

# Programme détaillé de la Licence Physique

## S1

EC Optique géométrique (3 ECTS : 28.5 TD)

EC Electricité (3 ECTS : 28.5 TD)

EC TP (3 ECTS : 2 TD + 16 TP)

## S2

EC Mécanique du point (3 ECTS : 25.5 TD)

EC Électrostatique (3 ECTS : 12 CM + 13.5 TD)

EC Physique Expérimentale II (3 ECTS : 24 TP)

## S3

EC Champ classique (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + LAS2 + Mmin.p

EC Electromagnétisme I (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + LAS2 + Mmin.p

EC Thermodynamique I (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + LAS2 + Mmin.p

EC Oscillations et ondes (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + LAS2

EC Mathématiques (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P (sauf min.Math.) + LAS2

CM = Chupin\* ; TD = Orloff

EC Physique Expérimentale III (3 ECTS : 3 CM + 3 TD + 28 TP) -> P + MP + LAS2

EC Electronique (3 ECTS : 12 CM + 9 TD + 12 TP) -> P (sauf mineur Math.)

EC Instrumentation (3 ECTS : 15 CM + 6 TD + 9 TP) -> P (sauf mineur Math.)

## S4

EC Mécanique des solides (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + LAS2

EC Physique expérimentale (3 ECTS : 32h TP) -> P + LAS2

EC Physique expérimentale pour PC I (3 ECTS : 6h TD + 28h TP) -> PC

EC Electromagnétisme II (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + LAS2

EC Optique ondulatoire/EM (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + LAS2

EC Thermodynamique II (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + LAS2

EC Relativité restreinte (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + LAS2

EC Astronomie (3 ECTS : 15 CM + 10.5 TD + 6 TP observations) -> PFA + LAS2 (choix 1)

EC Energie et climat (3 ECTS : 13.5 CM + 18 TD) -> PFA

EC Projet (3 ECTS : 32 TP) -> PFA + MP

EC Env. Fluides et Climat (3 ECTS : 15 CM + 15 TD) -> SAE + LAS2 (choix 2) + ST + SVT

EC Optique atmosphérique (3 ECTS : 21 TD + 9 TP) -> SAE

EC Pollution atmosphérique (3 ECTS : 15 TD + 15 TP) -> SAE

## S5

EC Mécanique des fluides (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + Pluri

EC Thermodynamique III (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + Pluri

EC Physique quantique I (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC

points sautés selon les années et le temps

EC Physique quantique II (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC  
EC Physique analytique (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP  
EC Physique Expérimentale (3 ECTS : 32 TP) -> P  
EC Analyse de données (3 ECTS : 15 CM + 15 TP) -> PFA + SAE + ST  
EC Electromagnétisme III (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> PFA  
EC Chaos (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> PFA  
EC Thermodynamique atmosphérique (3 ECTS : 15 CM + 15 TD) -> SAE + ST

## S6

EC Physique du solide (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP  
EC Physique subatomique (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP  
EC Astrophysique (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP  
EC Physique quantique atomistique (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP (P)  
EC Physique statistique (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + Pluri  
EC Méthodes numériques (3 ECTS : 13.5 CM + 16.5 TP) -> PFA + SAE + MP (P) + ST  
EC Fluides géophysiques (3 ECTS : 15 CM + 15 TD) -> SAE + ST  
EC Projet (3 ECTS : 30 TP) OU EC Stage -> SAE + ST  
EC Projet / Stage (6 ECTS : 64 TP) -> P + MP (P)  
EC Physique de la matière (3 ECTS : 18h CM + 18h TD) -> PC  
EC Physique expérimentale pour PC II (3 ECTS : 32h TP) -> PC  
EC Projet PC (3 ECTS : 32h TP) -> PC

# Programme détaillé L1 Physique

## S1

### EC Optique géométrique (3 ECTS : 28.5 TD)

- Intro, propagation de la lumière, domaine de validité de l'optique géométrique, sources lumineuses et récepteurs.
- Principe de Fermat, loi de Snell-Descartes (réflexion, réfraction), guide de lumière et fibre optique.
- Système optique. Objet et image : Relation de conjugaison - Espace réel ou virtuel, Foyers. Conditions de Gauss : Définition - Interprétations mathématiques. Miroir plan : Définition - Construction géométrique de l'image d'un point lumineux - Notions de stigmatisme rigoureux - Image d'un objet étendu à travers un miroir plan.
- Dioptries sphériques.
- Lentilles minces.
- Systèmes optiques centrés.
- L'oeil.

### EC Electricité (3 ECTS : 28.5 TD)

- Courant (loi des noeuds), Tension & ddp (loi des mailles), dipôle, convention de fléchage (récepteur/générateur).
- Dipôles (résistivité, résistance, loi d'Ohm, loi d'association R, C, L en série et parallèle, puissance consommée par R, L, C). Générateur de courant, générateur de tension (idéaux, réels).
- Etude de circuits : Premiers pas (loi des noeuds, loi des mailles, méthode des courants de maille, méthode des potentiels de noeuds). Diviseur de tension, de courant, pont de Wheatstone.
- Théorèmes de Thévenin et de Norton.
- Autres théorèmes fondamentaux (th. de superposition, th de Millman)
- Grandeurs périodiques et sinusoïdales (période, fréquence, pulsation, phase). Valeurs moyenne et efficace d'un signal périodique.
- Systèmes en régime sinusoïdal permanent: représentation de Fresnel, impédance (R, L, C), loi d'association, représentation complexe (loi des noeuds, loi des mailles).

### EC TP (3 ECTS : 2 TD + 16 TP)

- T.P. Electricité  
Rappel : précision des mesures, calcul d'incertitude  
**TP1** - Prise en main du matériel : mesures électriques, appareils de mesures - Mesure de résistance - Visualisation de signaux à l'oscilloscope - Utilisation d'un multimètre : Ohmmètre, Voltmètre, Ampèremètre - Mesure de la fréquence et de la période d'un signal - Pont de Wheatstone  
**TP2** - Circuit RL en régime sinusoïdal - Circuit RC en régime sinusoïdal - Résonance en intensité d'un circuit RLC
- T.P. Optique  
Un TD sur les calculs d'incertitudes + présentation des TP + rédaction d'un CR  
**TP1** - DETERMINATION DE LA DISTANCE FOCale D'UNE LENTILLE DIVERGENTE - 1. Caractérisation d'une lentille convergente a. Méthode d'autocollimation b - méthode de Bessel 2. Détermination de la distance focale d'une lentille divergente  
**TP2** - DETERMINATION DE L'INDICE D'UN PRISME - 1. Goniomètre : a. Principe de fonctionnement du goniomètre b. Réglage de la lunette par la méthode d'autocollimation c. Réglage du collimateur 2. Caractérisation du prisme a. Mesure de l'angle au sommet A .b. Observation du pouvoir dispersif du prisme c. Mesure du minimum de déviation  $D_m$  pour les raies d'émission du sodium .d. Estimation de l'indice  $n$  et loi de Cauchy

## S2

### **EC Mécanique du point (3 ECTS : 25.5 TD)**

- 3 parties : cinématique, dynamique et énergie.
- Notion de référentiels galiléens
- coordonnées cartésiennes, cylindrique, sphériques, Frenet
- Caractérisation du mouvement d'un point : position, vitesse, accélération
- Lois de Newton
- Théorème du moment cinétique
- Travail, puissance d'une force
- Théorème de l'énergie cinétique, mécanique
- Équilibre d'un point matériel

### **EC Électrostatique (3 ECTS : 12 CM + 13.5 TD)**

- Champ électrique, loi de Coulomb et ligne de champ
- Principe de superposition d'un ensemble de charges
- Coordonnées cartésiennes, cylindriques et sphériques
- Symétries et principe de Curie
- Potentiel électrostatique, circulation du champ électrique et gradient
- Dipôle électrostatique et moment dipolaire
- Distributions de charges (linéique, surfacique et volumique)
- Champ et potentiel générés par une distribution de charge
- Force exercée sur une distribution de charge
- Calcul de flux
- Théorème de Gauss et exemples fondamentaux
- Modèle de l'électron élastiquement lié et polarisation de l'atome
- Conducteurs, théorème de Coulomb et capacité
- Condensateurs

### **EC Travaux pratiques Physique/SPI (3 ECTS : 1.5CM, 24 TP)**

- Une série de 4 TP de 3h sur les phénomènes physiques étudiés cette année (caractérisation des coefficients de frottements, étude d'un oscillateur harmonique, loi de Coulomb pour une sphère chargée, capacité d'un condensateur plan)
- Une série de 4 TP de 3h comme ouverture aux disciplines des champs disciplinaires des sciences pour l'ingénieur, aide à l'orientation entre les différents parcours de la licence SPI (Etude d'une chaîne d'acquisition pour la mesure de la température; conception mécanique et automatismes industriels, étude de la radioactivité naturelle)

# Programme détaillé L2 Physique

## S3

**Champ classique (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + LAS2 + Mmin.p**

**CM = Morenas\* ; TD = Morenas + Dicko**

- Retour sur les systèmes de coordonnées. Découpages.
- Analyse vectorielle.
- Gravitation classique sous forme locale et intégrale (analogie avec l'électrostatique).
- Changement de référentiel (cinématique) et mécanique du point dans les référentiels non galiléens.
- Forces centrales, cas des forces newtoniennes.
- Développement multipolaire (éventuellement).

**Electromagnétisme I (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + LAS2 + Mmin.p**

**CM = Gay\* ; TD = Ramillien + Sauvagnat**

- Champ magnétique : Loi de Biot et Savart et théorème d'Ampère
- Force magnétostatique : Force de Laplace, Travail des forces magnétiques et flux coupé, Théorème de Maxwell
- Potentiel vecteur, jauge de Coulomb
- Equation de continuité
- Induction de Lorentz, de Neumann
- Loi de modulation de Lenz, notion de force électromotrice
- Equation de Maxwell-Faraday
- Auto-induction, induction mutuelle
- Applications: courants de Foucault

**Thermodynamique I (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + LAS2 + Mmin.p**

**CM = Disseix\* ; TD = Menecier + Pilleyre**

- Notions mathématiques (Fonctions de plusieurs variables, différentielles : différentielles exactes, formes différentielles, fonctions implicites)
- Notions générales (Systèmes, transformations, notions de température, forces pressantes, pression, différentes représentations....)
- Propriétés thermoélastiques et cinétiques des gaz parfaits - Aspects macroscopiques et microscopiques
- L'énergie interne et le premier principe
- Propriétés énergétiques des gaz parfaits - Conséquences du 1<sup>er</sup> principe : applications à différentes transformations, cycles
- L'entropie et le second principe - applications aux machines thermiques

**Oscillations et ondes (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + LAS2**

**CM = Cogneras\* ; TD = Solnyshkov + Sauvagnat**

Oscillations (10.5 CM + 9 TD)

- Oscillateur harmonique libre, amorti
  - Pendule (PFD, énergétique)
  - Circuit RLC (systèmes d'équations différentielles)
  - Analogie électro-mécanique

- Espace des phases 2D
- Point matériel dans un puits de potentiel
  - Développement de Taylor
  - Période des petites oscillations autour de l'équilibre
- Oscillations forcées
  - Résonances du RLC (tension, intensité)
  - Oscillations forcées du pendule
  - Filtrage (Fonction de transfert, impédances)
  - Séries de Fourier

Ondes : (6 CM + 6 TD)

- Corde de Melde - oscillations mécaniques
  - Etablissement de l'équation d'onde (linéarisation)
  - Ondes progressives et régressive, vitesse de propagation
  - Onde plane et relation de dispersion
  - Conditions aux limites, réflexion (coefficient de réflexion et impédances)
  - Ondes stationnaires
  - Modes résonants (quantification)
- Analogie avec la ligne de transmission
  - Modélisation de la ligne
  - Équation des télégraphistes
  - Impédance caractéristique

**Mathématiques (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P (sauf min.Math.) + LAS2**

**CM = Chupin\* ; TD = Deschamps**

- Rappels sur les espaces vectoriels et applications linéaires (3 h)
  - espaces vectoriels ; exemples (surtout  $\mathbb{R}^n$  avec  $n=2,3$ )
  - bases (et changement de base)
  - applications linéaires
  - matrices ; changement de base
  - exemples géométriques : projections, symétries, rotations
  - composition des applications linéaires
  - inversibilité, déterminant, noyau, image
- Vecteurs propres et diagonalisation (7,5h)
  - vecteurs et valeurs propres ; interprétations géométriques
  - polynôme caractéristique ; diagonalisation
  - exemples géométriques (projections, symétries, rotations)
  - espaces vectoriels complexes ; valeurs propres complexes
  - complexification des matrices de rotation
  - réduction de Jordan (preuves admises)
- Exponentiation des matrices (1,5h)
  - Rotations infinitésimales ; base des rotations dans le plan et l'espace
  - Exponentiation matricielle
  - Equations différentielles linéaires vectorielles d'ordre 1
- Produits scalaires (3h)
  - produit scalaire réel ; espaces euclidiens ; norme
  - orthogonalité
  - théorème de Pythagore ; Inégalité de Cauchy-Schwarz ; Inégalité triangulaire

- bases orthonormées ; projections orthogonales
- produit scalaire complexe ; espaces hermitiens ; norme
- applications linéaires symétriques et autoadjointes; diagonalisabilité (preuve admise)
- **espace minkowskien**
- Séries de Fourier (3h)
  - espaces préhilbertiens / hilbertiens (introduction non technique)
  - familles orthonormées
  - séries de Fourier réelles et complexes (définitions et formules)
  - théorème de Dirichlet (preuve admise)

vert = rappels S2

rouge = compléments si temps restant (probablement pas) ou en exercices de TD

### **EC Physique Expérimentale III (3 ECTS : 3 CM + 3 TD + 28 TP) -> P + MP + LAS2**

**Méto = Rosnet ; TP = Bras + Badaud + Dicko**

- Notions de Métrologie (CM + TD + 1 TP) : Distributions statistiques : lois normale, plate et triangulaire ; Intervalle de confiance et facteur de Student (explication au S5) ; Établissement de la formule de propagation des incertitudes et facteur de corrélation (formule démontrée en S5) ; Combinaison de plusieurs mesures et compatibilité ; Régression linéaire
- Thermodynamique : 1 - Transformation d'énergie mécanique et électrique en chaleur ; 2 - Comportement du gaz parfait (loi de Boyle-Mariotte) et fluide réel au voisinage du point critique
- Oscillations et Ondes : Mesure des capacités thermiques d'un gaz parfait à l'aide d'une oscillation harmonique (méthode de Rüchardt)
- Electromagnétisme : 1 - Inductance propre et inductance mutuelle (expérience de Faraday) ; 2 - Mesure de champs magnétiques dans des géométries simples (fil et spire)
- Champ Classique : Mouvement dans un référentiel non-galiléen (accélération de Coriolis dans un bol en rotation)

#### ----- Contenu de l'UE Mesures Physiques:

- Etude d'échantillons
  - Mesures de forme: moyenne, variance, skewness, Kurtosis
  - Sous-échantillons, table de fréquences, histogrammes
  - Échantillons multidimensionnels: covariance, corrélations
  - Décorrélations (un peu d'algèbre linéaire: vecteurs/valeurs propres), Analyse en Composantes Principales
- Théorème central limite
  - Application: planche de Galton, de la loi Binomiale à la loi Normale
- Incertitudes
  - interprétation, écart-type, intervalles de confiance
  - Erreurs statistiques, Erreurs systématiques
  - Propagation des erreurs
  - représentations (ellipse d'erreur)
- Probabilités
  - Approche fréquentiste, Bayésienne
  - Probabilité conditionnelle, théorème de Bayes
  - Combinatoire, dénombrement
  - Variables aléatoire

- Fonction de répartition et densité de probabilité
- Espérance et Moments
- Quelques lois de probabilités discrètes et continues (Bernouilli, Binomiale Poisson, Gauss, Bendford, ...)
- Changement de variable aléatoire
- Somme et produit de variables aléatoires
- Estimation de paramètres
  - Introduction à la théorie de l'estimation
  - Notion d'estimateur : définition, exemples
  - Propriétés des estimateurs : convergence, biais, efficacité
  - Méthodes d'estimation :
    - Maximum vraisemblance
    - Moindres carrés

**EC Electronique (3 ECTS : 12 CM + 9 TD + 12 TP) -> P (sauf mineur Math.)**

**CM = Chanal\* ; TD = Lefèvre ; TP = Chanal (1 groupe de TP) + Lefèvre (1 groupe de TP)**

- Jonction PN ; Modèle comportemental diode, photodiode, photopile ; Montages de base (dont pont de diodes)
- Modèle comportemental AO parfait (dont amplificateur différentiel) ; Montages de base (amplificateur, comparateur, intégrateur, dérivateur)
- Filtrage (essentiellement axé sur les diagrammes de Bode) : filtres passifs du 1er et 2nd ordre, filtres actifs

**EC Instrumentation (3 ECTS : 15 CM + 6 TD + 9 TP) -> P (sauf mineur Math.)**

**CM = Gay\* ; TD = Chanal ; TP = Chanal**

- CM : Signal et information (dont signaux analogiques et numériques) ; Mesures directes et indirectes ; Chaîne d'acquisition ; Capteurs ; Comment faire une mesure (élaboration du protocole expérimental et de la chaîne de mesure)
- TD : Pince ampérométrique (dont Effet Hall) ; ADC
- TP : Capteurs / Montages détecteurs ; ADC / Chaîne de mesure ; Arduino

## S4

**EC Mécanique des solides (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + LAS2**

**CM = Lefevre\* ; TD = Badaud + Monier**

- Introduction à la notion de torseur
- Cinématique des systèmes de points et des solides. Lois de Coulomb
- Éléments de cinétique des systèmes de points et des solides
- Théorèmes généraux
- Aspects énergétiques
- Mouvements de solides
- Mouvement de la toupie, approximation gyroscopique.

**EC Physique expérimentale 4 (3 ECTS : 32h TP) -> P + LAS2**

**TP = Monier + Centeno\* + Disseix**

- Thermodynamique : 1 - Cycle frigorifique (Fonctionnement d'une pompe à chaleur) ; 2 - Rendement d'un moteur à air chaud (cycle de Stirling)
- Mécanique des solides : 1 - Mesure de moments d'inertie (différentes géométries, théorème de Huyghens) ; 2 - Gyroscope (équilibrage et mouvement gyroscopique)



- Electromagnétisme : 1 - Onde électromagnétique dans le vide (émetteur, polariseur, loi de Malus, génération d'une onde stationnaire) ; 2 - Polarisation de la lumière (état de polarisation d'un laser, afficheur à cristaux liquide)
- Optique : 1 - Diffraction de Fraunhofer et fentes de Young ; 2 - Réseau plan en transmission (pas du réseau, longueur d'onde d'une raie spectrale, pouvoir de résolution)

**EC Physique expérimentale pour PC I (3 ECTS : 6h TD + 28h TP) -> PC**

**Méto = Rosnet ; TP = Chanal\* (12h) + Lefèvre (12h)**

- Notion de métrologie : 6h TD + 4h sur un TP dédié [idem S3 P]
- 6 TP de 4h :
  - Expérience de Faraday / Inductance mutuelle [idem S3 P]
  - Auto-induction / Force de Laplace [idem S3 P]
  - RLC : différentes résonances (aux bornes de R, L et C), bandes passantes, diagrammes de Bode en gain et en phase [à adapter de S3 P EC électronique]
  - A.O. : montages de base (amplificateur, comparateur, intégrateur, dérivateur) [à adapter de S3 P EC électronique]
  - Capteurs / Montages détecteurs [à adapter de S3 P EC instrumentation]
  - ADC / Chaîne de mesure [à adapter de S3 P EC instrumentation]

**EC Electromagnétisme II (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + LAS2**

**CM = Centeno\* ; TD = Bastid + Centeno**

- De la statique à la dynamique: Équations de Maxwell dans le vide
- Relations de passage du champ EM
- Le Théorème de Poynting
- Ondes EM: Équations, ondes progressives régressives, l'onde plane,
- Les équations de Maxwell en régime harmonique, Th. Poynting (complexe)
- Polarisation des ondes EM, loi de Malus (cf TPs)
- Superposition d'ondes: Conditions d'interférence EM
- Introduction à la propagation dans un plasma: notion de permittivité
- Les équations de Maxwell dans l'approximation du régime quasi-statique: application à l'effet de peau (pas certain que cela tienne en 30h)

**EC Optique ondulatoire/EM (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + LAS2**

**CM = Moreau\* ; TD = Disseix + Médard**

- Description scalaire de la lumière
- Interférence à deux ondes, formule de Fresnel
- Fentes d'Young
- Interférométrie (Michelson, spectro IR)
- Cohérence temporelle
- **Transformées de Fourier (PC)**
- Réseaux de diffraction et spectrométrie
- Cavity optique, résonances de cavity et laser
- Interféromètre de Fabry-Perot
- Diffraction de Fraunhofer

**EC Thermodynamique II (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + LAS2**

**CM = Schwarzenboeck\* ; TD = Morenas + Bras**

- Approfondir le deuxième principe : cycles monothermes et dithermes, énoncés de

Kelvin, Carnot et Clausius, échange et création d'entropie

- Les potentiels thermodynamiques : transformée de Legendre, construction et interprétation des nouvelles fonctions d'état; l'enthalpie libre généralisée, travail max. récupérable (exemples : déformation élastique, électrostriction, ...)
- Les conditions d'équilibre : grandeurs molaires partielles et potentiel chimique, équilibre thermodynamique d'un système hétérogène, règle de phase

**EC Relativité restreinte (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + LAS2**

**CM = Deschamp\* ; TD = Lefevre + Badaud**

- Relativité Galiléenne et Électromagnétisme
- Expériences de Fizeau, Expérience de Michelson et Morley
- Postulats de la Relativité Restreinte, Transformations de Lorentz
- Événements spatio-temporels, Temps propre, Notion de quadrivecteur
- Diagrammes de Minkowski, Diagrammes de Loedel
- Effet Doppler relativiste
- Transformation des vitesses
- Quadrivecteur impulsion-énergie
- Dynamique relativiste, conservation de l'énergie et de l'impulsion
- Notions de physique nucléaire, défaut de masse, énergie de liaison
- Exemples: désintégration  $\pi^0$ , effet compton désintégrations alpha, beta, gamma...

**EC Astronomie (3 ECTS : 15 CM + 10.5 TD + 6 TP observations) -> PFA + LAS2 (choix 1)**

**CM = Says\* ; TD = Says ; TP = Rosnet + Menecier + Pauna**

- Géographie et histoire générales de l'univers
- Repérages dans l'espace-temps : configurations, sens des rotations, angles et plans, coordonnées, distances, redshift, temps et dates, magnitudes
- Le système solaire : jours sidéraux et jours solaires, périodes sidérales et synodiques, lois de Kepler, loi de Bode, forces de marées
- Astronautique : les quatre vitesses cosmiques, orbites de Hohmann, fenêtres de lancement, missions planétaires, fronde gravitationnelle
- Les instruments : télescopes, capteurs, spectrographes

**EC Energie et climat (3 ECTS : 13.5 CM + 18 TD) -> PFA**

**CM = Busato\* + Menecier + Szczap ; TD = Busato\* + Menecier + Szczap**

- Énergie : Introduction générale, équation de Kaya, énergies fossiles, nucléaire, solaire, éolienne et biomasse, stockage, analyse de cycle de vie
- Climat : Introduction générale sur le système climatique, atmosphère et océan, effet de serre et modélisation du climat, climats passés et projections climatiques

**EC Projet (3 ECTS : 32 TP) -> PFA + MP**

**TP = Morenas\* + Moreau + Sauvagnat**

- Projet type CAPES
- Travail en groupes avec le matériel disponible dans la salle CAPES
- Attribution des sujets prédéfinis

**EC Env. Fluides et Climat (3 ECTS : 15 CM + 15 TD) -> SAE + LAS2 (choix 2) + ST + SVT**

**CM = Deguillaume\* ; TD = Jourdan + Szczap + Deguillaume**

- Introduction: La motivation du cours : fluctuations des climats passés et futurs
- le système climatique actuel: Les compartiments qui y contribuent : l'atmosphère, les continents, l'océan et la glace
- L'atmosphère du jour au jour: les mesures au sol, analyse de cartes météo au sol, l'atmosphère adiabatique et l'analyse d'une carte météo en altitude
- Le flux d'énergie: propriétés physiques du rayonnement, le cycle de Milankovitch, le rayonnement solaire et son interaction avec l'atmosphère (+ trou d'ozone), le rayonnement tellurique et son interaction avec l'atmosphère (+ effet de serre)
- Le cycle de l'eau: propriétés physiques de l'eau, l'évapotranspiration, formation des nuages, formation de la pluie, la stabilité de l'atmosphère et la convection (emagramme)
- la circulation planétaire: circulation idéalisée, circulation atmosphérique, les différentes zones de circulation, El Nino
- la classification selon Köppen: les différentes zones climatiques et les phénomènes météorologiques associés
- le changement climatique: les changements documentés, les scénarios, les incertitudes

### **EC Optique atmosphérique (3 ECTS : 21 TD + 9 TP) -> SAE**

**TD/TP = Szczap\* + Baray**

- Rappels fondamentaux en optique géométrique (loi de Snell-Descartes) et ondulatoire (diffraction, interférences), spectre électromagnétique.
- Diffusion (fonction de phase) et absorption par les hydrométéores et les gaz.
- Applications à des phénomènes optiques atmosphériques.
- Etude de l'effet de serre (modèle à 1 et à N couches).
- Différents moyens d'observation (radiomètre, lidar, radar), orbitologie, géométrie d'observation (nadir, limbe) et de mesures (pixel, champ de vue), technique de mesures (à balayage, à barrette).
- Illustration du problème inverse : restitution de vapeur d'eau, de la phase des nuages, de température de surface, du niveau des océans, de la charge en aérosol, etc

### **EC Pollution atmosphérique (3 ECTS : 15 TD + 15 TP) -> SAE**

**TD = Colomb\* + Deguillaume ; TP = Colomb (+ Deguillaume)**

- Notions de bases en chimie environnementale : réactivités des systèmes, thermochimie, équilibres, cinétique, transfert entre phases (gaz/eau)
- Introduction à la chimie atmosphérique : émissions des composés chimiques (gaz, particules), réactions photochimiques dans l'air et dans les nuages, effet de la chimie atmosphérique sur la qualité de l'air

# Programme détaillé L3 Physique

## S5

**EC Mécanique des fluides (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + Pluri**

**CM = Planche\* ; TD = Jourdan (x2)**

- Généralités sur l'état fluide
- La statique des fluides
- Tension superficielle et capillarité
- Cinématique des fluides
- Mise en équation de la mécanique des fluides
- Équation de continuité, notion du débit
- L'équation de quantité de mouvement
- La dynamique des écoulements parfaits
- L'acoustique des fluides parfaits
- Écoulement unidimensionnel d'un gaz parfait sans frottement

**EC Thermodynamique III (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + Pluri**

**CM = Rosnet\* ; TD = Monier + Rosnet**

- Introduction : Rappel des notions essentielles de la thermodynamique I et II
- Rappel des potentiels thermodynamiques
- Changement d'état des corps purs : chaleur latente, équilibre sous deux phases, relation de Clapeyron
- Transition de phase des corps pur (1ère espèce; retard de transition; notion de 2ème espèce)
- Production de très basses températures ; procédé de Linde; désaimantation isentropique; 3<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique
- La diffusion thermique, propagation d'une onde de chaleur; température de contact
- lois de Wien, Stefan et Planck; Étude thermodynamique du rayonnement;
- la formule de Planck dans une sphère en expansion isentropique; décalage vers le rouge

**EC Physique quantique I (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC**

**CM = Lefèvre\* ; TD = Orloff + Akar**

**[points sautés selon les années et le temps]**

- Introduction historique: le photon
  - panorama classique fin 19<sup>es</sup>: mécanique, E-M
  - hypothèse de Planck
  - effet photo-électrique
- Introduction historique: ondes de matière
  - de Broglie
  - franges de Young et diffraction par un cristal
- Espaces de Hilbert de dimension finie:
  - Espace vectoriel (ket)
  - Espace dual (bra)
  - Base
  - Produit scalaire et métrique; inégalité de Schwarz
  - Opérateurs: adjoint, hermitien, unitaire
  - Projecteurs et fermeture

- Vecteurs, valeurs propres et décomposition spectrale
- ECOC
- Fonction d'opérateurs
- Produits tensoriels
- Systèmes à 2 états: polarisation du photon
  - Polarisation d'une onde électromagnétique: vecteurs de Jones
  - Analyseurs et lames bi-réfringentes (demos de cours)
  - [Cryptographie quantique (protocole BB84)]
- Postulats de la physique quantique (1 à 5):
  - 1. Etats (introduit avec Hilbert)
  - 2. Amplitudes et probabilités (introduit avec polarisation)
  - 3. Grandeurs physiques
  - 4. Mesure et probabilités
  - 5. Effet inévitable de la mesure
  - Incertitudes, variance et écart-type
  - Grandeurs incompatibles et principe d'incertitude généralisé
- Modélisation de molécules à nombre fini d'états
  - Ethylène
  - Benzène [(généralisation de  $Z_6$  à  $Z_N$  et série de Fourier discrète)]
- Postulat 6: équation de Schrödinger
  - Fréquences de Bohr
  - [Inégalité de Heisenberg temporelle]
  - [Points de vue: Schroedinger, Heisenberg, mixte]
  - Evolution des valeurs moyennes
  - Modélisation et choix de Hamiltonien
- Systèmes à 2 états: spin 1/2
  - Moment angulaire, moment magnétique et spin
  - Filtres de Stern-Gerlach
  - [Rotations et matrices de Pauli]
- Postulat 7: symétrisation
  - Produit tensoriel et sous-systèmes
  - [Systèmes identiques et groupe de permutation]
- [Prolongements:]
  - [Intrication, matrice densité et décohérence]
  - [Inégalités de Bell]
  - [Calcul quantique]

**EC Physique quantique II (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC**  
**CM = Monteil\* ; TD = Orloff + Deschamps**

Pré-requis : formalisme lagrangien et hamiltonien de la mécanique analytique

- Grandeurs quantiques continues : Espaces de Hilbert de dimension infinie (espaces de fonctions, opérateurs différentiels linéaires)
- Equation de Schrödinger 1D : paquet d'onde, vitesse de groupe, étalement
- Equation de Schrödinger 1D : barrières de potentiel, effet tunnel, quantification des niveaux; spectre discret et/ou continu
- Oscillateur harmonique 1D

**EC Physique analytique (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP****CM = Ajaltouni\* ; TD = Ajaltouni**

- Introduction à la Mécanique Analytique. Coordonnées généralisées. Espace de Configuration. Rappels de Mathématiques.
- Principe de Moindre Action (action extrême). Définition de la fonction de Lagrangien et ses propriétés. Lagrangien d'une particule matérielle libre. Lagrangien d'un système de particules matérielles en interaction.  $L = E_c - E_p$
- Symétries de l'Espace et du Temps. Lois d'Invariance. Illustration du théorème de Noether.
- Equations Canoniques et Hamiltonien:  
Système Conservatif. Equations Canoniques de Hamilton. Crochets de Poisson et leurs propriétés.  
Equation de Hamilton-Jacobi.
- Principe de Hamilton dans le cadre de la Relativité Restreinte ;  
Rappels sur l'espace-temps de Minkowski.  
Définition de l'Action en Relativité Restreinte.  
Dynamique de la Relativité Restreinte et Equation d'Einstein.
- Principe de Hamilton appliqué au Champ EM Relativiste:  
Action d'un système de Champ EM et de Particules chargées relativistes.  
Lagrangien du Champ EM en interaction avec des particules chargées.

**EC Physique Expérimentale 5 (3 ECTS : 32 TP) -> P****TP = Bras (thermodynamique) + Ramillien\* (optique) + Akar + Corpe (quantique)**

- Quantique (12h) :
  - Millikan (3) -> acheter 1 ampoule
  - Franck & Hertz (3) -> prévoir l'achat d'une ampoule spare
  - Effet photoélectrique (3) -> A commander : Appel EUPI 3 février
- Optique (8h) :
  - interféromètre de Michelson (observation des anneaux d'égale inclinaison, vérification du rayon, mesure de longueur d'onde d'une raie spectrale à partir d'une longueur d'onde étalon)
  - Mach-Zender -> A commander 1 nouveau Mach-Zender + 10 paires de lunettes (laser) + pompes : Appel EUPI 3 février
- Thermodynamique (12h) :
  - équilibre liquide-vapeur (relation de Clapeyron)
  - étude d'un fluide réel (liquéfaction, point critique)
  - cycle frigorifique et application des diagrammes isenthalpiques (représentation du cycle sur le diagramme de Mollier, puissance frigorifique) -> 2 séances
- Mécanique des fluides : -> À réfléchir pour le futur
  - mesures de la portée et de la traînée d'une aile
  - écoulement fluvial et torrentiel dans un canal d'eau

**EC Analyse de données (3 ECTS : 15 CM + 15 TP) -> PFA + SAE + ST****CM = Busato + Gour\* ; TP = Busato + Montoux + Gour + Baray + Menand**

- Probabilités
  - Variables aléatoire
  - Fonction de répartition et densité de probabilité
  - Espérance et Moments
  - Quelques lois de probabilités discrètes et continues (Bernoulli, Binomiale)

Poisson, Gauss, Bendford, ...)

- Changement de variable aléatoire
- Somme et produit de variables aléatoires
- ...

- **Etude d'échantillons**

- Mesures de forme : moyenne, variance, ...
- Sous-échantillons, table de fréquences, histogrammes
- Échantillons multidimensionnels: covariance, corrélations
- ...

- **Incertitudes**

- Interprétation, écart-type, intervalles de confiance
- Incertitudes statistiques, incertitudes systématiques
- Propagation des incertitudes (ellipse de niveau de confiance)

- **Estimation de paramètres**

- Introduction à la théorie de l'estimation
- Notion d'échantillon
- Notion d'estimateur : définition, exemples
- Propriétés des estimateurs : convergence, biais, efficacité
- Loi de Student, khi2, ...
- Méthodes d'estimation : Maximum vraisemblance / Moindres carrés

**EC Electromagnétisme III (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> PFA**

**CM = Bastid\* ; TD = Pilleyre**

- Rappels des notions essentielles
- Dipôles et multipôles électriques avec développement multipolaire du potentiel d'une distribution de charges et exemples d'application
- Etude macroscopique des milieux: potentiel et champ créé par un diélectrique polarisé et charges volumiques et surfaciques de polarisation, déplacement diélectrique, propriétés des milieux diélectriques, relation de passage, exemples d'application
- Etude microscopique de la polarisation avec champ local de Lorentz, mécanismes microscopiques de polarisation: polarisation électronique, polarisation ionique, polarisation d'orientation (théorie de Langevin), relation de Clausius-Mossetti, piézoélectricité, ferroélectricité
- Etude macroscopique de l'aimantation: aimantation des milieux matériels avec 1) magnétisme dans les milieux matériels (dipôle magnétique, moment dipolaire magnétique, vecteur aimantation, boucle de courant: potentiel vecteur magnétique, champ magnétique, densités de courant d'aimantation), 2) Eq. de Maxwell (vect. excitation magnétique et relations de passage) et relation de passage, 3) caractérisation des milieux magnétiques : milieux LHI, milieux diamagnétiques, paramagnétiques et ferromagnétiques
- Le ferromagnétisme avec introduction, étude de l'aimantation, circuits magnétiques avec applications

**EC Chaos (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> PFA**

**CM = Porteboeuf\* ; TD = Solnyshkov**



- 1) Déterminisme et équation différentielle : Mise en contexte à partir d'Approche Transversale de la Physique au S3
- 2) Sensibilité aux conditions initiales et non-linéarité : approche intuitive de la définition d'un comportement chaotique, exemple de la suite logistique (étude d'une population de population de lapins à partir d'Excell)
- 3) Introduction à la théorie des systèmes dynamiques : degré de liberté, espace des phases, portrait de phase, flot, trajectoire dans l'espace des phases, invariance par changement d'origine temporelle
- 4) Systèmes Dynamiques, partie 2 : étude du diagramme des phases, points fixes et leurs stabilités, cycle limite, attracteur, bifurcations (nœud-col et fourche)
- TD 1 : Espace des phases à 2 dimensions et mécanique à 1 dimension
- 5) Section de Poincaré et dynamique en temps discret : définitions, résolution graphique de la suite logistique, applications (Hénon et Lozi)
- 6) Stabilité structurelle: transformation du boulanger et du fer à cheval
- 7) Exposant de Lyapounov : définition, horizon prédictif de Lyapounov, discussion sur un article *ON THE NUMERICAL COMPUTABILITY OF ASTEROIDAL LYAPUNOV TIMES*, calcul de l'exposant de Lyapounov de la suite logistique
- TD 2 : Stabilité des cycles de la suite logistique et de sa linéarisation
- 8) Attracteur étrange et fractal : définition, illustrations (Hénon, Lozi, Rossler, Mira, Ikéda, Lorenz), concept de fractale, dimension de Hausdorff, exemples (tamis et tapis de Sierpinski, courbe de Von Koch, ensemble et cubes de Cantor), lien entre chaos et fractale
- 9) La dynamique de Lorenz et l'effet papillon, Introduction à la mesure de Sinai-Ruelle-Bowen : lecture détaillée de l'article historique de Lorenz *Deterministic Nonperiodic Flow*, lecture détaillée de l'abstract *Predictability; Does the flap of a butterfly's wing in Brazil set off a Tornado in Texas ?* Introduction à la théorie ergodique et mesure SRB
- 10) Scénarios vers le chaos: scénarios associées aux bifurcations et universalité
- TD 3 : Analyse numérique de diagrammes de bifurcation à 1 dimension
- TD4/5 : Préparation du Devoir Maison

**EC Thermodynamique atmosphérique (3 ECTS : 15 CM + 15 TD) -> SAE + ST**  
**CM = Schwarzenboeck\* ; TD = Planche**

- Notions de thermodynamiques appliquées à l'atmosphère
- Changement de phase, éq. de Clausius-Clapeyron
- Phénomènes irréversibles
- Diagrammes thermodynamiques pour l'atmosphère
- Déclenchement des instabilités

**EC Techni. Obs. Atmo. (3 ECTS : 10.5 TD + 19.5 TP) -> SAE + ST**  
**TD = Schwarzenboeck\* + Montoux ; TP = Schwarzenboeck + Montoux + Colomb**

- Fonctionnement des capteurs "atmosphériques"
- Etudes et mesures des propriétés thermodynamiques, nuageuses et précipitantes, des flux radiatifs, des gaz traces
- Réalisation, analyse et interprétation d'un radiosondage



**EC Physique du solide (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP**

**CM = Bideux\* ; TD = Robert-Goumet**

- Les états de la matière
- La structure atomique du cristal
- Les réseaux cristallins : réseaux réels et réseaux réciproques
- Symétries et cristaux
- Réseaux de Bravais et groupes d'espace
- Structures types et cohésion dans un cristal
- Théorie de la diffraction des rayons X
- Historique, production et techniques en diffractométrie par rayons X
- Cristaux réels, défauts
- introduction aux structures de bandes, semi-conducteurs, dopage

**EC Physique subatomique (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP**

**CM = Gay\* ; TD = Cognéras**

- Introduction, découvertes de la radioactivité, du neutron, du neutrino, des quarks.
- Le monde élémentaire : des quarks aux noyaux et à l'Univers.
- Processus nucléaires : Les noyaux, Phénoménologie du noyau, Formule de masse
- Modèle de la goutte liquide; fission et fusion.
- Radioactivités et applications
- Réactions nucléaires : section efficace totale, différentielle, cinématique des réactions
- Interactions n-Noyau, p-Noyau.

**EC Astrophysique (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP**

**CM = Donini\* (9h) + Menecier (7.5h) ; TD = Donini (2\*7.5h) + Menecier (2\*7.5h)**

Étoiles (7,5h CM + 7,5h TD)

- Ordres de grandeurs : tailles, masses, températures et distances
- Classification spectrale : bandes d'observation, indice de couleur, correction bolométrique, rougissement interstellaire
- Formation des étoiles : bilan énergétique d'un nuage stellaire, masse et rayon de Jeans, théorème du Viriel, planète versus étoile
- Étoile à l'équilibre : forces de gravité et de pression, équilibre thermique
- Diagramme de Hertzsprung-Russell, trajets d'Hayashi
- Relation masse-luminosité-rayon

Galaxies (6h CM + 4,5h TD)

- Voie Lactée : structure et composition, raie d'émission (21 cm, HII, X, gamma), Sgr A\* et le trou noir au centre de la galaxie, trou noir M87
- Classification des galaxies
- Matière noire : évidence expérimentale (courbe de vitesse rotation, amas de galaxies), modèles simples de matière noire, modèle MOND
- Lentilles gravitationnelles: anneau d'Einstein, microlensing, strong lensing

Cosmologie newtonienne (3h CM + 3h TD)

- Une brève histoire de l'univers
- Univers en expansion homogène et isotrope: coordonnées comobiles, facteur d'échelle, paramètre de Hubble, métrique FLRW
- Redshifts (Doppler, Einstein, cosmologique)
- Equation de Friedmann-Lemaître: densité critique, constante cosmologique, paramètres cosmologiques
- Âge de l'Univers, taille de l'Univers observable

### **EC Physique quantique atomistique (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP (P)**

**CM = Deschamps\* ; TD = Akar**

- Structure de l'atome
  - Expérience de Rutherford,
  - Modèle de Rutherford, Modèle de Bohr, Modèle de Nagaoka
  - Raies de Balmer<sup>2</sup>
- Equation de Schrödinger pour un potentiel Coulombien
  - Résolution en coordonnées sphériques
  - Composante angulaire
    - Polynômes de Legendre (généralisés) et Harmonique sphériques
    - Algèbre des moments cinétiques
    - Rappel sur les Spins
  - Composante Radiale
    - Polynômes de Laguerre (généralisés)
  - Orbitales électroniques, niveaux d'énergie dégénérescences, ...
  - Coordonnées paraboliques (TD)
- Atomes hydrogénoïdes et états de Rydberg
  - Liens entre dégénérescences et symétries
  - Corrections fines et hyperfines
- Atomes polyélectroniques, Modèle de Slater
  - Règles de remplissage de Klechkowski, Règle de Hund
  - Principe de Fermi
  - configurations électroniques et table des éléments
- Liaisons covalentes, liaisons sigma/pi, Orbitales hybrides
- Modèles moléculaire, ...
- Théorie des perturbations stationnaires (introduction)
- effet Stark, Zeeman, ...

### **EC Physique statistique (3 ECTS : 16.5 CM + 15 TD) -> P + MP + PC + Pluri**

**CM = Gil\* ; TD = Solnyshkov + Gil**

- Introduction : la matière, propriétés macroscopiques/constituants microscopiques - microétats accessibles : l'approche microcanonique en un jeu de coloriage - entropie et ses interprétations
- Révisions mathématiques : analyse combinatoire, distributions binomiale, gaussienne, de Poisson
- Rappels de thermodynamique classique
- Les ensembles statistiques : présentation générale
- L'ensemble microcanonique : la distribution microcanonique - entropie statistique - équilibres thermique, mécanique, chimique
- L'ensemble canonique : la distribution canonique - somme d'états (fonction de partition) - énergie moyenne, entropie, énergie libre, pression d'un système
- Application : statistique de Maxwell-Boltzmann - théorie cinétique des gaz :

distribution des vitesses de Maxwell - récapitulatif des sommes d'états des atomes et molécules gazeux

- Introduction à l'ensemble grand canonique, aux statistiques de Fermi-Dirac et Bose Einstein

**EC Méthodes numériques (3 ECTS : 13.5 CM + 16.5 TP) -> PFA + SAE + ST**

**CM = Faure\* ; TP = Faure + Montoux**

- Algèbre Linéaire :
  - Gauss, Gauss-Jordan
  - Décomposition LU et Choleski
  - Matrice tridiagonale (double balayage Choleski)
  - Méthodes itératives : Jacobi et Gauss-Seidel
- Dérivées : approximation à différents ordre (Taylor), différences finies
- Interpolation et ajustement :
  - Interpolation polynomiale, Lagrange, Newton
  - Ajustement polynomiale, lissages, et pondérés
- Equations différentielles à conditions initiales : Euler, RK2, RK4, multi-pas Adams, prédicteur correcteur
- Equations différentielles à conditions aux limites : Méthode de tir, méthode matricielle

TP : Applications des méthodes à des problèmes de la physique

- ~~Equations paraboliques / diffusion~~
- ~~Application à une équation différentielle simple (équation hydrostatique) en lien avec la Mécanique des Fluides (2 approches) : 1/ solution analytique par intégration (i.e. par méthodes d'intégration numérique) et, 2/ comparaison avec la solution par différences finies.~~
- ~~Solution de l'équation de la chaleur de Fourier (équation différentielle parabolique) en lien avec le Thermodynamique III (condition limite et condition initiale) à l'aide de différentes méthodes numériques (explicite/implicite).~~

**EC Fluides géophysiques (3 ECTS : 15 CM + 15 TD) -> SAE + ST**

**CM = Monier\* ; TD = Jourdan**

- Propriétés physiques des fluides et des écoulements dans le système Terre-Océan-Atmosphère
- Notions de mécanique des fluides appliqué au système (statique, dynamiques des fluides, relations fondamentales : Navier-Stokes, conservation de la masse, transformation dans le repère sphérique de la terre en rotation)
- Analyse dimensionnelles et méthodes de similitudes
- Courants océaniques et atmosphériques; équilibre géostrophique et théorie d'Ekman pour océan et atmosphère

**EC Projet (3 ECTS : 30 TP) OU EC Stage -> SAE + ST**

**TP = Deguillaume\***

- un projet en autonomie sous forme de groupes d'étudiants
- avec un tuteur qui les guide.
- L'étudiant met en oeuvre les éléments suivants :
  - Choisir un thème/une problématique de projet et le défendre,

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Imaginer, élaborer un protocole expérimental,</li> <li>○ Réaliser les expériences et les mesures,</li> <li>○ Analyser les données,</li> <li>○ Modéliser les phénomènes (écriture de code, connexion avec Physique Numérique).</li> <li>● Les différentes étapes: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ présentation du sujet, présentation du protocole expérimental, validation,</li> <li>○ achat éventuel de matériel,</li> <li>○ travail en autonomie avec le soutien du tuteur,</li> <li>○ présentation du projet réalisé</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <p><b>EC Projet / Stage (6 ECTS : 64 TP) -&gt; PFA-option + MP (P)</b><br/> <b>TP = Solnyshkov* + Busato + Edee + Porteboeuf</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● un projet en autonomie sous forme de groupes d'étudiants</li> <li>● avec un tuteur qui les guide.</li> <li>● L'étudiant met en oeuvre les éléments suivants : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Choisir un thème/une problématique de projet et le défendre,</li> <li>○ Imaginer, élaborer un protocole expérimental,</li> <li>○ Réaliser les expériences et les mesures,</li> <li>○ Analyser les données,</li> <li>○ Modéliser les phénomènes (écriture de code, connexion avec Physique Numérique).</li> </ul> </li> <li>● Les différentes étapes: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ présentation du sujet, présentation du protocole expérimental, validation,</li> <li>○ achat éventuel de matériel,</li> <li>○ travail en autonomie avec le soutien du tuteur,</li> <li>○ présentation du projet réalisé</li> </ul> </li> </ul> |
| <p><b>IMAPP1 (3 ECTS : 30 CI = 15 CM + 15 TD) -&gt; PFA-option + MP (P)</b><br/> <b>CI = Corpe* (15h = 7.5 CM + 7.5 TD) + Orloff (15h = 7.5 CM + 7.5 TD)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 15h : Addition of angular momenta, Quantum Statistical Physics, Special relativity, Phase space calculations</li> <li>● 15h : Relativistic quantum mechanics, , Quark model, Phenomenology of the elementary interactions</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <p><b>IMAPP2 (3 ECTS : 12 CM + 18 TP) -&gt; PFA-option</b><br/> <b>CM = Cognéras* (9h) + CERN (3h) ; TP = Congéras (10h) + Corpe (8h)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 3h: Lecture on accelerators and large scale instruments</li> <li>● 9h: Detector physics (dE/dx, tracking, calorimetry)</li> <li>● 10h: Practical work I : (1) <math>\mu^+</math> lifetime, (2) <math>\mu^-</math> effective lifetime in matter, (3) (g-2) of the muon</li> <li>● 8h: Practical work II : Particle physics data analysis</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <p><b>EC Physique de la matière (3 ECTS : 18h CM + 18h TD) -&gt; PC</b><br/> <b>CM = Rosnet (6h) + Pilleyre (6h) + Médard (6h) ; TD = Rosnet (6h) + Pilleyre (6h) + Médard (6h)</b></p> <p>EC dédiée aux étudiants de la licence PC et constituée de 3 parties de même poids :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Relativité (12h CI - un seul intervenant - payées 6h CM + 6h TD)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

- Introduction : rappels de relativité galiléenne, expériences de Fizeau et Michelson (1h30)
- Postulats de la relativité restreinte, transformations de Lorentz (1h30)
- Dilatation durées, contractions longueurs (1h30)
- Événements spatio-temporels, temps propre, transformation des vitesses (3h)
- Notion de quadrivecteur (1h30)
- Dynamique relativiste : conservation de l'énergie et de l'impulsion, notions de physique nucléaire (3h)
- Physique Subatomique (12h CI - un seul intervenant - payées 6h CM + 6h TD) organisée en 3 blocs (entre crochets : développements via Devoirs Maisons)
  - A (4h30)
    - Caractéristiques du noyau à partir des résultats expérimentaux (à la Mendeleïev) : histoire rapide, constituants, rayon, abondance, lourds, légers, excès de neutrons, moment magnétique
    - Isotopes, isobares, isotopes [DM : chimie nucléaire]
  - B (4h30)
    - Energie de liaison, courbe d'Aston, fission, fusion [DM : nucléosynthèse primordiale]
    - Réactions nucléaires, bilan énergétique [DM : réacteur nucléaires]
    - Désintégration alpha, bêta et gamma (caractéristiques, spectre, durée de vie, activité) [DM : neutrinos]
  - C (3h)
    - Structure des protons et neutrons [DM : pions, Yukawa, quarks, neutrinos]
    - Élément de zoologie des particules [DM : bosons, fermions, interactions fondamentales]
- Physique du Solide (12h CI - un seul intervenant - payées 6h CM + 6h TD)
  - Réseaux cristallins : périodicité, groupes de symétrie, réseaux de Bravais, indices de Miller (3h)
  - Réseaux réciproques : zones de Brillouin, vecteur du réseau réciproque et distance inter-réticulaire (3h)
  - Structures de bandes : modèle de l'électron libre, densité d'états, énergie de Fermi, théorème de Bloch (3h)
  - Diffraction par un cristal : équation de Laue, construction d'Ewald, facteur de structure (3h)

### EC Physique expérimentale pour PC II (3 ECTS : 32h TP) -> PC

TP = Disseix\* + Bras + Mechin

8 TP de 4h

- 4 TP de thermodynamique
  - Transformation d'énergie mécanique et électrique en chaleur [idem S3 P]
  - Rendement d'un moteur à air chaud (cycle de Stirling) [idem S4 P]
  - Equilibre liquide-vapeur (relation de Clapeyron) [idem S5 P]
  - Cycle frigorifique et application des diagrammes isenthalpiques (représentation du cycle sur le diagramme de Mollier, puissance frigorifique) [idem S5 P]
- 4 TP d'électromagnétisme / optique
  - Onde électromagnétique dans le vide (émetteur, polariseur, loi de Malus,

génération d'une onde stationnaire) [idem S4 P]

- Polarisation de la lumière (état de polarisation d'un laser, afficheur à cristaux liquide) [idem S4 P]
- Réseau plan en transmission (pas du réseau, longueur d'onde d'une raie spectrale, pouvoir de résolution) [idem S4 P]
- Interféromètre de Michelson (observation des anneaux d'égale inclinaison, vérification du rayon, mesure de longueur d'onde d'une raie spectrale à partir d'une longueur d'onde étalon) [idem S5 P]

**EC Projet PC (3 ECTS : 32h TP) -> PC**

**TP = Lefèvre (16h) + Chanal (16h)**

- Programmation python et exemples d'utilisation de cartes Arduinos (16h)
- Projet guidé en groupe de 3 ou 4 étudiants : choix du sujet parmi une liste (montages niveau CAPES de physique-chimie), réalisation de l'expérience avec le matériel disponible et en utilisant des cartes Arduinos, rédaction d'un compte rendu et présentation orale (16h d'encadrement)