glycérol.

**Introduction**

Transitoire = réponse du système à un changement des contraintes extérieures, passage d'un régime permanent (stationnaire) à un autre.

**1 - Différents types de transitoires****1.1 - RLC, régime pseudo-périodique****Expérience**

*Etude du circuit RLC alimenté par un créneau BF et boîte de résistance.*

*Général pour un système linéaire d'ordre 2.*

*Attention, la résistance interne du GBF pose problème, mettre un suiveur.*

*Mesurer la pseudo-période pour remonter à la période propre.*

*On utilise différents R, on mesure L au RLC-mètre.*

*Attention au choix de fréquence qui doit être proche de la résonance du RLC (valeurs de Duffait ok).*

*On connaît l'expression de Q qu'on a fait varier donc on fit (possible aussi par le décrétement logarithmique).*

*référence partielle*

On remarque que Q correspond à peu près au nombre d'oscillations amorties.

Le temps d'amortissement augmente avec Q.

Donc plus on est sélectif, plus le transitoire est long.

Donc dans un analyseur de spectre le balayage doit être d'autant plus lent qu'on veut être précis.

**1.2 - Régimes critique et aperiodique****Expérience**

*Régime aperiodique : Montrer son existence.*

*Régime critique = plus de dépassement ni d'oscillations.*

*On trouve la résistance critique, on peut alors remonter à C.*

**2 - Un outil d'investigation****2.1 - Réponse indicielle****Expérience**

*Tracer le diagramme de Bode complet du RLC par réponse indicielle avec un grand facteur de qualité.*

*Mesurer fréquence centrale, facteur de qualité, bande passante.*

*Utiliser le programme de Duffait pour avoir aussi la phase.*

*Comparer avec les valeurs prévues d'après la première partie.*

*Comparer au diagramme de Bode point par point.*

## 2.2 - Diffusion du glycérol

### Expérience

*Nappe laser et glycérol à 50% au fond d'une cuve rempli d'eau (introduire doucement).*

*Relevé en fonction du temps de la hauteur du pic.*

*Déduire le coefficient de diffusion. A savoir, les valeurs tabulées sont  $n_g = 1,40$  et  $0,865 * 10^{-9} m^2 s^{-1}$ .*

*Revenir sur l'hypothèse que le temps d'injection est négligeable.*

*Faire la correction du Garing et tenir compte de la réfraction à la sortie.*

## 3 - Applications

### 3.1 - Détecteur de crête

#### Expérience

*Faire un détecteur de crête et mettre en évidence le choix de la constante de temps avec boîte de capacités.*

*On se sert d'un temps de relaxation lent pour conserver une valeur le temps nécessaire à l'établissement d'une nouvelle valeur.*

### 3.2 - Temps de réponse

#### Expérience

*Temps de réponse d'une photodiode avec stroboscope ou boitier bleu qui flash avec une diode laser. pas de référence*

### 3.3 - Asservissement en position

#### Expérience

*Caractériser le dépassement (lié au gain) de la réponse du moteur et montrer sa dépendance avec le facteur de qualité.*

*Montrer comment on peut améliorer avec un correcteur à avance de phase.*

*On ajoute des capacités pour modifier le facteur de qualité sans changer le gain.*

## Conclusion

Le transitoire permet de donner beaucoup d'informations, même si on cherche parfois à l'éviter.

#### Avis

*Réinvestissement d'expériences d'autres montage avec en plus le glycérol qui est cool.*

#### Remarques

*Préciser le lien avec le régime transitoire lors de l'étude de la diffusion du glycérol ou de l'asservissement du moteur.*

*Les régimes transitoires sont utiles pour amorcer certains phénomènes, par exemple une lampe au néon avec un circuit RL où on utilise le phénomène de surtension produit ponctuellement.*

*Pour la diffusion  $L \propto \sqrt{Dt}$ .*

*Comparer régime critique et correcteur à avance de phase, plus robuste dans le temps.*

**Ce que dit le jury...**

Ce montage est ouvert à de nombreux domaines, pouvant donner lieu à des études comparées; on pensera à exploiter les régimes transitoires et les régimes permanents. Le choix des expériences doit veiller à souligner l'aspect transport. Il existe d'autres phénomènes de transport que ceux régis par une équation de type flux-gradient. La mesure de la conductivité thermique d'un métal par sa réponse en température à une excitation alternative a posé problème à de nombreux candidats par suite de l'analyse des mesures à l'aide d'une loi non valide avec les conditions aux limites concernées. Le régime permanent implicitement mis en jeu doit être précisé, de même que son temps d'établissement. Il faut garder à l'esprit qu'on distingue, dans certains domaines, plusieurs modes de transport : conduction, convection, diffusion, rayonnement. Connaître a priori l'ordre de grandeur de quelques coefficients de diffusion est indispensable. Les dispositifs dédiés permettant d'étudier l'effet Hall sur des échantillons sélectionnés semblent poser, malgré leur simplicité, de gros problèmes d'utilisation. Dans les expériences de propagation de la chaleur le long d'une barre de cuivre, un régime transitoire permet aussi de déterminer la conductivité thermique.

**Bibliographie**

Garing, *Ondes mécaniques et diffusion* : Pour la correction à l'expérience du glycérol.  
 Quaranta, *Dictionnaire de physique expérimentale - Thermodynamique* : Pour tableau des analogies, la diffusion du glycérol, la barre de cuivre en sinusoïdal, la conduction du cuivre.  
 Taillet, *Dictionnaire de physique* : Pour la loi de Wiedman-Franz.  
 Guyon, *Hydrodynamique physique* : Pour la chute d'une bille.

**Introduction**

Plusieurs modes de transport, plusieurs choses à transporter. Analogies.

**1 - Convection****Expérience**

Tube fait pour avec sciure de bois et bec bunsen.

pas de référence

**2 - Diffusion****2.1 - Glycérol dans l'eau****Expérience**

Diffusion du glycérol dans l'eau. Nappe laser et glycérol à 50% au fond d'une cuve rempli d'eau (introduire doucement).

Relevé en fonction du temps de la hauteur du pic.

Déduire le coefficient de diffusion. A savoir, les valeurs tabulées sont  $n_g = 1,40$  et  $0,865 * 10^{-9} m^2 s^{-1}$ . Tenir compte de la correction dans le Garing, et de la réfraction sur la face de sortie. Eclairer de biais. Justifier les approximations sur le temps d'injection.

**2.2 - Diffusion thermique du cuivre****Expérience**

Barre de cuivre en sinusoïdal. Remonter à la conductivité thermique.

**Attention**

Attention, il y a des erreurs dans le Quaranta : un T a remplacé un L, mais surtout il manque un  $\rho$  au numérateur dans l'expression de  $\lambda$ .

## 2.3 - Conduction électrique du cuivre

### Expérience

Mesure quatre fils de la conductivité électrique du cuivre. Utiliser la bobine calibrée qui va dans l'eau. Tracer  $U$  en fonction de  $I$  et faire un fit pour arriver à la conductivité. Faire plusieurs températures avec un bain thermostaté. Tester la loi de Wiedmann-Franz. Comparer aux valeurs tabulées.

## 3 - Transport par rayonnement

### Expérience

Faire chauffer quelque chose avec une QI : béccher d'eau et thermomètre.

*pas de référence*

### Expérience

Mesurer la puissance rayonnée par l'ampoule de tungstène avec un wattmètre (une thermopile serait sans doute mieux, mais ça se discute, il y a du verre, et c'est sensible...). Mesurer la température du filament avec le pyromètre. Essayer de remonter à la loi de Stefan.

## 4 - Viscosité

### Expérience

Expérience historique de la calorie. Agitation mécanique dans du glycérol, on constate un échauffement. Mettre un thermomètre dedans, un autre dehors.

*pas de référence*

### Expérience

Chute d'une bille dans du glycérol. Rappeler que la viscosité s'interprète comme de la diffusion de quantité de mouvement, et qu'il en découle pour un objet sphérique une force de frottement visqueux, la force de Stokes. On va se servir de cette force pour remonter à la valeur du coefficient de diffusion qu'est la viscosité. Bien vérifier que le nombre de Reynolds est très faible et que le régime transitoire est court. Parler de l'influence des parois.

## Conclusion

Notion transversale. Effets croisés (Seebeck, Peltier)... souvenir de ce magnifique sujet d'épreuve C.

### Avis

Ici encore il s'agit de réinvestir des expériences de façon transversale.

### Remarques

L'idée d'avoir un fil conducteur sur le montage est excellente. L'exemple de la casserole d'eau et la cuisson des pâtes est tout à fait pertinent surtout vues les expériences présentées ensuite. Le jury appréciera sûrement ce genre d'approche un peu originale. Le moteur de la convection est la gravité. les coefficients de diffusion sont toujours ceux d'une espèce dans une autre espèce. Barre de cuivre : conditions aux limites : de chaque côté, on impose un flux. À une extrémité, la cellule Peltier impose un flux thermique proportionnel à l'intensité du courant électrique qu'on lui impose. À l'autre extrémité, c'est un flux convectif avec un ventilateur et on fait l'hypothèse que ce côté de la barre est ainsi thermalisé avec l'air ambiant. On a une onde de chaleur qui se propage. Il n'est normalement pas possible de complètement négliger la réflexion partielle, mais on peut l'oublier si l'épaisseur de peau est suffisamment petite (et donc la fréquence suffisamment élevée). Soit on regarde la décroissance exponentielle des amplitudes en chaque point, soit on regarde le décalage de la phase. La deuxième méthode est certainement la plus juste. Il faut en fait tenir compte de l'effet Joule pour décrire correctement les amplitudes. En effet, la cellule Peltier n'est pas parfaite et une partie de l'énergie est dissipée par effet Joule, ce qui fait apparaître une fréquence double, ainsi qu'un profil linéaire supplémentaire dû au flux moyen qui est positif. Il faut procéder par étape. Brancher les capteurs et faire une acquisition rapide pour vérifier que les capteurs ont bien la même valeur. Vérifier la linéarité des capteurs en mettant des flux constants (donc une intensité constante à travers le Peltier). Si l'on obtient des profils linéaires, cela signifie également que l'on a un bon isolement thermique de la barre et que la modélisation 1-D que l'on a faite est bien justifiée. Enfin, on regarde les oscillations sinusoïdales, en veillant à bien attendre le régime permanent. Tout ceci est long, donc c'est la première chose à faire en préparation. Il existe une barre avec que effet Joule. Ne pas confondre le mode de transfert et la quantité.

**Ce que dit le jury...**

De nombreux phénomènes de transport sont dissipatifs. Ne pas omettre la dissipation de l'énergie. Plusieurs candidats ont voulu présenter une étude dynamique du transport de la chaleur. Cette expérience est sophistiquée et assez délicate. Pour certains candidats, l'étude statique, bien plus simple à réaliser, doit être préférée.

**Bibliographie**

Guyon, *Hydrodynamique physique* : Pour la chute d'une bille.  
 Quaranta, *Dictionnaire de physique expérimentale - Electricité* : Pour le transformateur.  
 Garing, *Milieux magnétiques* : Pour la chute de l'aimant.  
 BRF, *Mécanique 2* : Pour le stick-slip.  
 Sanz, *Physique PC-PC\** : Pour le stick-slip aussi.

**Introduction**

Conservation et conversion de l'énergie, définir la dissipation.

**1 - Viscosité****1.1 - Mise en évidence****Expérience**

Expérience historique de la calorie. Hélice dans glycérol, ça chauffe. On a un transfert travail-chaleur. *pas de référence*

**1.2 - Chute d'une bille****Expérience**

Viscosimètre à bille. Remonter à  $\eta$  viscosité. Discuter les approximations.

**2 - Frottements solides****Expérience**

Stick-slip avec le dispositif (bricolage) ENSL. Acquisition sur VidéoCom. Remonter aux deux coefficients de frottement. Estimer l'énergie dissipée.

**3 - Transformateur****3.1 - Rendement en charge****Expérience**

Utiliser un vrai transformateur, c'est à dire pas pédagogique, et qui divise la tension par 10 si possible, pour être cohérent avec la suite de la fiche. *référence partielle*

Mettre un rhéostat au secondaire et se placer aux valeurs nominales.

Mesure directe de rendement avec deux wattmètres. Noter les mesures de  $P_1$ ,  $P_2$  et du rendement.

Constater les pertes, modèle du transformateur réel à commenter.

On va s'intéresser séparément à chaque type de pertes par la méthode des pertes séparées.

### 3.2 - Pertes fer

#### Expérience

*référence partielle*

*Etude à vide pour avoir un courant négligeable.*

*On mesure  $U$  et  $I$  au primaire et au secondaire pour toute la gamme de tension au primaire.*

*On trace  $U_2 = f(U_1)$  -> le transformateur est ainsi idéal pour les tensions, on retrouve le rapport théorique.*

*On trace  $U_1 = f(I_1)$  et  $U_2 = f(I_2)$  -> on discute la linéarité du dipôle.*

*On trace  $P_1 = f(U_1^2)$  -> c'est la puissance perdue dans le circuit magnétique (pertes fer), elle ne dépend que du champ magnétique créé du fait de la ddp imposée au circuit primaire.*

*Justification : Pertes par hystérésis proportionnelles à  $f$  et à  $B^2$ , donc à  $e^2$ , donc  $U_1^2$ , bonne variable.*

*Constater qu'on a une droite et estimer les pertes fer à la tension nominale.*

### 3.3 - Pertes cuivre

#### Expérience

*référence partielle*

*Etude en court-circuit pour avoir un courant très fort (donc attention...).*

*On mesure  $U$  et  $I$  au primaire et au secondaire pour une gamme de tension raisonnable au primaire (surveiller, il ne faut pas des courants trop forts).*

*On trace  $I_2 = f(I_1)$  -> le transformateur est ainsi idéal pour les courants, on retrouve le rapport théorique.*

*On trace  $P_1 = f(I_2^2)$  -> c'est la puissance perdue dans les enroulements (pertes cuivres), elle ne dépend que de l'intensité qui circule au secondaire.*

*Constater qu'on a une droite et estimer les pertes fer à la tension nominale.*

### 3.4 - Pertes séparées

#### Calcul

*Réévaluer le rendement par la méthode des pertes séparées (environ 0,9). Comparer à la valeur expérimentale, qui doit être très proche.*

### 3.5 - Hystérésis

#### Expérience

*Tracer le cycle d'hystérésis et discuter du matériau (doux).*

## 4 - Freinage magnétique

#### Expérience

*Chute d'un aimant dans un tube. Retrouver le rapport des conductivités. Bien faire le lien avec la dissipation.*

## Conclusion

On cherche en général à minimiser les effets dissipatifs. Théorème de fluctuation-dissipation.

#### Avis

*Montage semi-transversal, mais dernier montage.*

#### Remarques

*Phénomène dissipatif = conversion d'énergie utile en énergie thermique. Bien faire le lien avec la dissipation. On observe pas vraiment de dépendance avec le diamètre de la bille. Estimer l'énergie dissipée. Une personne = 400 Watt. Expérience historique de la calorie : émergence du premier principe de la thermodynamique. Les rendements électriques (0,8) sont supérieures aux rendements thermiques (0,4) sauf quand c'est fait exprès pour des raisons de sécurité. La résistance de l'induit à l'arrêt varie beaucoup en fonction de la position des balais et collecteurs. 25mA continue peut tuer. Le capteur magnétorésistif envoie une onde EM, l'aimant crée une striction qui induit une réflexion, puis le mesurer de la position se fait par temps de vol. Théorème de fluctuation-dissipation : l'amplitude des fluctuations à l'équilibre est lié au retour à l'équilibre. On peut tenter un fil rouge sur la voiture électrique. Corriger l'offset du couple-mètre.*